МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СОЛОНЕНКО ЛЮДМИЛА ІГОРІВНА

УДК 621.742.486

ДИСЕРТАЦІЯ

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО СТРУКТУРУВАННЯ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Л.І. Солоненко

Науковий консультант: Реп'ях С.І., д-р техн. наук, старший дослідник

Дніпро – 2023

АНОТАЦІЯ

Солоненко Л.І. Теоретичні та технологічні основи паро-мікрохвильового структурування піщано-рідкоскляних сумішей для виготовлення виливків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. – Український державний університет науки і технологій МОН України, Дніпро, 2023.

У дисертації наведені теоретичні та технологічні узагальнення в рамках вирішення науково-технічної проблеми створення екологічно безпечних ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляної суміші, що структуровані за ПМЗ-процесом, для виливків загальномашинобудівного призначення, шляхом визначення закономірностей формування властивостей і кінетики структурування суміші, оптимізації її складу та реалізації результатів досліджень у виробництві, що зумовлює підвищення екологічної безпеки та санітарно-гігієнічних умов виробництва, скорочення циклу та енергоємності процесу виготовлення виливків, підвищення їх якості та, відповідно, зниження їх собівартості.

За результатами аналізу науково-технічної та патентної літератури, сучасних умов поточного виробництва виливків в ливарних цехах України, відомих способів виробництва, сполучних матеріалів та якості виливків загальномашинобудівного призначення, науково-технічної та патентної літератури встановлено, що робота, яка спрямована на розробку наукових і технологічних основ структурування в паро-мікрохвильовому середовищі піщано-рідкоскляних сумішей з метою встановлення механізму, кінетики та закономірностей структурування в паро-мікрохвильовому середовищі сипучого кварцового піску, плакованого рідким склом, і результату його застосування на властивості ливарних форм та стрижнів, якість дрібних виливків загальномашинобудівного призначення, є актуальною.

У дисертації використані стандартні методи, методики і апаратура, загальноприйняті і оригінальні методики, що дозволили встановити об'єктивний взаємозв'язок між параметрами досліджуваних процесів. Теоретичні та експериментальні дослідження ґрунтуються на фундаментальних положеннях фізики, теплофізики, тепломасопереносу, механіки руйнування матеріалів. Експериментальні дані обробляли методами математичної статистики, візуально-вимірювального контролю, зіставлення та аналізу.

Реальна потужність мікрохвильового випромінювання, що генерується в мікрохвильових печах зі стоячею хвилею при частоті випромінювання 2,45 ГГц і номінальною потужністю магнітрону 700...1200 Вт на вісі обертового столу в резонаторі становить χ=0,40...0,72 від номінальної потужності магнетрону мікрохвильової печі та з віддаленням від неї знижується за статечним законом і на відстані більше ~60 мм досягає χ=0,29...0,36. При цьому, швидкість підвищення температури матеріалу, що нагрівають, прямо пропорційна його відносної діелектричної проникності, яка (для мінералів) залежить виключно від його хімічного складу. Встановлено, що для матеріалів з загальною величиною $\varepsilon \leq 10$ з точністю, прийнятною для інженерних розрахунків, вона може бути визначена за правилом адитивності на основі масового вмісту в ньому елементарних речовин (оксидів) та величин їх індивідуальної діелектричної проникності.

Згідно з розробленим описом механізму масопереносу рідкого скла в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання, його перенесення в капілярі проходить в результаті багаторазового повторення етапів виникнення та руйнування капсул рідкого скла за схемою подібною ланцюговій реакції, що важливо для реалізації технології склеювання структурованих піщано-рідкоскляних сумішей рідким склом в мікрохвильовому випромінюванні.

Розроблено опис механізму структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом, де манжети з рідкого скла є наслідком багатоетапного процесу: конденсації водяної пари з водяного заряду на плакованій поверхні

піщинок піщано-рідкоскляної суміші, розчинення та гідратації рідкого скла в плакованих шарах у конденсаті, спінювання рідкого скла, яке насичено водою, часткове випаровування води зі спіненого рідкого скла, спадання піни рідкого скла та його плівкова течія по поверхням піщинок до точок їх контакту між собою під дією капілярних сил з остаточною дегідратацією рідкого скла в манжетах. За результатами визначеної кінетики структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом встановлено, що при ПМЗ-процесі виділення води з піщано-рідкоскляної суміші, що структурують, проходить в три етапи: перший етап – при ~100 °С, другий – при 109...118 °С, третій – при 119...128 °С. При цьому переніс рідкого скла в піщано-рідкоскляній суміші, проходе за наступними механізмами:

- при 109...118 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його спінювання, яке виникає за рахунок інтенсивного випаровування з нього води з величиною енергії активації $E_П$ = 23,9 кДж/моль;
- при 119...128 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його в'язкої течії з величиною енергії активації $E_П$ = 49,3 кДж/моль.

За матеріальним балансом визначено, що для структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом доцільно використовувати кварцовий пісок з середнім розміром піщинок 0,16...0,25 мм та вмістом глини до 0,1% (за масою), який плакований 0,5...2,5% (за масою, понад 100% піску) рідким склом, що при масі водяного заряду 1 г дозволяє, відповідно, структурувати від 2400 до 500 г суміші протягом 8...4 хв. При цьому, маса структурованої піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом збільшується зі зменшенням маси рідкого скла, що використане на плакування піску, та за законом квадратного кореня зі збільшенням часу структурування.

За результатами оптимізації визначено, що для виготовлення ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом оптимальним є сухий кварцовий пісок, плакований рідким склом, який пройшов крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого рідкого скла (M_{SiO2}=2,8…3,0, ρ_2=1,42….1,44 г/см^3) у кількості 1,5% (за масою, понад

100% піску). Використання оптимізованого складу забезпечить структурованим піщано-рідкоскляним сумішам наступний рівень властивостей: $\sigma_{СТ}$ = 2,9...3,0 МПа, Ос = 0,26…0,30 %, К = 150…155 од, Г = 3…5 $см^3/г$, $А_{20}$ = 92…100 Дж, ρ = 1720…1730 $кг/м^3$, Δ_ε = 0,3%, для сплаву Al+8,5%Mg b_2=803 $Вт \cdot с^{0,5}/(м^2 \cdot град)$, для сірого чавуну СЧ200 b_2=1036 $Вт \cdot с^{0,5}/(м^2 \cdot град)$, що відповідає сучасним вимогам до ливарних форм та стрижнів. В той же час структурована за ПМЗ-процесом піщано-рідкоскляна суміш з кварцового піску, плакованого тим же рідким склом у кількості 2,5% та розміром конгломератів 0,315...0,63 мм, відносно вище наведеної суміші, може бути використана в ливарній формі, як теплоізоляційна.

Встановлено наявність та вид функціональних залежностей між обсипальністю, крихкістю, міцністю, роботою вибивання виливків з форм і стрижнів з виливків і рядом параметрів і властивостей структурованих формувальних та стрижневих сумішей, які визначають на зразках за стандартними і загальноприйнятими методиками. Для піщано-рідкоскляних сумішей, які структуровані за ПМЗ-процесом і містять кварцовий пісок, плакований 0,5...3,0% (за масою, понад 100% піску) рідким склом, та після вібраційного ущільнення має уявну щільність від 1380 до 1758 $кг/м^3$, відносно алюмінієвого сплаву і сірого чавуну, встановлено інтегрально-ефективні значення їх теплофізичних властивостей.

Виходячи з того, що затверділе (частково дегідратоване) рідке скло поглинає вологу з повітря та карбонізується на повітрі, що суттєво змінює його властивості, дослідили процес карбонізації частково дегідратованого рідкого скла. За результатами дослідження кінетики карбонізації частково дегідратованого рідкого скла в тонкому шарі на повітрі встановлено, що інтенсивність карбонізації рідкого скла при нормальній температурі, зростає зі збільшенням відносної вологості повітря. Тому, зберігання кварцового піску, плакованого рідким склом, слід проводити в тарі, що герметично

закривається, з використанням наважки їдкого натру або в закритій тарі впродовж не більше 1 доби.

Робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, що містять від 0,5% до 2,5% (за масою, понад 100% піску) рідкого скла, зі збільшенням температури їх попереднього нагріву від 800 до 1100 °С, знижується з 185…15 Дж до 0, а водостійкість близька до абсолютної. Така закономірність дозволяє ці суміші легко видаляти з виливків ударно-вібраційними способами. В той же час, вибивання стрижнів, у яких після контакту з залитим в ливарну форму розплавом температура не перевищила 600 °С, рекомендовано здійснювати шляхом занурення виливків у воду.

Встановлено, що характер механічного руйнування піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, не залежить від вмісту рідкого скла, яке пішло на плакування кварцового піску, але залежить від тривалості ПМЗ-процесу, зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного (до 2 хв) до змішаного (2...4 хв) і когезійного (понад 4 хв).

Встановлено причини та розроблено опис механізмів виникнення таких дефектів, як вимоїна та внутрішня тріщина, притаманні виключно ливарним формам та стрижням з піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом. Для попередження появи внутрішніх тріщин в ливарних формах та стрижнях, структурування їх піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом треба проводити в безперервному режимі обробки мікрохвильовим випромінюванням. Поверхневий дефект вимоїна є наслідком конденсації водяної пари з водяного заряду на «холодних» робочих поверхнях модельно-стрижневого оснащення під час мікрохвильової обробки піщано-рідкоскляної суміші, що зумовлює застосування відповідних відомих технологічних заходів для запобігання появі даного дефекту.

Пригар на виливках носить термічний характер і, за винятком виливків з чавуну, відноситься до легковидаляємого ударно-механічними способами.

Досліджено, що ступінь точності поверхні виливків з бронзи, сталі та чавуну, отриманих в піщано-рідкоскляних ливарних формах, що виготовлені

за ПМЗ-процесом за вказаними вище рекомендаціями, відповідає 7...10 класу, а алюмінієвих сплавів – 5...14 класу відповідно до ДСТУ 8981:2020.

Результати роботи пройшли позитивне промислове випробування на ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир), впроваджені в ливарних цехах ТОВ «ПК «Перспектива» (м. Дніпро), ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) та в учбовий процес Національної металургійної академії України (м. Дніпро).

Ключові слова: рідке скло, силікат натрію, кварцовий пісок, суміш, структурування, ПМЗ-процес, форма, стрижень, кінетика, мікрохвильове випромінювання, властивості, виливок

SUMMARY

Solonenko L.I. Theoretical and technological basis of sand-sodium-silicate mixtures steam-microwave structuring for making castings. – Qualification scientific work. – Manuscript.

Dissertation on competition of doctor of technical sciences scientific degree with specialty 05.16.04 – Foundry production. – Ukrainian State University of Science and Technologies. Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2023.

Dissertation presents theoretical and technological generalizations in solving the scientific and technical problem of environmentally friendly molds and rods from sand-sodium-silicate mixture, structured by SMS-process, creating for castings of general engineering purposes, by properties formation regularities and kinetics of mixture structuring determining, its composition optimization and research results realization in production, which leads to environmental safety and production sanitary conditions increasing, cycle and energy consumption of casting process reducing, their quality improving and, accordingly, their cost lowering.

According to analysis results of scientific, technical and patent literature, actual conditions of current castings production in foundries in Ukraine, known industrial methods, binder materials and castings quality for general machine-building purposes, it has been established that the work aimed at scientific and technological bases

developing of sand-sodium-silicate mixtures structuring in steam-microwave environment in order to establish mechanism, kinetics and regularities of structuring in steam-microwave medium of loose quartz sand clad with sodium silicate solute, and result of this application on casting molds and rods properties, small castings for general machine-building purposes quality, is relevant.

Standard methods, techniques and equipment, generally accepted and original methods have been used in dissertation, which made it possible to establish an objective relationship between parameters of investigated processes. Theoretical and experimental studies have been based on fundamental principles of physics, thermos-physics, heat and mass transfer, mechanics of materials destruction. Experimental data have been processed by mathematical statistics methods, visual measurement control, comparison and analysis.

Microwave radiation real power generated in microwave furnace with standing wave at radiation frequency of 2.45 GHz and nominal magnetron power of 700...1200 W on rotary table axis in resonator is χ=0.40...0.72 of microwave furnace magnetron nominal power and with distance from it decreases according to static law and reaches χ=0.29...0.36 at distance of more than ~60 mm. At the same time, heated material temperature rise rating is directly proportional to its relative dielectric permeability, which (for minerals) depends exclusively on its chemical composition. It has been established that for materials with total value of $\varepsilon \leq 10$, with accuracy acceptable for engineering calculations, it can be determined by additivity rule based on elemental substances (oxides) mass content in them and values of their individual dielectric permeability.

According to silicon silicate solute in flat capillary under the action of microwave radiation developed description of mass transfer mechanism, its transfer in capillary takes place as result of multiply repeated stages of sodium silicate solute capsules formation and destruction according to scheme similar to chain reaction, which is important for structured SSSM with sodium silicate solute in microwave radiation gluing technology realization.

Mechanism description of sand-sodium-silicate mixture structuring according

to SMS-process has been developed, where sodium silicate solute cuffs are result of multi-stage process: water steam from water charge condensation on clad surface of sand-sodium-silicate mixture sand grains; silicon silicate solute dissolution and hydration in condensate clad layers; sodium silicate solute foaming, which is saturated with water; partial water evaporation from foamed sodium silicate solute; sodium silicate solute foam subsiding and its film flowing along sand grains surfaces to the points of their contact with each other under the action of capillary forces with final sodium silicate solute dehydration in cuffs. According to sand-sodium-silicate mixture, structuring by SMS-process, determined kinetics results, it has been established that during SMS-process, water releasing from structuring sand-sodium-silicate mixture realizes in three stages: first stage is at ~100 °C; second is at 109...118 °C; third is at 119...128 °C. At the same time sodium silicate solute transferring in SSSM, passes by following mechanisms:

– at 109...118 °C sodium silicate solute transferring passes by its foaming, which occurs due to intensive water evaporation from it, with activation energy value of E_K = 23,9 kJ/mol;

– at 119...128 °C sodium silicate solute transferring passes by its viscous flowing with activation energy value of E_K = 49,3 kJ/mol.

As per material balance, it has been determined that for sand-sodium-silicate mixture structuring using SMS process, it is advisable to use quartz sand with average grain size of 0,16...0,25 mm and clay content of up to 0,1% (by mass), which is clad with 0,5...2,5% (by mass, over 100% sand) sodium silicate solute, which. That, with water charge mass of 1 g, allows, accordingly, to structure from 2400 to 500 g mixture within 8...4 min. At the same time, structured sand-sodium-silicate mixture, as per SMS-process, mass increases with sodium silicate solute, used for sand cladding, mass decreasing, and, according to square root law, with structuring time increasing.

According to optimization results, it has been determined that for molds and rods production from sand-sodium-silicate mixture by SMS-process optimal is dry quartz sand clad with sodium silicate solute which passed through sieve with cell of

0,315 mm and has sodium silicate solute content (M_{SiO2} = 2,8…3,0; ρ_2=1,42….1,44 g/cm^3) in amount of 1,5% (by mass, over 100% sand). Optimized composition using will provide for structured sand-sodium-silicate mixtures the following level of properties: compressive strength – 2,9...3,0 MPa, crushability – 0.26…0,30%, gas permeability – 150…155 units, gas-generating capacity – 3…5 cm^3/g, knockout work – 92…100 J, imaginary density – 1720…1730 kg/m^3, deflection beam – 0.3%, for Al+8,5%Mg alloy b_2=803W·sec^{0,5}/(m^2·grad), for gray cast iron SCh200 b_2 = 1036 W·sec^{0,5}/(m^2·grad), which meets the actual requirements for foundry molds and rods. At the same time, sand-sodium-silicate mixture made from quartz sand and structured by SMS-process, clad with the same sodium silicate solute in amount of 2,5% and conglomerate size of 0,315...0,63 mm, relative to mentioned above SSSM, can be used in foundry molds as heat-insulator.

Existence and type of functional dependences between crushability, brittleness, strength, castings knocking out work from molds and rods in foundry and number of parameters and properties for structured molding and rod mixtures, which are subject of determination on samples according to standard and generally accepted methods, have been established. For sand-sodium-silicate mixtures, which are structured according to SMS-process and contain quartz sand, clad with 0,5...3,0% (by mass, over 100% sand) sodium silicate solute, and after vibration compaction have an apparent density from 1380 to 1758 kg/m^3, relatively to aluminum alloy and gray cast iron, integral effective values of their thermo-physical properties have been established.

Based on the fact that solidified (partially dehydrated) sodium silicate solute absorbs moisture from air and carbonizes in air, which significantly changes its properties, carbonization process of partially dehydrated sodium silicate solute has been investigated. According to partially dehydrated sodium silicate solute in a thin layer in air carbonation kinetics study results, it has been established that intensity of sodium silicate solute carbonation at normal temperature increases with air relative humidity increasing. In this case, quartz sand clad with sodium

silicate solute storage should be carried out in hermetically sealed container, using caustic soda measure, or in closed container for no more than 1 day.

Sand-sodium-silicate mixture structured according to SMS-process, containing sodium silicate solute from 0,5% to 2,5% (by mass, over 100% sand), knock out work with preheating temperature increasing from 800 to 1100 °C decreases from 185...15 J to 0 and water resistance is close to absolute. Such regularity allows these mixtures to be easily removed from castings by shock-vibration methods. At the same time, it is recommended to knock out rods, whose temperature did not exceed 600 °C after contact with melt poured into the mold, by immersing castings in water.

It has been established that the nature of sand-sodium-silicate mixture, structured according to SMS-process, mechanical destruction does not depend on sodium silicate solute content, which was used for quartz sand cladding, but depends on SMS-process duration, which changes from adhesive (up to 2 min) to mixed (2...4 min) and cohesive (more than 4 min).

Such defects as leakage and internal crack, inherent exclusively in sand-sodium-silicate mixture foundry molds and rods, structured by SMS-process, occurrence mechanisms causes and description have been established. In order to prevent internal cracks in casting molds and rods, structuring of their sand-sodium-silicate mixture according to SMS-process, appearance should be carried out in continuous microwave radiation treatment mode. Surface defect leakage is consequence of water steam from water charge on mold-rod equipment «cold» working surfaces condensation during microwave treatment of sand-sodium-silicate mixture, which requires application of appropriate known technological methods to prevent this defect appearance.

Burn on castings is thermal in nature and, with exception of cast iron made castings, belongs to easily removed by knock-mechanical methods.

It has been established that surface accuracy degree of bronze, steel and cast iron castings obtained in sand-sodium-silicate casting molds, manufactured by

SMS-process according to above recommendations, corresponds to class 7...10, and to aluminum alloys to 5...14 class in accordance with DSTU 8981:2020.

Results of this work passed positive industrial test at PE "BUD-MASH" (Zhytomyr), were implemented in foundries of LLC "PC"Perspektiva" (Dnipro), PJSC "Odesa Machine-Building Plant" (Odesa) and in educational process of National Metallurgical Academy of Ukraine.

Keywords: sodium silicate solute, sodium silicate, quartz sand, mixture, structuring, SMS-process, mold, rod, kinetics, microwave radiation, properties, casting

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science

1. ***Solonenko L.I.***, Bilyi O.P., Repiakh S.I., Kimstach T.V., Uzlov K.I. Heating rate of granular inorganic materials by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 2. Pp. 37-41. https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/037

2. ***Solonenko L.I.***, Usenko R.V., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Repiakh S.I. Carbonization and crushability of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 5. Pp. 40-46. https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-5/040

3. ***Solonenko L.I.***, Usenko R.V., Dziubina A.V.,Uzlov K.I., Repiakh S.I. Sodium silicate solute foaming in a flat slot-type capillary under microwave radiation influence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. Pp. 34-40. https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/034

4. ***Solonenko L.I.***, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Kimstach T.V., Bilyi O.P. Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №1. Pp. 68-77. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/068

5. ***Solonenko L.I.***, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Bilyi O.P., Kimstach T.V. Water resistance of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 4. Pp. 41-46. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/041

6. ***Solonenko L.I.***, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Abramov S.O. Sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment effective values of thermo-physical properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 6. Pp. 66-71. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/066

7. Liutyi R.V., ***Solonenko L.I.***, Osipenko I.O., Fedorov M.M., Morozov B.I. Physicochemical structure features of refractory compositions with inorganic binders. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. T. 23. № 3. Pp. 612-619. https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.612-619

8. Ponomarenko O., Yevtushenko N., Lysenko T., ***Solonenko L.***, Shynsky V. A new technology for producing the polystyrene foam molds including implants at foundry industry. *Lecture notes in mechanical engineering. DSMIE 2019*. 2019. Pp. 430-437. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_43

Статті у фахових виданнях:

9. ***Солоненко Л.И.*** Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения. *Металл и литье Украины*. 2020. №1 (320). С. 69-78. https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.069

10. ***Солоненко Л.І.***, Реп’ях С.І., Узлов К.І. Кінетика структурування піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням. *Теорія і практика металургії*. 2019. №4. С. 44-56. https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.07

11. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Усенко Р.В. Міцність піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2019. №6. С. 41-48. https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.06

12. ***Солоненко Л.І***., Реп´ях С.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Узлов К.І. Властивості і структури компонентів піщано-рідкоскляних формувальних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 1. С. 81-92. https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.11

13. ***Solonenko L.***, Prokopovitch I., Repyakh S., Sukhoi K., Dmytrenko D. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles*. 2019. № 1 (57). Pp. 90-98. https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.11

14. Осипенко І.О., ***Солоненко Л.І.***, Білий О.П. Системне використання пилу техногенного походження у складі фосфатних холоднотвердіючих сумішей. *Системные технологии*. 2018. № 5 (118). С. 97-104. https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/41

15. ***Солоненко Л.І.***, Білий О.П., Узлов К.І. Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 93-100. https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.12

16. ***Solonenko L.***, Repyakh S., Uzlov K., Kimstach T. Crushing character of sand-sodium-silicate mixtures structured by steam-microwave treatment. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles*. 2020. № 3 (62). Pp. 5-13. https://doi.org/10.15276/opu.3.62.2020.01

17. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І. Міцність піщано-рідкоскляних сумішей, що структурували паро-мікрохвильовою обробкою. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 3. С. 39-47. https://doi.org/10.34185/0543-5749.2020-3-39-47

18. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І. Випаровування малих мас води при їх обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №1. С. 57-67. https://doi.org/10.34185/0543-5749.2021-1-57-67

19. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей. *Метал та лиття України*. 2021. №1 (324). С. 38-45. https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.038

20. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І. Оптимізація зернового складу піщано-

рідкоскляних сумішей для структурування способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 28-38. https://doi.org/10.34185/tpm.1.2021.05

21. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І. Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2021. №2 (325). С. 52-59. https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.052

22. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В. Вибиваємість з виливків піщано-рідкоскляних сумішей, структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 37-45. https://doi.org/10.34185/tpm.1.2021.05

23. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Білий А.П., Іванова Л.Х. Прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Теорія і практика металургії*. 2021. №5. С. 70-77. https://doi.org/10.34185/tpm.5.2021.08

24. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих паро-мікрохвильовим затвердінням, на пригар і шорсткість поверхні виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №3 (326). С. 50-61. https://doi.org/10.15407/steelcast2021.03.050

25. ***Солоненко Л.І.*** Газотворність піщано-рідкоскляних формувально-стрижневих сумішей. *Процеси лиття*. 2021. №3 (145). С. 44-52. https://doi.org/10.15407/plit2021.03.044

26. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Іванова Л.Х. Склеювання рідким склом структурованих піщано-рідкоскляних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2021. №3. С. 48-55. https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.07

27. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних формувально-стрижневих сумішей, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння, на якість дрібних виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №4 (327). С. 64-74. https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.067

28. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І. Структурування формувальних та стрижневих сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №2. С. 23-31. https://doi.org/10.34185/0543-5749.2021-2-23-31

29. ***Солоненко Л.І.*** Деякі особливості процесу структурування піщано-рідкоскляної суміші у паро-мікрохвильовому середовищі. *Процеси лиття*. 2022. №1. С. 57-66. https://doi.org/10.15407/plit2022.01.057

30. ***Солоненко Л.І.*** Вимоїни на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2022. № 1. С. 54-61. https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.054

31. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Карпова Т.П. Характер механічного руйнування піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані у паро-мікрохвильовому средовищі. *Теорія і практика металургії*. 2022. №1. С. 43-49. https://doi.org/10.34185/tpm.1.2022.06

32. ***Солоненко Л.І,*** Реп′ях С.І., Узлов К.І., Мазорчук В.Ф. Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків і якість їх поверхні. *Метал та лиття України*. 2022. № 2. С. 59-71. https://doi.org/10.15407/steelcast2022.02.059

Патент на винахід:

33. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № a 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7 с.

34. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 123068 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № a 201901348; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.02.2021, Бюл. № 6. 3 с.

35. Спосіб виготовлення ливарних форм за одноразовими замороженими моделями: пат. 125146 Україна: МПК B22C 9/04, 9/02, 7/02. № a 201910047; заявл. 27.09.2019; опубл. 19.01.2022, Бюл. № 3. 6 с.

Патент на корисну модель:

36. Спосіб виготовлення комбінованої ливарної форми із сухої суміші: пат.

149146 Україна: МПК B22C 9/12. № u 202102879; заявл. 31.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42. 4 с.

Тези доповідей міжнародних науково-технічних
та науково-практичних конференцій:

37. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И., Усенко Р.В., Баца И.В. Технологические добавки в песчано-жидкостекольных смесях. *Topical issues of the development of modern science: Abstracts of II International Scientific and Practical Conference (Sofia, 16-18 October. 2019)*. Sofia, 2019. Pp. 62-68.

38. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Осыпаемость жидкостекольных форм и стержней. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 178-179.

39. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Работа выбивки песчано-жидкостекольных стержневых смесей из отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 173-177.

40. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Хрупкость структурированных смесей литейных форм и стержней. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня. 2019)*. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С. 192-194.

41. ***Солоненко Л.И***., Усенко Р.В., Репях С.И. Связующие материалы неорганического происхождения, отверждаемые физическими способами. *Science and society*: *12th International conference (Canada, June 7. 2019)*. Canada 2019. Pp. 18-22.

42. ***Солоненко Л.И.***, Усенко Р.В., Белый А.П., Репях С.И. Характеристика некоторых способов литья и смесей одноразовых форм и стержней для отливок массой до 300 кг. *Perspectives of worlds cience and education*: *Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (Osaka, 2-4 October. 2019)*. Osaka, 2019. Pp. 202-210.

43. ***Солоненко Л.И***., Репях С.И. Оценка реального уровня мощности СВЧ-

излучения в рабочей камере СВЧ-печи. *Priority directions of science development*: *Abstracts of International Scientific and Practical Conference (Lviv, 28-29 October. 2019)*. Lviv, 2019. Pp. 122-125.

44. ***Солоненок Л.І.***, Реп'ях С.І. Матеріальний баланс системи «водяна пара-пористе тіло» при атмосферному тиску. *Advance of science*: *Proceeding of Articles the International Scientific Conference (Czech Republic, 5 April. 2019)*. Czech Republic, 2019. Pp. 27-30.

45. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Влияние СВЧ-излучения на распределение влаги в песке, находящемся в емкости трубчатого типа. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня. 2019)*. Запоріжжя, 2019. С. 190-192.

46. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И., Усенко Р.В., Бежанова А.Н. Склеивание безопочных полуформ для производства бесстержневых отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 28-29 квітня. 2020)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 114-116.

47. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И., Белый А.П., Гуцу Т.А. Расчет минимально-допустимой прочности клеевых соединений литейных стержней. *Литво. Металургія. 2020*: *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, АА Тандем, 2020. С. 140-142.

48. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І., Білий О.П., В'юнник І.В. Масоперенос силікату натрію в капілярах щілинного типу. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2021 р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 165-167.

49. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І. Структурування плакованого кварцового піску паро-мікрохвильовим затвердінням. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2021 р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 168-169.

50. ***Солоненко Л.І.***, Реп′ях С.І., Усенко Р.В., Кириченко Р.Д. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням по заморожених піщано-водяних моделях. *Литво. Металургія. 2021*: *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (18-20 вересня 2021 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, АА Тандем, 2021. С. 190-192.

51. ***Солоненко Л.І.***, Узлов К.І., Реп′ях С.І. Новий спосіб виготовлення форм та стрижнів для виробництва виливків залізничного транспорту. *Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.*: *матеріали 81 Міжнарод. наук.-практ. конф., 22–23 квіт. 2021 р. Дніпров. нац. ун-т. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2021. С. 233-235.

52. ***Солоненко Л.І***., Реп′ях С.І., Мазорчук В.Д. Тривалість нагріву та випаровування води з парних наважок масою до 100 г мікрохвильовим випромінюванням. *The 3 rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7, 2021).*SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. С. 301-305.

53. ***Солоненко Л.І***., Реп′ях С.І. Вплив розмірів наважок води на обертовому столі мікрохвильової печі на тривалість їх випаровування. *The 3 rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7, 2021).*SSPGPublish, Stockholm, Sweden. 2021. С.296-300.

54. ***Солоненко Л.І.*** Нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі у присутності матеріалів різної природи. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 176-179.

55. ***Солоненко Л.І.*** Дослідження можливості структурування піщано-рідкоскляної суміші у мікрохвильовому випромінювання. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 171-172.

56. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І. Уявна енергія активації рідкого скла на

плакованому піску в паро-мікрохвильовому середовищі. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 164-170.

57. ***Солоненко Л.І.*** Досліджування спінювання рідкого скла під дією мікрохвильового випромінювання в структурованій піщано-рідкоскляній суміші. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 173-175.

58. ***Солоненко Л.І.*** Структурування піщано-рідкоскляних сумішей мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 127-131.

59. ***Солоненко Л.І***. Нагрівання діелектричних матеріалів мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 131-135.

60. ***Солоненко Л.І.*** Спінювання силікату натрію плакованого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 139-138.

ЗМІСТ стор

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ……..……..27

ВСТУП……...30

РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАЛЬНІ ТА СТРИЖНЕВІ СУМІШІ. СУЧАСНІ СПОСОБИ СТРУКТУРУВАННЯ СУМІШЕЙ ОДНОРАЗОВИХ ЛИВАРНИХ ФОРМ ТА СТРИЖНІВ……..39

1.1 Сучасні формувальні та стрижневі суміші з неорганічними сполучними матеріалами та безсполучні піщані ливарні форми…….43

1.2 Вимоги до сучасних формувальних та стрижневих сумішей, ливарних форм та стрижнів……...……..48

1.3 Сучасні способи структурування піщано-рідкоскляних сумішей…..56

1.3.1 Структурування піщано-рідкоскляних сумішей дегідратацією рідкого скла……...59

1.3.2 Структурування піщано-рідкоскляних сумішей шляхом зміни силікатного модуля рідкого скла……...62

1.4 Модифікування рідкого скла та технологічні добавки до піщано-рідкоскляних сумішей…….66

1.5 Мікрохвильова сушка……72

1.5.1 Мікрохвильове випромінювання. Мікрохвильові печі…….73

1.5.2 Нагрівання тіл в полі мікрохвильового випромінювання……74

1.5.3 Властивості піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані мікрохвильовим випромінюванням……78

1.5.4 Механізм поризації (спінювання) рідкого скла…….……86

1.6 Теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей……..90

1.7 Кінетика сушіння капілярно-пористих тіл……93

1.8 Дефекти та загальні недоліки ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей……...……98

1.9 Мета та завдання досліджень……...101

1.10 Висновки……..103

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ, ПРИБОРИ, ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ……...105
2.1 Матеріали……...105
2.2 Обладнання, прибори, вимірювальний інструмент……...106
2.3 Плакування кварцового піску рідким склом……..108
2.4 Стандартні методи і методики досліджень…….…108
2.5 Загальноприйняті та відомі методи і методики досліджень……..…108
2.5.1 Сипкість чистого та плакованого рідким склом кварцового піску……..108
2.5.2 Класифікація піску за вмістом в ньому води, визначення уявної щільності та фракційного складу піску…….....109
2.5.3 Робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей……..110
2.5.4 Оптимізація складу піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за способом паро-мікрохвильового затвердіння…….110
2.5.5 Стріла прогину зразків з піщано-рідкоскляних сумішей…...112
2.5.6 Газотвірна здатність, вологість, вміст води в піщано-рідкоскляних сумішах, кварцовому піску та рідкому склі…….….113
2.5.7 Теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей….114
2.5.8 Лінійне розширення чистого та плакованого рідким склом кварцового піску, коефіцієнт термічного лінійного розширення зразків гіпсу та поліпропілену……..117
2.5.9 Шорсткість литих поверхонь та пригару на виливках……...118
2.5.10 Матеріалізація поля мікрохвильового випромінювання в резонаторі…….….120
2.6 Оригінальні методики досліджень……..…….....…….…120
2.6.1 Швидкість підвищення температури сипких матеріалів при їх нагріванні мікрохвильовим випромінюванням……120
2.6.2 Залишкова волога у рідкому склі після його обробки мікрохвильовим випромінюванням……..123

2.6.3 Кінетика сушіння кварцового піку та його сумішей мікрохвильовим випромінюванням……..123
2.6.4 Газотвірна здатність піщано-рідкоскляних сумішей…….124
2.6.5 Водостійкість структурованих піщано-рідкоскляних сумішей……126
2.6.6 Кінетика карбонізації шару рідкого скла на повітрі……..…128
2.6.7 Встановлення причин виникнення дефекту «вимоїна» на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях…….129
2.6.8 Шорсткість поверхні виливків……130
2.6.9 Оцінювання якості литої поверхні……...131
2.6.10 Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей……..……133
2.7 Статистичні методи обробки експериментальних даних……..133
2.8 Висновки…..……135
РОЗДІЛ 3. НАГРІВАННЯ ТВЕРДИХ ТА РІДКИХ МАТЕРІАЛІВ В ОБЛАСТІ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ…….136
3.1 Діелектрична проникність зернистих вогнетривких матеріалів...…137
3.2 Розподіл пучностей мікрохвильового випромінювання в резонаторі мікрохвильової печі……...142
3.3 Вплив положення наважок води на обертовому столі і їх маси на час випаровування під дією мікрохвильового випромінювання……..150
3.4 Випаровування малих мас води при їх обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання……..154
3.5 Нагрівання та випаровування води з парних наважок масою до 100 г мікрохвильовим випромінюванням……163
3.6 Нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі у присутності матеріалів різної природи……..166
3.7 Висновки……171

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРУКТУРУВАННЯ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ТА ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ……..173

4.1 Взаємозв'язок між властивостями чистого та плакованого рідким склом кварцового піску і його фракційним складом……..175

4.2 Вплив маси та характеру розміщення водяних зарядів в робочому просторі оснащення на міцність піщано-рідкоскляної суміші, що структурована в паро-мікрохвильовому середовищі……...181

4.3 Вплив мікрохвильового випромінювання на залишковій вміст води в силікаті натрію та в піщано-рідкоскляній суміші……189

4.4 Дослідження переносу рідкого скла в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання……193

4.5 Кінетика сушіння кварцового піску та його сумішей мікрохвильовим випромінюванням……..200

4.5.1 Кінетика сушіння кварцового піску з водою……..…202

4.5.2 Кінетика сушіння кварцового піску при наявності в ньому водяного заряду…….205

4.5.3 Кінетика сушіння суміші кварцового піску з рідким склом….207

4.5.4 Кінетика структурування кварцового піску, плакованого рідким склом з ~20% гідратної води, з водяним зарядом в мікрохвильовому випромінюванні……...……209

4.5.5 Кінетика структурування плакованого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі……211

4.6. Матеріальний баланс системи «водяна пара – пористе тіло» при атмосферному тиску……....219

4.7 Матеріальний баланс системи «водяна пара – кварцовий пісок – рідке скло» при структуруванні в паро-мікрохвильовому середовищі……..222

4.8 Опис механізму структурування плакованого рідким склом сипучого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі …….225

4.9 Висновки……237
РОЗДІЛ 5. ВЛАСТИВОСТІ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ, ЩО СТРУКТУРОВАНІ ЗА СПОСОБОМ ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО ЗАТВЕРДІННЯ, ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЇХ СТРУКТУРУВАННЯ……240
5.1 Газотвірна здатність піщано-рідкоскляних сумішей після сушки мікрохвильовим випромінюванням та структурування в паро-мікрохвильовому середовищі……..…...240
5.2 Робота вибивання та водостійкість піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі……245
5.3 Дослідження структур піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі, та характер їх руйнування при зовнішньому механічному впливі……255
5.4 Оптимізація складу піщано-рідкоскляної суміші, структурованої в паро-мікрохвильовому середовищі……269
5.5 Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей……...275
5.6 Визначення теплофізичних властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння……..……287
5.7 Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру і якість виливків……295
5.8 Висновки……304
РОЗДІЛ 6. ПРОМИСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ ЛИВАРНИХ ФОРМ ТА СТРИЖНІВ З ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ, ЩО СТРУКТУРОВАНІ ЗА СПОСОБОМ ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО ЗАТВЕРДІННЯ, ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ…….……307
6.1 Тривалість та умови зберігання плакованого піску на повітрі…….307
6.2 Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі……317

6.3 Вимоїни на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі…….……325
6.4 Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння, на структуру, пригар та на шорсткість поверхні виливків……....332
6.5 Склеювання форм і стрижнів під дією мікрохвильового випромінювання……..342
6.6 Виготовлення ливарних форм за способом паро-мікрохвильового затвердіння за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей….349
6.7 Порівняльна оцінка якості виливків, виготовлених із піщано-рідкоскляної суміші за CO_2-процесом і за способом паро-мікрохвильового затвердіння…….355
6.8 Висновки……361
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..…364
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...369
ДОДАТОК А……...411
ДОДАТОК Б……...419
ДОДАТОК В……...……420
ДОДАТОК Г……...421
ДОДАТОК Д……...423
ДОДАТОК Е……...424
ДОДАТОК Ж……...…...426
ДОДАТОК З……...….....429
ДОДАТОК І……...……...….....431
ДОДАТОК К…...……...….....433
ДОДАТОК Л…...……...….....439
ДОДАТОК М…...……...….....443
ДОДАТОК Н…...……...….....446
ДОДАТОК О…...……...….....447

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ФСС – формувальні та стрижневі суміші;

ТД – технологічна добавка;

РС – рідке скло;

ЛГМ – лиття по газифікованим моделям;

ХТС – холоднотвердіюча суміш;

ЛФС – ливарні форми та стрижні;

ПГС – піщано-глиниста суміш;

НТС – низькотемпературна суміш;

ПРС – піщано-рідкоскляна суміш;

РСС – рідкорухлива самотвердіюча суміш;

ПСС – пластична самотвердіюча суміш;

ПЦС – піщано-цементна суміш;

ГС – гіпсова суміш;

МФС – металофосфатна суміш;

ХТ-МФС – холоднотвердіюча металофосфатна суміш;

ГТ-МФС – металофосфатна суміш гарячого твердіння;

КС – кремнезольна суміш;

СН – силікат натрію;

ФХШ – ферохромовий шлак;

НШ – нефеліновий шлам;

КЛР– коефіцієнт лінійного розширення;

ПАР – поверхнево-активна речовина;

ПВС – полівініловий спирт;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ІОК – інформаційно-обчислювальний комплекс;

ВЗ – водяний заряд;

НВП – насичена водяна пара;

Г – газотвірна здатність;

Вл – вологість;

К – газопроникність;

σ – міцність;

Ос – обсипальність;

А – робота вибивання;

ρ – щільність;

Хр – крихкість;

V – об’єм;

S – площа;

D, d – діаметр;

R, r – радіус;

h, l – висота, довжина;

T, t – температура;

M, m – маса;

P, p – тиск;

τ – час;

a – робота одного удару копра;

n – кількість;

П – відносний об'єм пористості суміші;

M_{SIO2} – силікатний модуль;

F – відносна величина стріли прогину до руйнування;

R – кислотний залишок;

R' – спиртовий радикал;

λ – довжина хвилі мікрохвильового випромінювання;

ε' – дійсна діелектрична проникність;

ε'' – уявна діелектрична проникність;

j – уявна одиниця;

$E_П$ – уявна енергія активації;

c – питома теплоємність;

λ – теплопровідність;

a – температуропровідність;

b – теплоакумулююча здатність;

δ – товщина стінки;

N – число Авогадро;

μ – дипольний момент молекули;

k – стала Больцмана;

L – питома теплота;

P_M – номінальна потужність магнетрона мікрохвильової печі;

E – вектор напруженості електромагнітного поля;

f – частота електромагнітного поля;

φ – масова частка;

F_h – співвідношення реального і теоретичного часу нагрівання і випаровування води;

F_τ – відносна одиниця часу випаровування води з наважки;

F_p – коефіцієнт, що враховує зниження питомої потужності магнетрона в і-тій точці резонатора мікрохвильової печі;

p – питома потужність;

w – швидкість нагрівання;

W – масова швидкість випаровування води;

ζ – коефіцієнт щодо реальної потужності мікрохвильового випромінювання;

F – поправочний коефіцієнт;

Q – кількість теплоти;

I – число імпульсів;

ε – стріла прогину;

E − модуль пружності;

t_L – температура ліквідус;

t_S – температура солідус;

X – глибина проникнення тепла;

H – металостатичний тиск;

Δ – відносне лінійне розширення;

W_B – відносна вологість;

ХК, ХА, ВМ – хромель-капелева, хромель-алюмелева та вольфрам-молібденова термопара відповідно.

ВСТУП

Актуальність теми. Близько 90% ливарних цехів західної Європи і більше 30% ливарних цехів України для виготовлення ливарних форм і стрижнів використовують одноразові піщано-смоляні суміші. За даними журналу Modern Casting при світовому випуску 100 млн. т лиття на рік близько 80 млн. т – це лиття зі сплавів на основі заліза і міді і близько 15 млн. т – лиття з алюмінієвих сплавів. Така структура випуску лиття вимагає щорічного споживання синтетичних смол більше 1 млн. т і, відповідно, призводить до викиду в навколишнє середовище більше 1000 т на рік фенолу, формальдегіду, фурфурілового спирту і ряду інших канцерогенних і отруйних речовин. З цієї причини в ряді країн Європи, виходячи зі стратегії «раннього залучення» щодо ініціатив Європейської Комісії «Європейський зелений курс», вже з 2000 року введені знижені норми на подібні викиди. В Європі цього досягають за рахунок використання в ливарних цехах відповідних систем уловлювання, переробки та утилізації газоподібних продуктів, що виділяються в результаті випаровування, деструкції та горіння синтетичних смол. В ливарних цехах України такі системи відсутні, а їх використання приведе до значного підвищення собівартості литва та втрати його конкурентної здатності – тобто, практично, до зупинки ливарних цехів.

Вирішенням даної проблеми є заміна синтетичних смол на рідке скло. На відміну від синтетичних смол рідке скло дешеве, має вітчизняне походження та великотоннажне виробництво, хімічно і фізично твердіє, характеризується стабільністю властивостей у часі і прогнозованістю результатів використання, простотою зберігання і застосування, екологічною та санітарно-гігієнічною безпекою на всіх етапах його використання.

Тим не менше, на сьогодні використання натрієвого рідкого скла для ливарних форм та стрижнів обмежено через значні витрати енергії на їх теплову сушку і вибивання, регенерацію, підвищену гігроскопічність і обсипальність, крихкість, схильність до утворення пригару тощо.

Питанням вивчення властивостей піщано-рідкоскляних сумішей

присвячені роботи багатьох вчених і дослідників, в числі яких С.С. Жуковський, Д.М. Кукуй, А.М. Лясс, С.П. Дорошенко, П.А. Борсук, З.Я. Іткіс, Ю.П. Васін та ін. Незважаючи на це, на сьогодні немає комплексного вирішення низки зазначених вище проблем щодо використання рідкого скла у виробництві ливарних форм та стрижнів.

Комплексним вирішенням більшості зазначених проблем піщано-рідкоскляних сумішей може бути їх структурування паро-мікрохвильовим затвердінням (ПМЗ-процес). Проте, на сьогодні відсутні дані про кінетику та механізм їх структурування, про властивості таких сумішей та умови реалізації процесу, про вплив форм та стрижнів на якість виливків та ін. Тому робота, яка присвячена вирішенню проблеми по розробці наукових і технологічних основ виготовлення піщано-рідкоскляних ливарних форм і стрижнів за ПМЗ-процесом замість сумішей з сполучними матеріалами органічного походження, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов’язана з тематичними планами Українського державного університету науки і технологій та виконанням держбюджетної науково-дослідної роботи (тема: «Розробка інноваційної технології структурування екологічно безпечних формувально-стрижневих сумішей ливарного виробництва у паро-мікрохвильовому середовищі» (№ ДР 012U109531).

Мета і завдання дисертаційної роботи. Мета роботи – встановлення механізму, кінетики та закономірностей структурування в паро-мікрохвильовому середовищі сипучого кварцового піску, плакованого рідким склом, і результату його застосування на властивості ливарних форм та стрижнів, якість дрібних виливків загальномашинобудівного призначення.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

1. Встановити кінетику, визначити енергію активації і розробити опис механізму структурування кварцового піску плакованого силікатом натрію в середовищі водяної пари під дією мікрохвильового випромінювання.

2. Скласти матеріальний баланс та визначити допустимі температурні, часові і розмірно-масові межі структурування за способом ПМЗ.

3. Визначити раціональний рівень параметрів процесу структурування

піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом та оптимізувати її склад.

4. Одержати функціональні залежності між рядом параметрів і властивостями піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом.

5. Дослідити та розробити опис механізму переносу рідкого скла та його дегідратації в капілярному каналі під дією мікрохвильового випромінювання.

6. Для шару плівкового типу з рідкого скла в умовах одностороннього контакту з повітрям встановити кінетику його карбонізації.

7. Встановити теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, та можливість їх використання в якості теплоізоляційного матеріалу при виробництві виливків

8. Визначити особливості нагрівання матеріалів та випаровування води в резонаторі мікрохвильової печі, що має номінальну потужність магнетрону від 700 до 1200 Вт та частоту випромінювання 2,45 ГГц.

9. Встановити особливості та визначити роботу видалення з виливків стрижнів з піщано-рідкоскляної суміші, що структуровані за ПМЗ-процесом.

10. Дослідити механізм руйнування піщано-рідкоскляних сумішей структурованих за ПМЗ-процесом, та вплив ливарних форм з цих сумішей на якість виливків.

11. Дослідити можливість склеювання структурованих піщано-рідкоскляних сумішей під дією мікрохвильового випромінювання.

12. Встановити можливість виготовлення об'ємно-замкнутих ливарних форм за ПМЗ-процесом за одноразовими моделями.

13. Встановити причини та розробити опис механізмів виникнення дефектів, притаманних стрижням з піщано-рідкоскляної суміші, що структурують за ПМЗ-процесом.

14. Впровадити наукові та технологічні розробки досліджень в навчальний процес.

Об’єкт дослідження – процес виготовлення ливарних форм і стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей, які структуровані під дією мікрохвильового випромінювання в середовищі насиченої водяної пари

Предмет дослідження – кінетика, механізм, властивості та

закономірності структурування піщано-рідкоскляних сумішей під дією мікрохвильового випромінювання в середовищі насиченої водяної пари.

Методи досліджень. В роботі використані стандартні методи, методики та апаратура, загальноприйняті та оригінальні методики, що дозволили встановити об'єктивний взаємозв'язок між параметрами досліджуваних процесів. Теоретичні та експериментальні дослідження ґрунтуються на фундаментальних положеннях фізики, теплофізики, тепломасопереносу, механіки руйнування матеріалів. Методи досліджень: термографування, зважування, металографічного та рентгенодифракційного аналізу, симплекс-решітчастої оптимізації, лінійного та хроно-гравиметричного вимірювання, візуального спостереження, системного підходу. Фізико-механічні властивості визначали за стандартними та оригінальними методиками у відповідності до діючих нормативно-технічних документів. Експериментальні дані обробляли методами математичної статистики, візуально-вимірювального контролю, зіставлення та аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. ***Вперше для кварцового піску, плакованого рідким склом з силікатним модулем 2,8...3,0, встановлено кінетику, енергію активації, закономірності та розроблено опис механізму структурування в середовищі насиченої водяної пари під дією мікрохвильового випромінювання частотою 2,45 ГГц зі стоячою хвилею.***

Раніше такі дані не були відомі. Отримані результати розширюють уявлення про процеси масопереносу та структуроутворення сумішей і можуть бути використані при розробці технологій і обладнання, призначених для сушіння і структурування дрібнозернистих діелектричних матеріалів і їх сумішей під дією мікрохвильового випромінювання.

2. ***Вперше встановлено кінетику та розроблено опис механізму карбонізації силікату натрію в шарі рідкого скла товщиною 20...30 мкм з вихідним вмістом води 17...20 % (за масою) і силікатним модулем 2,8...3,0 на повітрі з температурою 22...24 °С та відносною вологістю від 24 до 98 %.***

Раніше такі дані були не відомі. Це дозволяє розробляти рекомендації

щодо зберігання та використання зернистих матеріалів плакованих рідким склом для виготовлення ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом в певних умовах виробництва литва.

3. ***Вперше встановлено функціональні залежності між фізичними, розмірними та технологічними параметрами структурованих піщано-рідкоскляних сумішей з масовим вмістом рідкого скла 0,5...3,0 % з силікатним модулем 2,8...3,0 за умов відсутності хімічних або фізичних перетворень силікату натрію в таких сумішах.***

Раніше такі функціональні залежності для піщано-рідкоскляних сумішей не були відомі. Використання отриманих залежностей дозволяє проводити прогнозування рівнів властивостей структурованих сумішей, спростити процес та скоротити час і витрати на оптимізацію їх складів.

4. ***Вперше встановлено, що спінювання рідкого скла з силікатним модулем 2,8...3,0 в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання йде за схемою ланцюгової реакції з елементарним циклом (самокапсулювання рідкого скла → руйнування капсули під тиском водяної пари, що виникає в капсулі → викид рідкого скла за межі капсули), який повторюється до повного випаровування води із капсул.***

Раніше такий механізм не був відомим. Отримані результати розширюють уявлення про процеси спінювання матеріалів і можуть бути використані при розробці нових способів та підходів у вирішенні проблеми оптимізації структурування зернистих матеріалів і, зокрема, для виробництва піщаних ливарних форм і стрижнів.

5. Вперше (стосовно алюмінієво-магнієвого сплаву і сірого чавуну) встановлені інтегрального-ефективні значення теплофізичних властивостей піщано-рікоскляних сумішей з 0,5...3,0% (за масою, понад 100% піску) рідкого скла та уявною щільністю сумішей 1380...1758 кг/м^3, які структуровані за ПМЗ-процесом.

Раніше такі дані не були відомі. Використання отриманих даних дозволить підвищити точність аналітичних розрахунків часу і швидкості затвердіння виливків, прогнозу рівня і знака залишкових напружень в них,

місць розташування усадкових дефектів, що скоротить час і всі види витрат на відпрацювання технології лиття і технологічності виливків.

6. ***Вперше досліджено та розроблено опис механізму утворення дефектів (вимоїна, внутрішня тріщина), що притаманні виключно ливарним формам та стрижням, які виготовлені за ПМЗ-процесом.***

Раніше такі відомості не були відомі. Використання отриманих даних дозволить корегувати умови та технологічні параметри для виготовлення якісних ливарних форм та стрижнів, скоротити час і витрати на відпрацювання технології їх виготовлення.

7***. Вперше встановлено, що при ударно-вібраційному впливі характер руйнування піщано-рідкоскляних сумішей структурованих за ПМЗ-процесом має переважно адгезійний характер при тривалості паро-мікрохвильової обробки до 2 хв, змішаний характер – при тривалості 2…4 хв і переважно когезійний характер – при тривалості більше 4 хв.***

Раніше такі дані не були відомими. Отримані результати дозволили розширити уявлення про процеси, які супроводжують структурування та руйнування структурованих піщано-рідкоскляних сумішей та розробити рекомендації щодо термочасових умов виробництва піщаних ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом.

8. ***Вперше встановлено, що відносна водостійкість піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, попередній нагрів якої не перевищував 600 ℃, зменшується зі збільшенням температури води, а залежність водостійкості від тривалості ПМЗ-процесу в межах від 2 до 7 хв набуває інверсійного характеру з точкою інверсії 3,1...3,3 хв для маси рідкого скла в межах 0,5...2,5%, використаного для плакування кварцового піску.***

Раніше такі закономірності не були відомі. Отримані результати дозволили рекомендувати спосіб видалення виливків з форми та стрижнів з виливків у воді, що дозволять суттєво скоротити енерговитрати та час на вибивання, і можуть бути корисними при розробці технологій та обладнання, призначених для видалення піщано-рідкоскляних стрижнів і залишків ливарних форм з виливків.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи

полягає у вирішенні важливої соціально-виробничої проблеми по заміні дорогих, екологічно небезпечних, органічних сполучних матеріалів імпортного походження на вітчизняне дешеве екологічно безпечне натрієве рідке скло для виготовлення ливарних форм та стрижнів дрібних виливків, за скороченим циклом їх виготовлення, зі збалансованим рівнем їх технологічних, теплофізичних і фізико-механічних властивостей. Одержані результати розширюють уявлення щодо зовнішніх впливів на формоутворення в ливарному виробництві.

На підставі одержаних результатів:

- розроблено загальні технологічні рекомендації по виробництву одноразових ливарних форм і стрижнів за способом паро-мікрохвильового затвердіння;
- встановлено умови зберігання і підготовки кварцових пісків, плакованих силікатом натрію, та виробів з них;
- розроблено технологічні рекомендації зі склеювання рідким склом піщано-рідкоскляних ливарних форм і стрижнів в мікрохвильовому випромінюванні;
- розроблено технологічні рекомендації щодо попередження виникнення в ливарних формах та стрижнях внутрішніх тріщин та дефекту «вимоїна».
- одержано функціональні залежності між обсипальністю, газопроникністю, крихкістю, міцністю при статичному стисненні (розтягуванні) та роботою вибивання структурованих сумішей з виливків за умов відсутності хімічних або фізичних перетворень під дією теплоти, що виділяється при затвердінні та охолодженні залитого в них розплаву.

Результати роботи пройшли дослідно-промислові випробування, впровадження у виробництво та отримали позитивну оцінку на ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир) при виготовленні дрібних сталевих та чавунних виливків (акт від 03.09.2020 р.), були впроваджені у виробництво ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) при виготовленні дрібних чавунних виливків (акт від 01.07.2020 р.) та на ТОВ «Промислова компанія «Перспектива» (м. Дніпро) при виготовленні дрібних виливків з чавуну, сталі та бронзи (акт від 27.09.2019 р.). Отримані в роботі наукові та технологічні результати, розроблені методики, описи механізмів в навчальний процес Національної металургійної академії України і використовується при виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів (акт від 28.11.2021 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, що отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особисто здобувачем. Публікації відображають результати досліджень, виконаних здобувачем. В дисертації не використані ідеї співробітників, які сприяли виконанню роботи. Здобувач самостійно розробив технологічні та теоретичні основи структурування піщано-рідкоскляних сумішей в паро-мікрохвильовому середовищі, оригінальні методики та опис механізмів досліджуваних процесів, виконав експериментальні та теоретичні дослідження, аналіз, узагальнення та обробку отриманих даних.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві (в порядку, представленому у списку публікацій здобувача): розробка методик, проведення досліджень, обробка отриманих результатів [7, 19, 23, 26, 28, 34, 46, 49, 50, 51]; проведення досліджень, обробка отриманих результатів, щодо виникнення дефектів форм та стрижнів, виготовлених за ПМЗ-процесом [21]; оптимізація складу досліджуваних сумішей, аналіз отриманих результатів [6, 20]; проведення експериментів, визначення фізичних та теплофізичних властивостей сумішей [1, 5, 11, 12, 16, 17, 22]; організація, планування та проведення експериментів, обробка отриманих результатів [8, 18, 43, 45, 52, 53]; теоретичне обґрунтування, розробка функціональних залежностей [14, 15, 38, 39, 40]; розробка методик, підготовка та експериментальне встановлення кінетики процесу, обробка отриманих результатів [4, 10]; розробка опису механізму процесу [2, 3, 48, 56]; розробка матеріального балансу, аналіз, побудова номограм [44, 47]; проведення промислових іспитів та дослідження їх результатів [24, 27, 32]; визначення шляхів підвищення екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки ливарного виробництва [13]; розробка, обґрунтування та основні ознаки технічних рішень, захищених охоронними документами [33, 34, 35, 36]; узагальнення та аналіз літературних даних та наукове обґрунтування завдання [9, 37, 41, 42].

Апробація результатів дисертації. Матеріали роботи були викладені, доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях: The 2nd International

scientific and practical conference «Topical issues of the development of modern science» (Sofia, 2019); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2019); XV Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2019» (Запоріжжя, 2019); The 12th International conference «Science and society» (Canada, 2019); The Ist International scientific and practical conference «Perspectives of world science and education» (Osaka, 2019); The 1st International scientific and practical conference «Priority directions of science development» (Lviv, 2019); International scientific conference «Advance of science» (Czech Republic, 2019); XII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2020); XVI Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2020» (Запоріжжя, 2020); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021» (Київ, 2021); XVII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2021» (Запоріжжя, 2021); 81 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2021); The 3rd International scientific and practical conference «Modern science: innovations and prospects» (Stockholm, 2021); XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2020» (Харків-Київ, 2022); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022» (Київ, 2022).

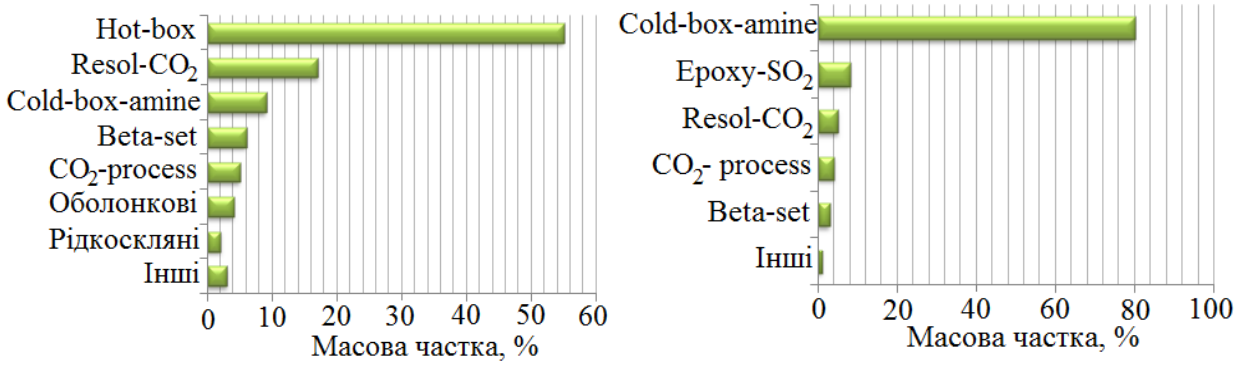
Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 60 наукових роботах, в тому числі: у 3 патентах України на винахід; у 1 патенту України на корисну модель; у 24 статтях в журналах зі спеціального переліку фахових видань МОН України, 8 – у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS та Web of Science, у 24 матеріалах міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 450 сторінках, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 439 найменувань, 14 додатків. Робота містить 174 рисунків, 58 таблиць.

РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАЛЬНІ ТА СТРИЖНЕВІ СУМІШІ. СУЧАСНІ СПОСОБИ СТРУКТУРУВАННЯ СУМІШЕЙ ОДНОРАЗОВИХ ЛИВАРНИХ ФОРМ ТА СТРИЖНІВ

До 80% (за масою) всіх металевих виливків в світі виробляють за разовими ливарними формами, використовуючи для їх виготовлення формувальні та стрижневі суміші (ФСС) з дрібнозернистого вогнетривкого та сполучного матеріалів і, як правило, технологічної добавки або добавок (ТД) [1, 2]. Вогнетривким матеріалом більшості ФСС є кварцовий пісок, в окремих випадках – пісок цирконовий, периклазовий, олівіновий та ін. Сполучним матеріалом ФСС може бути органічна (масла рослинного походження, синтетичні смоли, лігносульфонат, декстрин та ін.) або неорганічна (вода, глина, рідке скло (РС), цемент, гіпс, металофосфати та ін.) речовина [437]. В деяких ливарних цехах форми виготовляють виключно з кварцового піску вакуум-плівковим способом або способом по газифікованим моделям (ЛГМ), або по газифікованим моделям в магнітні форми зі сталевої або чавунної дробі.

Найбільшу кількість виливків у світі, що випливає з гістограм на рис. 1.1 [3, 4], виготовляють у формах з холоднотвердіючих сумішей (ХТС) – сумішей, у складі яких кварцовий пісок та синтетична смола, що твердне під дією рідкого або газового хімічного реагенту.



а б

Рисунок 1.1 – Масові частки ФСС, що виготовлені в світі в 2016 році різними способами (а), і стрижнів з ХТС, що структуровані газовими реагентами (б) [3]

В значно меншій кількості (до 4%) сталеві і чавунні виливки виготовляють у формах з ХТС на основі неорганічних сполучних матеріалів, а також в формах з піщано-глинистих сумішей та ін.

Широкому використанню ХТС на синтетичних смолах сприяла висока міцність ливарних форм і стрижнів (ЛФС), низька робота вибивання, можливість чіткого регулювання швидкості твердіння, довготривале зберігання ЛФС, тощо [5, 6]. Тим не менше, ХТС на синтетичних смолах мають істотні недоліки – високу токсичність смол і їх затверджувачів, продуктів їх розкладу і деструкції та енергоємність регенерації піску з них. Це різко погіршує санітарно-гігієнічні умови виробництва лиття, створює серйозну екологічну небезпеку і може стати причиною виникнення у людей хронічних захворювань і отруєнь аж до летального результату [7, 8].

З числа відомих сполучних матеріалів в ливарному виробництві вимоги до синтетичних смол і сумішей на їх основі в частині екологічної безпеки та санітарно-гігієнічних умов виробництва найбільш високі і численні. Це обумовлено не тільки їх високою токсичністю і канцерогенністю, що витікає з аналізу даних табл. 1.1 [9...11], а й їх пожежо- і вибухонебезпечністю [10].

Таблиця 1.1

Процес структурування і токсичні речовини, що виділяються з ХТС [9…11]

Процес структурування	Токсичні речовини, що виділяються з ХТС
Pep-set, Alfa-set (α-set), Beta-set (β-set) або Cold-box-MF, Resol-CO_2, Epoxy-SO_2, Cold-box-amine	оксид вуглецю, метанол, формальдегід, фенол, ксилол, толуол, бензол, фурфурол, фуріловий спирт, сірчистий ангідрид, ізоацетат, епіхлоргідрин, дифенилолпропан, акрилова кислота, гідропероксидізопропілбензола, триметилолпропан тощо

При цьому, газовиділення з синтетичних ХТС достатньо значні за масою [12…15], що, зокрема, витікає з даних табл. 1.2., за даними якої найбільша частка газовиділення в повітря припадає на час охолодження виливка в ливарній формі [12].

Таблиця 1.2

Виділення забруднюючих речовин із ХТС зі синтетичними смолами [12]

Марка і тип смоли	Процес																
	Заповнення ящиків сумішшю, мг/(кг·г)					Затвердіння сумішей, мг/(дм^3·г)					Охолодження залитих форм, мг/(дм^3·г)						
	Формальдегід	Фенол	Метанол	Фурфурол	Ацетон	Формальдегід	Фенол	Метанол	Фурфурол	Ацетон	Формальдегід	Фенол	Метанол	Аміак	Оксид вуглецю	Бензол	Ціаніди
Фенолформальдегідні смоли											140	3290	210		8750	2620	
ОФ-1	8,70	4,63	28,30		894,5	1,39	0,74	5,42		142,9							
ОФ-1а	8,08	3,25	26,30		831,0	1,29	0,52	4,20		132,8							
СФ-3042	10,78	5,72	35,0		1112,0	1,73	0,92	5,61		177,1							
Фенолфурфуранова смола											Нема даних						
ФФ-1Ф	8,53	7,61	75,26	6,66		0,75	0,67	6,61	0,59								
Мочевинофуранові смоли											250		260	5860	18490		11900
БС-40	34,0		610,50	46,41		3,05		547,0	2,29								
УКС-Ф	34,20		614,40	46,41		3,02		541,0	2,29								
УКС-Л	9,11		161,20	6,66		0,80		142,0	0,59								

Зниження токсичності таких сумішей досягають зменшенням вмісту смоли в суміші до 1,0...1,5% при одночасному підвищенні її міцності шляхом силанізації, зниженням вмісту в пісках їх дрібних фракцій тощо [15]. Тим не менше, не зважаючи на це проблема екологічності та санітарної гігієнічності для цих сумішей, на сьогодні, в цілому залишається не вирішеною.

Виходячи з аналізу даних робіт [12…15], а також з урахуванням того, що синтетичні смоли мають іноземне походження і коштують в 10…17 разів більше ніж, наприклад, РС, уловлювання та дезактивація продуктів деструкції і горіння синтетичних смол в ХТС, утилізація відпрацьованої ХТС та регенерація з неї піску дуже затратні і екологічно небезпечні [16], можна констатувати, що вже на сьогодні використання органічних сполучних, зокрема, синтетичних смол, для виготовлення ФСС недоцільно.

Безсполучні ФСС, які використовують для виготовлення литва по газифікованих моделях, а також для литва у вакуум-плівкові та магнітні ливарні форми також мають суттєві недоліки. Зокрема, спосіб литва по газифікованих моделях, характеризується високим рівнем екологічної та санітарно-гігієнічної небезпеки виробництва без створення в ливарному цеху системи пасивного та активного екологічного захисту у складі якої:

- вакуум-всмоктувальні системи видалення та локалізації викидів, що утворюються під час заливання форми, затвердіння, охолодження та вибивання виливків з форми, транспортування їх до системи остаточної нейтралізації;

- устаткування термокаталітичного допалювання газів;

- установки терморегенерації формувального піску;

- герметично закрита вакуум-транспортна система регенерації ріску [17].

Способи лиття у вакуум-плівкові та магнітні ливарні форми суттєво обмежені особливостями конфігурації виливків та технологічними особливостями формоутворення даних способів [18, 19]. Тому у роботі розглядали ФСС виключно на основі неорганічного сполучного матеріалу, зокрема, натрієвого РС.

1.1 Сучасні формувальні та стрижневі суміші з неорганічними сполучними матеріалами та безсполучні піщані ливарні форми

Піщано-глинисті суміші (ПГС) – це екологічно безпечні суміші, які виготовляють з кварцового піску (наповнювач), глини (сполучне), води і ТД та використовують переважно для виготовлення ливарних форм шляхом механічного стиску під час її ущільнення в оснащенні.

Лиття в ПГС практично не обмежено серійністю виробництва виливків загально машинобудівного призначення, їх розмірами, масою, типом сплаву [20…22]. Основні недоліки ЛФС з ПГС – низька міцність ($\sigma_{СТ}$≈0,1...0,3 МПа), висока газотвірна здатність, низька газопроникність, схильність до появи на виливках ужимін, засмічень, газових раковин, низька точність литва, необхідність використання сушарок тощо.

Низькотемпературна суміш (НТС) – екологічно безпечна суміш з кварцового піску і води. В деяких випадках в НТС додають бентонітову глину [23, 24]. Ущільнюють НТС вібрацією або зовнішнім механічним впливом. Істотним недоліком НТС є необхідність використання коштовного холодильного обладнання або заморожуючого агенту (рідкого азоту), небезпека обмороження під час роботи з ЛФС, тривалість та енергоємність заморожування, обмежений час (до 15 хв) витримки заморожених ЛФС на повітрі до заливки. В даний час НТС в ливарних цехах України не використовують.

Піщано-рідкоскляна суміш (ПРС) – екологічна, санітарно-гігієнічно безпечна суміш, яку використовують в одиничному і серійному виробництві виливків машинобудівного призначення з залізовуглецевих та кольорових сплавів. На сьогодні в ливарних цехах, як правило, використовують ПРС, що твердіють за рахунок:

- проходження в них хімічної реакції між РС та твердим, рідким (рідкорухливі (РСС), пластичні (ПСС)) або газовим (CO_2-процес), затверджувачем;

- дегідратації РС під час їх нагрівання, продування повітрям і т.д.

За винятком РСС, які ущільнюють шляхом короткочасної вібрації [25], всі інші види ПРС в оснащенні ущільнюють шляхом зовнішнього механічного впливу на них.

Загальним для ЛФС, що виготовляють з ПРС, є їх крихкість, підвищена обсипальність і газотвірна здатність, гігроскопічність, нетривалий час зберігання до заливки, схильність до утворення пригару на виливках, низька податливість, великі енергетичні витрати при вибивані виливків з форм і стрижнів з виливків, енергоємність регенерації, а для РСС ще і низька щільність, що призводить до суттєвого пониження теплоакумулюючої здатності ЛФС і знижує рівень властивостей литих деталей [25].

Перераховані недоліки ПРС лише частково усувають шляхом введення в їх склад певних ТД, зміни кількості РС в ПРС або його силікатного модуля, організацією виробництва лиття в ливарному цеху, тощо [26...29].

Піщано-цементна (ПЦС) та гіпсова (ГС) суміш. Піщано-цементна та гіпсова суміші – це умовно екологічно безпечні суміші, що складаються з піску, гідратаційних сполучних матеріалів (портландцемент, глиноземистий цемент, гіпс та ін.), води і ТД. Ущільнення ПЦС призводять шляхом зовнішнього механічного впливу на суміш, ущільнення ГС – виключно вібрацією з одночасним вакуумуванням.

Суттєвими недоліками ЛФС з ПЦС є нестабільність в часі та від партії до партії хімічної активності цементу та, відповідно, властивостей ЛФС, неможливість регенерації піску, значне виділення пилу під час приготування та вибивання суміші з виливків. В Україні ПЦС не знайшли широкого застосування у виробництві виливків. Подекуди такі суміші використовують для виготовлення одиночних великих виливків із залізовуглецевих сплавів.

На підприємствах України ГС широко застосовують лише для виготовлення ювелірного, стоматологічного та художнього лиття [30, 31]. В окремих випадках ГС застосовують при виготовленні ЛФС для виливків технічного призначення з легкоплавких кольорових сплавів, масою до кількох десятків кг, довжиною до 2…3 м [32]. Недоліки ГС – обмежений час живучості

після затворення водою, необхідність прогартовування форм, низька газопроникність, схильність до розтріскування і утворення повітряних раковин в ЛФС, температурне обмеження застосування [33].

Металофосфатна суміш (МФС) – умовно екологічно безпечні суміші, які ущільнюють зовнішнім механічним впливом. В ливарних цехах переважно використовують холоднотвердіючі МФС (ХТ-МФС), відомі також МФС гарячого твердіння (ГТ-МФС) [34]. До складу ХТ-МФС, як правило, входить кварцовий пісок, металофосфат (магнійалюмофосфат, алюмофосфат, алюмоборфосфат, залізофосфат, залізоалюмосфат та ін. [35, 36]) або пилоподібні оксиди заліза, феросиліцію та ін. з ортофосфорною кислотою [37].

Недоліками ЛФС з ХТ-МФС є їх схильність до крихкості, гігроскопічність, нестабільність властивостей, насичення поверхневого шару сталевих виливків фосфором, низька технологічність, складність регенерації піску та утилізації відпрацьованої суміші і т.д. [36, 38, 39]. Основним недоліком (ГТ-МФС) є необхідність їх нагрівання в оснащенні до 300...400°С для проходження процесу структурування.

Кремнезольна суміш (КС) – екологічно безпечна суміш. До складу КС входить пиловидний кварц або електрокорунд та кремнезоль. Виходячи з високої рідиноплинності КС, її ущільнення в оснащенні проводять шляхом вібрації. Суттєвим недоліком такої суміші є дорожнеча виготовлених ЛФС. Це зумовлено не тільки значною витратою дорогого імпортного кремнезолю та пиловидних фракцій вогнетривкого наповнювача, але і енерговитратами. Тобто, після ущільнення таку суміш заморожують в оснащенні, охолоджуючи до -23 °С, що зумовлює агрегацію частинок і незворотне твердіння кремнезолю, а після цього форму або стрижень видаляють з оснащення та перед заливанням розплавом прожарюють при ~1200 °С [40]. В даний час КС в ливарних цехах України не використовують.

Етилсилікатна суспензія (ШОУ-процес) – умовно екологічно чиста суспензія, що складається з кварцового піску, пиловидного кварцу, етилсилікату та їдкого натру. Суть способу формоутворення за ШОУ-процесом

полягає в приготуванні суспензії шляхом змішування її компонентів, заливанні суспензії в оснащення і її твердінні протягом 2...3 хв, видалення моделі з форми, підпалювання парів спирту, що виділяється зі структурованої суспензії та, за необхідністю, її термообробка при 850...900 °С.

Такі ЛФС використовують за кордоном для виготовлення виливків із кольорових та залізовуглецевих сплавів в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва. Основними недоліками цього виду ЛФС є їх дорожнеча за матеріалами, нестабільна якість поверхні ЛФС, низька живучість та седиментаційна стійкість суспензії, схильність до утворення поверхневих тріщин, великі витрати етилсилікату, вибухо- і пожежонебезпечність етилсилікату та пари спирту [41].

Найбільш важливі узагальненні властивості розглянутих ФСС, що найбільш часто використовують в ливарних цехах, наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Властивості неорганічних ФСС

Тип ФСС			Властивості *			
			К, од	$\sigma_{СТ}$, МПа	Ос, %	А***, Дж
Піщано-глинисті	«сухі» ПГС [42…44]		80-150	0,8-1,5	0,05-0,15	
	«сирі» ПГС [42, 44…46]		80-150	0,3-0,9	0,08-0,25	
	НТФ [23]		80-120	1,2-2,5	0,01-1,22	
Піщано-рідкоскляні	CO_2-процес [47…50]		>100	1,2-2,9	0,05-0,6	10-220
	Конвективно-радіаційне теплове сушіння [51, 52]		200-380	1,7… >3,0	0,01-0,1	
	Мікрохвильове сушіння [53...55]			12,0	>0,2	
	Самотвердіння ПСС [56, 57]		99-310	1,2-2,4	0,05-0,2	40-110
	Самотвердіння РСС [38, 58, 59]		180-350	0,5-1,2**		30-60
Цементні	Портландцемент [43, 60, 61]		142-165	0,3-3,16	–	
Гіпсові	Гіпс [62, 63]		1-30	1,6-4,6**	–	
Металофосфатні	(ХТ-МФС) [35, 64…67]	Залізофосфат, магнійфосфат	>200	2,0-5,6**	0,1-0,3	
		Алюмоборофосфат	150-180	1,2-1,4	0,05-0,10	
	(ГТ-МФС) [68, 69]		≥150	2,5-3,0	0,2-0,45	

Примітки. * К – газопроникність; $\sigma_{СТ}$, Ос – відповідно, міцність на стиск та обсипальність через 3 години (** через 24 години) з моменту завершення структурування суміші. *** Робота вибивання після нагріву до 800 °С.

З викладеного вище випливає, що кожен спосіб виробництва лиття, ЛФС має свої переваги і суттєві недоліки, прийнятні в тих чи інших умовах та об'ємах виробництва, для тих чи інших груп лиття і т.п. При цьому, слід зазначити, жоден з відомих способів лиття та виготовлення виливків не забезпечує отримання виливків без металургійних дефектів і дефектів виливків, притаманних кожному зі способів. Тим не менш, про що свідчить практика вітчизняних ливарних цехів, що виготовляють дрібні та середні виливки загальномашинобудівного призначення, найбільш стабільні властивості та, відповідно, найбільш висока якість спостерігається у ЛФС, суміші яких структурують фізичними способами. Така закономірність пояснюється стабільністю та керованістю дії використовуємих фізичних факторів, що забезпечують твердіння сполучних матеріалів в ФСС.

На сьогодні найбільш прийнятним є використання ПРС, де процес затвердіння РС реалізують тепловим сушінням в мікрохвильовому випромінюванні, що витікає з аналізу класифікації, приведеної в роботі [70].

Незаперечні переваги ПРС перед іншими видами ФСС – низька собівартість, матеріали вітчизняного походження, стабільність властивостей суміші, можливість використання відпрацьованої суміші для виробництва РС в сукупності з вирішенням проблем, пов'язаних з технологічністю дозволять в більшості ливарних цехів України вирішити проблему забруднення навколишнього середовища і різкого поліпшення санітарно-гігієнічних умов виробництва лиття при зниженні витрат на його виробництво [2].

Тим не менш, для успішного використання ПРС, що структурують в мікрохвильовому випромінюванні, в ливарних цехах необхідно знайти комплексне рішення задач, що дозволяють скоротити трудомісткість формування, підвищити живучість суміші, скоротити час її затвердіння, підвищити міцність і пластичність ЛФС, знизити витрати на вибивання стрижнів з виливків, вирішити задачі по регенерації та утилізації відпрацьованих сумішей, інформація про що на сьогодні відсутня або носить фрагментарний характер.

1.2 Вимоги до сучасних формувальних та стрижневих сумішей, ливарних форм та стрижнів

Комплексну оцінку структурованих ФСС, як правило, проводять виходячи з величин їх наступних показників:

- газодинамічних (газопроникність, газотвірна здатність);
- теплофізичних (уявна щільність, питома теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, теплоакумулююча здатність);
- фізико-хімічних (вологість, фракційний склад, форма частинок зернистого вогнетривкого матеріалу суміші, модуль Юнга, хімічна активність у ставленні до залитого металу або сплаву тощо), у тому числі, механічних (межа міцності на стиск, розтягання, статичний вигин, твердість тощо);
- технологічних (обсипальність, податливість, плинність, стиранність, ремонтопридатність, придатність до регенерації, гігроскопічність, схильність до утворення ужимін, прилипання до оснащення, робота вибивання і т.д.).

Дослідженням властивостей ЛФС присвячена велика кількість робіт [71...77 та ін.], з яких витікає, що до числа найбільш важливих параметрів сумішей для ЛФС відносять: щільність, обсипальність, крихкість, газопроникність, газотвірну здатність, міцність, відносну величину стріли прогину до руйнування і роботу вибивання.

Справжня та уявна щільність (ρ). Справжня щільність (γ) будь-якого матеріалу являє собою співвідношення його маси (m) до об'єму (V), уявна щільність – співвідношення маси матеріалу до його об'єму з порами.

За інших рівних умов справжня щільність залежить від природи матеріалу, а уявна щільність – від фракційного складу суміші, способу її ущільнення, структурування, форми її часток, об'єму пор і т.п. Для ФСС з підвищенням уявної щільності, знижується газопроникність, збільшується міцність, теплоакумулююча здатність, маса ЛФС тощо.

Обсипальність (Ос) – показник поверхневої міцності або здатності поверхні виробу (форми, стрижня, зразка) протистояти руйнуванню при

стиранні. Обсипальність за ГОСТ 23409.9 визначають у %, як відносну зміну маси зразка циліндричної форми (∅50х50 мм) зі структурованої суміші до і після його стирання протягом 1 хв в обертовому сітчастому барабані.

Обсипальність залежить від міцності структурованої суміші, природи і кількості сполучного матеріалу в суміші, уявної щільності і т.п. та, як правило, в перші години після завершення структурування збільшується у часі. За інших рівних умов на величину обсипальності істотно впливає питома щільність застосовуваного в суміші зернистого вогнетривкого матеріалу, форма та розмір його зерен і т.п. [6, 15]. З підвищенням обсипальності зростає вірогідність появи на виливках засмічень та ужимін, підвищується шорсткість литої поверхні виливків.

Крихкість (Хр) – один з показників технологічності структурованих сумішей, який оцінюють за величиною симплекса [39]:

$$Xp = \frac{\sigma_{CT}}{\sigma_B}, \qquad (1.1)$$

де σ_{CT}, σ_P – міцність суміші на стиск і при розтягуванні відповідно.

Вважається, що структурована суміш тим пластичніше, чим більше величина Хр. З підвищенням Хр зменшується вірогідність руйнування ЛФС під час їх протягування в оснащенні, під час витягання стрижня з ящика, маніпуляцій, з'єднанні частин форми та її заливанні розплавом.

За інших рівних умов, крихкість неухильно підвищується (величина Хр зменшується) зі збільшенням тривалості зберігання ЛФС на повітрі.

Газопроникність (К) – показник здатності структурованої суміші пропускати через себе повітря. Цей показник розраховують за результатами випробувань ФСС проведених відповідно до ГОСТ 23409.6, використовуючи формулу:

$$K = \frac{V \cdot h}{S \cdot P \cdot \tau}, \qquad (1.2)$$

де V – об’єм (2000 $см^3$) повітря, що пройшло через зразок за час τ, $см^3$;

h – висота (довжина) зразка, см;

S – площа поперечного перерізу зразка, $см^2$;

P – тиск повітря під зразком під час проведення його випробувань, Па ($г/см^2$ або сантиметрів водного стовпа);

τ – тривалість проходження 2000 $см^3$ газу (повітря) через зразок, хв [78].

Газопроникність знижується з підвищенням уявної щільності суміші, розмірів її зерен, зниженням їх фракційної однорідності і т.д.

Газотвірна здатність (Г) – це показник, який відповідно до ГОСТ 23409.12, являє собою об’єм газів, що виділяються з 1 г досліджуваної суміші при її витримці при 1000 °С впродовж 10 хв [78].

Міцність на стиск ($\sigma_{СТ}$), при розтягуванні ($\sigma_Р$) та на вигин ($\sigma_{ВГ}$) – показники здатності зберігати цілісність виробу (форми, стрижня, зразка) при впливі на нього зовнішнього навантаження стиску ($\sigma_{СТ}$), розтягування ($\sigma_Р$) або вигину ($\sigma_{ВГ}$). Від величини міцності сумішей залежні і показники їх обсипальності, податливості, вибивання, придатності до регенерації і т.п.

Міцність ПРС не тільки адгезійно та когезійно залежна, але і залежить від уявної щільності структурованої суміші, вмісту сполучного матеріалу в суміші і його природи, часу перемішування ПРС, способу, умов структурування і т.п. [79…81]. У свою чергу, на адгезійну міцність впливають: поверхневе натягування РС, стан і вигляд поверхні зерен вогнетривкого наповнювача, модуль пружності силікату натрію (СН) з РС, полярність РС та поверхні зерен вогнетривкого наповнювача, результати процесу полімеризації РС, величина водневого показника на межі розділу плівки РС з зернами вогнетривкого наповнювача тощо [82].

При цьому, зокрема, між величинами міцності на стиск, при розтягуванні та на вигин для самотвердіючих ПРС та ПРС, що структуровані за CO_2-процесом, існує наступна залежність [72]:

$$\sigma_{СТ} = 4 \cdot \sigma_Р = 2 \cdot \sigma_{ВГ}. \quad (1.3)$$

За даними [83], найбільшої міцності структурованих сумішей на основі РС досягають при їх залишковій вологості 0,3…0,5%.

В кожному виді лиття, виходячи з вимог до якості виливків, їх маси, типу сплаву і т.п., до ФСС пред'являють певні пріоритетні вимоги. В числі таких, зокрема, для структурованих плакованих піщано-смоляних сумішей, що використовують у виробництві чавунних і сталевих виливків, рекомендована міцність при статичному вигині складає не менше 0,6...0,8 МПа, при розтягуванні в гарячому стані – неменше 0,24...0,28 МПа, при статичному вигині після термічного удару при 900 °С протягом 2 хв – не менше 0,18...0,24 МПа, а газотвірна здатність – не більше 32 $см^3$/г [84].

Авторами роботи [34, 85] рекомендовано використання ХТС на основі РС, які б в структурованому стані мали межу міцності на стиск $\sigma_{СТ}$=3,4...3,9 МПа, обсипальність Ос ≤ 0,05...0,1%, газопроникність – не менше 150...200 од і величину газотвірної здатності не більше 10...15 $см^3$/г.

Автори роботи [86] відзначають, що єдині сирі ПГС, які придатні до виготовлення виливків, мають $\sigma_{СТ}$ = 0,04...0,06 МПа при ущільненні струшуванням і $\sigma_{СТ}$ до 0,10...0,22 МПа при піскодувно-пресовому (безопочне формування) способі ущільнення. При цьому вологість таких сумішей повинна становити 3,2...5,0%, а газопроникність 90...140 од [38] тощо.

Робота вибивання (А) – це робота, яку необхідно витратити на вибивання виливків з форм і/або стрижнів з виливків.

Роботу вибивання зразків ∅50х50 мм розраховують за методикою ЦНДІТМАШ з використанням формули, Дж [87]:

$$A=a\cdot n, \qquad (1.4)$$

де а – робота одного удару копра (для лабораторного копра мод. 5033А величина а = 3,09 Дж);

n – кількість ударів копра, необхідне для видалення стрижня з обойми.

Робота вибивання певним чином корелює з показником залишкової

міцності структурованих сумішей. Тому, роботу вибивання в ряді випадків оцінюють за величиною остаточної міцності на стиск структурованих сумішей попередньо нагрітих до відповідної температури та охолоджених для досліджень до нормальної (20...25 °С) температури [86].

На величину роботи (залишкову міцність) вибивання виливків з форм та стрижнів з виливків насамперед впливає температура нагрівання ФСС при формуванні виливків, про що, наприклад, свідчать залежності на рис. 1.2.

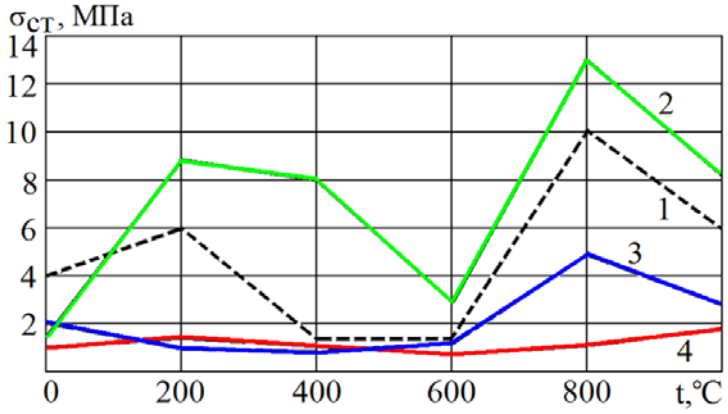


Рисунок 1.2 – Залежності залишкової міцності на стиск ПРС від температури попереднього нагріву: 1 – 4% РС (M_{SIO2}=2,4), затверджувач – складний ефір; 2 – 6% РС (M_{SIO2}=2,4), затверджувач – CO_2; 3 – 5% РС (M_{SIO2}=2,6), затверджувач – 4% ферохромового шлаку; 4 – 6% РС (M_{SIO2}=2,7), затверджувач – 5% ферохромового шлаку (дані А.М. Лясса)

Така закономірність обумовлена проходженням насамперед фізико-хімічних процесів як у глибинних шарах ФСС, так і на поверхнях контакту виливок-(форма/стрижень). В свою чергу, температура нагріву ЛФС залежить від температури заливки розплаву в форму, товщини стінок виливка та стрижня, тривалості заливки розплаву в форму, теплофізичних властивостей сумішей та ін. [88].

Стосовно ПРС, за даними [58, 89, 90], робота вибивання буде тим менше, чим менше залишкова міцність суміші. В свою чергу, залишкова міцність зменшується зі зменшенням вмісту РС в ПРС та з підвищенням силікатного

модуля її РС, зі збільшенням залишкових напружень у манжетах РС тощо. Зокрема, П.А. Борсук та А.М. Лясс відзначають, що зниження вмісту РС в ПРС на 1% дозволяє зменшити її залишкову міцність на стиск у 2 рази [58].

Робота вибивання багато в чому залежить і від початкової міцності структурованої суміші. В свою чергу початкова міцність будь-якої структурованої суміші залежить і від механізму (когезійного, адгезійного, змішаного) її руйнування. При цьому, когезійна міцність ФСС, як правило, завжди в рази більше міцності адгезійної [91…94].

За даними А.М. Лясса ПРС мають когезійний механізм руйнування [91], на думку А.А. Жуковського структуровані ФСС переважно руйнуються за когезійним механізмом і подеколи за змішаним адгезійно-когезійним механізмом [86]. При цьому, перехід від когезійного до адгезійного механізму руйнування може проходити за різних умов, у тому числі, і з підвищенням вмісту сполучного матеріалу у ФСС [95].

Оцінюючи вибиваємість ПРС по їх залишковій міцності на стиск, автори роботи [86] відзначають, що для задовільного вибивання залишкова міцність ПРС на стиск повинна бути у межі 1,5...2,0 МПа, що відповідає роботі вибивання на лабораторному копрі вказаної вище моделі ~100 Дж.

Необхідно зазначити, що крім ударно-вібраційного впливу на стрижні, що вибивають, для стрижнів з ПРС можливе видалення і шляхом занурення виливків у воду. Така можливість зумовлена зворотністю процесу дегідратації РС. Тим не менше, на сьогодні дані по видаленню ПРС з виливків шляхом їх занурення у воду відсутні.

Відносна величина стріли прогину до руйнування (f). Параметр f близький по суті з параметром крихкості (Хр). Чим більше відносна величина стріли прогину до руйнування структурованої суміші, тим суміш в структурованому стані більш піддатлива (менш крихка), тим більш технологічна в структурованому стані, тим менш вразлива до руйнування під час витягання ЛФС з оснащення, маніпуляцій з ЛФС та, за необхідністю, їх обробки лезовим інструментом.

Величину стріли прогину визначають за триточковою схемою навантаження на зразок балочного типу, яка для деяких типів ХТС через 4 та 24 години з моменту завершення їх структурування надана в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Граничні деформації ХТС при вигині [86]

Сполучна композиція + затверджувач	f, мм, після		Сполучна композиція + затверджувач	f, мм, після	
	4 год.	24 год.		4 год.	24 год.
Смола БС-40 + H_3PO_4	0,59	0,22	РС + шлак + ПАР (РСС)	0,20	0,16
РС + CO_2	0,24	0,18	MgO + H_3PO_4	0,14	0,07
РС + ефір	0,24	0,10	MgO + H_3PO_4 + ПВС	0,32	0,23

Примітка. ПАР – поверхнево-активна речовина; ПВС – полівініловий спирт

Як свідчить практика виготовлення ЛФС, відносна величина стріли прогину до руйнування, в основному, залежить від пластичності затверділого сполучного матеріалу суміші, способу структурування суміші та неухильно зменшується з підвищенням часу витримки структурованої суміші на повітрі.

Живучість. Показник живучості використовують в якості технологічної характеристики [1, 5, 25 та ін.]:

- сполучного матеріалу;
- суміші сполучного матеріалу з затверджувачем;
- підготовленої до структурування суміші;
- свіжоприготовленої або свіжоструктурованої ФСС.

Виходячи з властивостей РС в дослідженнях ПРС доцільно за показник живучості прийняти час зберігання при певних умовах підготовленої до структурування ПРС без втрати або втрати до 30% структурованою сумішшю її загальної або поверхневої міцності порівняно з аналогічними показниками суміші, що структурована безпосередньо після її приготування [25].

Виходячи з викладеного, результатів аналізу даних [2, 6, 96…101] та властивостей сучасних ФСС (див. табл. 1.3) для умов виготовлення дрібних та середніх виливків загальномашинобудівного призначення визначили граничні значення їх показників, які приведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Граничні значення показників ФСС

Властивості	Значення	Властивості	Значення
Уявна щільність, кг/м^3	≥1600	Міцність при розтягуванні, МПа	≥0,2
Обсипальність, %	≤ 0,3	Міцність на вигин, МПа	≥0,2
Крихкість, од	≥4	Робота вибивання, Дж	≤100
Газопроникність, од	≥150	Відносна величина стріли прогину до руйнування, %	≥ 0,25
Газотвірність, см^3/г	≤ 15		
Міцність на стиск, МПа	≥2,0	Живучість, год	≥0,1

Слід зазначити, що аналіз літературних та патентних даних [45…52, 89…91, 93…97 і ін.] по визначенню і розрахунку зазначених параметрів ФСС показує відсутність комплексного підходу в дослідженнях їх взаємозв'язків і взаємного впливу. Тобто в характеристиках сумішей дані параметри і властивості розглядають самостійними і незалежними один від одного, а їх зміни автори відомих залежностей пов'язують лише і, як правило, з природними та техногенно придбаними характеристиками сумішей або їх окремими компонентами [86]. Зокрема, Ребіндер П.О., міцність структурованої суміші рекомендує розраховувати за формулою [86]:

$$\sigma = c^* \cdot \sigma^* \cdot \frac{1 - П}{d_c^2}, \qquad (1.5)$$

де с* – константа;

σ* – міцність індивідуального контакту (манжети) між частками суміші;

П – відносний об'єм пористості суміші;

d_c – середній діаметр часток суміші.

В інших роботах авторами встановлено, що для одних видів структурованих сумішей міцність визначається рівнем адгезійних і когезійних властивостей матеріалів, що входять до них, у інших, наприклад, ПГС – Ван-дер-Ваальсовими та капілярними силами, водневими зв'язками і донорно-акцепторною взаємодією і т.д. [77, 81, 82]. При цьому міцність структурованої

суміші вони також розраховують за формулами, використовуючи параметри, що подібні за змістом до параметрів формули (1.5). Зокрема, в роботі [87], для математичного опису впливу вмісту сполучного ФСС (х) на властивості ЛФС автори використовують рівняння виду:

$$y=a+b\times x+c\times x^2, \qquad (1.6)$$

де a,b,c – коефіцієнти кореляції.

В роботі [86, с.230] Жуковський С.С. відносно залежностей типу (1.6) відмічає, що: «...наиболее часто получают эмпирические уравнения, связывающие прочность с одним или несколькими технологическими факторами путём аппроксимации или регрессионного анализа. Такой подход не является теоретическим и не даёт новых представлений о природе прочности....». Тобто, виключно такий формалізований підхід до вирішення не тільки проблеми міцності, але і будь-якого параметру знижує точність прогнозу, унеможливлює проведення комплексного аналізу та прогнозування зміни основних властивостей структурованих сумішей при виникненні значних збурень в технологічному процесі виготовлення ЛФС.

Такий стан питання підвищує вірогідність суттєвих втрат при виготовленні виливків та литих деталей, що потребує відповідних досліджень та розробки адекватних розгорнутих функціональних залежностей між показниками ФСС, зокрема, на основі ПРС.

1.3 Сучасні способи структурування піщано-рідкоскляних сумішей

Будь-яка свіжовиготовлена ПРС на елементарному рівні являє собою піщинки, які мають на поверхні тонкий шар РС та манжети з РС в точках контакту сусідніх піщинок [102]. Структурування таких сумішей завершується твердінням РС внаслідок зміни його хімічного складу або його перетворенням в СН як на поверхні піщинок, так і в манжетах за рахунок дегідратації РС.

Тобто, в сучасних ливарних цехах структурування ПРС здійснюють способами, в основі яких лежить зміна (різке підвищення) силікатного модуля РС або часткового чи повного зневоднення (дегідратація) РС в ПРС аж до стану СН, які реалізують після ущільнення ПРС в оснащенні або за його межами.

В залежності від цього структурована ПРС набуває певний рівень властивостей, який суттєво відрізняється не тільки від способу до способу структурування ПРС, але і вихідних властивостей, кількості, умов та стану використаних в ПРС матеріалів, механізму переносу РС в ПРС під час структурування, тощо.

Класифікація способів за механізмом структурування ПРС і реагентом-заверджувачем РС представлена в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Класифікація способів за механізмом структурування ПРС і реагентом-заверджувачем РС

Спосіб (тип ПРС)	Механізм структурування	Реагент-заверджувач РС [103]
Сушіння: на повітрі, теплове, продування повітрям, у вакуумі, мікрохвильове, токами високої частоти, електроосмосом	Дегідратація	
Продування вуглекислим азом	Зміна силікатного модуля	Вуглекислий газ
(РСС)		Двокальцієвий силікат
(ПСС)		Двокальцієвий силікат, алебастр, цемент, гідроокиси кальцію, етиленглікоколацетат, гліоксаль, глікоколпропінат, феросиліцій, силікофторид натрію, гумінова кислота, діетиленглікольдіацетат, моноацетин, діацетин, тріацетин, пропіленкарбонат тощо

Спосіб структурування суміші ЛФС є одним з найважливіших елементів будь-якої ливарної технології. Це зумовлено тим, що від нього залежить не тільки ефективність виробництва лиття, але і відповідні властивості ЛФС, що реалізується через відповідний рівень полімеризації, щільності, впорядкованості структури РС при структуруванні. Зокрема, за спаданням уявної щільності і впорядкованості структури плівок з РС в структурованих ПРС способи та хімічно-активні матеріали, що використовують для його затвердіння, автори роботи [104] розташували в наступній послідовності:

теплова обробка (дегідратація) → рідкий складний ефір →

→ твердий ферохромовий шлак → газоподібний CO_2,

які, відповідно, надають затверділому РС когезійну міцність, МПа:

$$41{,}0 \rightarrow 29{,}8 \rightarrow 20{,}5 \rightarrow 14{,}9.$$

Значна відмінність у величинах когезійної міцності затверділого РС пояснюється не лише зміною його хімічного складу під час затвердіння, але і особливостями його молекулярної будови – ступенем полімеризації. Зокрема, відповідно до класифікації [105], за ступенем полімеризації в РС присутні:

- α-SiO_2–мономерний кремнезем, ланцюжкові та циклічні олігомери зі ступенем полімерності не більше 8;
- β-SiO_2–гідратовані полімери кремнезему;
- γ-SiO_2–кремнезем структурою близькою до кварцу.

Слід зазначити, що крім когезійної міцності затверділого РС на загальну міцність структурованої ПРС впливає і її адгезійна складова – сила зв'язку РС в манжетах з піщинками суміші. При цьому, доля впливу адгезійної складової в загальній міцності ПРС підвищується зі зниженням величин когезійної складової.

1.3.1 Структурування піщано-рідкоскляних сумішей дегідратацією рідкого скла

Дегідратацію ущільненої ПРС проводять шляхом витримки ЛФС на повітрі, конвекційно-радіаційного нагрівання, примусового продування повітрям, обробки мікрохвильовим випромінюванням, вакуумування, електроосмосу або одночасно декількома вказаними способами.

Витримка ПРС на повітрі – найбільш економічний, але і найбільш тривалий (~24 год) спосіб сушіння ЛФС. Визначальними факторами тривалості такого сушіння є температура, швидкість та відносна вологість навколишнього повітря. В ливарних цехах цю технологію застосовують при виготовленні ЛФС для виливків масою до 500 кг у весняні та літні періоди за відносної вологості повітря не більше 60%. У числі недоліків даного способу, крім значної тривалості, залежності від температури, швидкості та відносної вологості навколишнього повітря – карбонізація РС в поверхневих шарах ЛФС, що призводить до збільшення їх обсипальності. Крім цього міграція вологи з глибинних шарів ЛФС на їх поверхню – одна з найчастіших причин виникнення у виливках газових раковин, засмічень і т.п. [106].

Теплове (конвекційно-радіаційне) сушіння ПРС проводять у камерних сушарнях або з використанням електричних чи газових переносних сушил. В останньому випадку, з метою уникання розтріскування поверхні великих ЛФС, контролюють температуру відпрацьованого природного газу, яка не повинна перевищувати 300 °С.

Тривалість сушіння в камерних сушарнях ЛФС у 4...6 разів довша, ніж при використанні переносних газових або електричних сушил, залежить від товщини стін ЛФС, маси одночасно висушуваних ЛФС в камері сушарні і триває від 5,5 до 11 годин при ізотермічній витримці ЛФС при 300 °С [107].

Сушіння інфрачервоним (радіаційним) випромінюванням використовують переважно для ЛФС масою до 10 кг. Істотним недоліком цього способу є неоднорідність швидкості нагрівання освітлених та тіньових

поверхонь ЛФС, що іноді призводить до локального нагрівання поверхневих шарів ЛФС до 450...500 °С і їх розтріскування [108].

В цілому, теплове сушіння має обмежене застосування, оскільки воно є тривалим і потребує значних енерговитрат. При цьому, стрижні з ПРС зазвичай сушать поза оснащенням, наприклад, в драйєрах, забезпечуючи їм достатньо велику відкриту площу поверхні. В іншому випадку підвищений вміст води в ПРС при вилученні стрижня та його транспортуванні може привести до руйнування стрижня, викривлення поверхонь або зміни його розмірів та, відповідно, розмірів виливка.

Сушіння ЛФС продуванням повітрям з температурою навколишнього середовища або підвищеною температурою є малоефективним через атмосферний опір повітря в порах суміші [109]. В результаті такого продування холодним повітрям ЛФС нерівномірно підсушують, а залишкова волога на окремих ділянках є причиною утворення таких дефектів, як газові раковини або пористість, засмічення, ужиміни і т.д.

Використання попередньо нагрітого повітря для продування дещо знижує вміст води в ЛФС, але в цілому не вирішує проблему видалення води та рівномірності умов структурування ПРС.

Сушіння у вакуумі. Недоліком даного способу є сублімація води з РС під час сушіння [110]. Тобто при вакуумуванні ПРС перед випаровуванням частина водив РС замерзає, що призводить до зниження сполучних властивостей РС. В зв'язку з цим інтенсивне вакуумування ПРС окрім структурування подеколи призводить до розміцнення окремих ділянок ЛФС до неприпустимого рівня [76]. Як свідчить практика вакуумного сушіння, для інтенсифікації процесу ПРС в оснащенні доцільно попередньо підігріти до 40...50 °С.

Мікрохвильове сушіння. Висока ефективність процесу мікрохвильового сушіння стрижнів з ПРС в порівнянні з традиційними способами відзначається багатьма дослідниками і залежить від діелектричної проникності компонентів ПРС, частоти та потужності джерела мікрохвильового випромінювання [111, 112]. При цьому, за інших рівних

умов, чим вище значення діелектричної проникності компонентів ПРС, тим інтенсивніше проходить процес її нагрівання [113].

Основна проблема мікрохвильового сушіння стрижнів з ПРС полягає в тому, що його необхідно проводити виключно після повного або часткового вилучення стрижня зі стрижневого ящика. Це викликано одночасним впливом на процес сушіння особливостей перенесення тепла та вологи в стрижні під дією мікрохвильового випромінювання та досягненням рівноважної вологі (гігроскопічної точки) на межі стрижневого ящика та стрижня при сушінні.

Як відомо [114, 115], гігроскопічна точка характеризує граничну вологість матеріалу в момент рівності парціального тиску водяної пари в повітрі ($p_П$) та у вологому матеріалі ($p_М$), який залежить від вологості матеріалу, температури та виду зв'язку вологи з матеріалом і збільшується з підвищенням температури та вологості матеріалу.

Сушіння проходить у разі $p_М<p_П$. Якщо $p_М>p_П$, то стрижень буде насичуватися вологою з повітря або, що має місце у даному випадку, при контакті стрижня з його стрижневим ящиком, в поверхневих шарах стрижня буде виникати конденсат і псувати якість його поверхні. Особливості та параметри процесу сушіння ЛФС з ПРС мікрохвильовим випромінюванням більш детально надані в розділі 1.5.

Сушіння ПРС токами високої частоти. Енергія високочастотного нагрівання витрачається на нагрівання діелектрика в ПРС. Як результат швидкого зростання температури – по всьому об'єму ЛФС відбувається видалення вільної води та збільшення швидкості гелеутворення РС. Максимальну міцність ПРС набуває через 35...45 с з моменту її обробки токами високої частоти. Суттєвим недоліком такого сушіння є неконтрольоване видалення вологи з гелю РС, який стає крихким, що значно знижує міцність ЛФС [116].

Сушіння електроосмотичним зневодненням ПРС реалізують шляхом пропускання через суміш постійного електричного струму [117]. За цим способом рух вологи в суміші проходить у напрямку від надатного (модель

виливка) електрода до від'ємного (стіни оснащення) електрода.

Порівняно із загальноприйнятими способами теплового сушіння даний спосіб дозволяє скоротити в ~2 рази витрати електричної енергії, а спрямоване інтенсивне переміщення води в суміші призводить до направленої та нерегульованої зміни концентрації РС в об'ємі ПРС.

При цьому, як і у попередньому способі, суттєвим недоліком електроосмотичного зневоднення є неконтрольоване видалення вологи з гелю РС та його переніс від робочої поверхні ЛФС, що знижує їх міцність, підвищує обсипальність тощо.

1.3.2 Структурування піщано-рідкоскляних сумішей шляхом зміни силікатного модуля рідкого скла

Підвищення силікатного модуля РС у ПРС відбувається внаслідок перетворення Na_2O в РС в сполуку з хімічними властивостями відмінними від лужних. В свою чергу, підвищення силікатного модуля РС порушує його метастабільний стан і силікатна частина РС починає коагулювати та/або агрегувати, що викликає твердіння РС та, відповідно, структурування ПРС.

Продування ПРС вуглекислим газом. Структурування ЛФС відбувається внаслідок продування їх вуглекислим газом або повітряно-вуглекислою сумішшю (CO_2-процес), що може поєднуватися з короткочасним тепловим сушінням або вакуумуванням [102].

При продуванні ЛФС газоподібним (балонним) CO_2 відбувається полімеризація РС, внаслідок чого утворюється гель кремнієвої кислоти та бікарбонат натрію за реакцією [82]:

$$Na_2SiO_3+CO_2+H_2O\rightarrow H_2SiO_3+Na_2CO_3. \quad (1.7)$$

При цьому вода у РС не дегідратує, а утримується гелем і залишається в структурованій ПРС.

В деяких випадках CO_2-процес поєднують з короткочасним тепловим сушінням ЛФС, що частково дегідратує РС. За даними [118], це підвищує міцність ЛФС у 2...4 рази, внаслідок формування на поверхні вогнетривкого наповнювача плівки СН більшої щільності.

Різновидом CO_2-процесу є його поєднання з вакуумуванням ПРС в оснащенні, що, за даними [119], дозволяє проводити термовакуумне та термохіміковакуумне зміцнення ЛФС, збільшити на 30...35% міцність ЛФС, підвищити керованість та у 3...5 разів прискорити процес структурування.

Для структурування ПРС також використовують повітряно-вуглекислу суміш з об'ємним вмістом CO_2 40…50%. Продувку ЛФС при цьому проводять з мінімальною швидкістю подачі повітряно-вуглекислої суміші протягом 20...25 с. Це дозволяє на 30...50% знизити витрати вуглекислого газу та збільшити міцність ЛФС, підвищити час зберігання ЛФС, знизити їх обсипальність та ін. [102].

Спосіб комбінованого зміцнення стрижнів з неактивним ФХШ запропоновано авторами роботи [120], за яким ущільнену ПРС в стрижневому ящику короткочасно і інтенсивно продувають нагрітою до 100 °С сумішшю CO_2 з повітрям (1:1 за об'ємом), а потім дозміцнюють в стрижневому ящику під дією ФХШ.

Недоліками структурування ПРС продуванням газом є поява тріщин в ЛФС при їх передуві, чутливість рівня властивостей до якості РС і відносної вологості навколишнього повітря, підвищена обсипальність і крихкість ЛФС, підвищена робота вибивання, необхідність використання додаткового обладнання, обмежений термін зберігання готових ЛФС і складність регенерації піску з обробленої суміші.

Затвердіння ПРС порошковими затверджувачами. Порошковими затверджувачами РС в РСС та ПСС, як правило, є ФХШ або НШ, або металургійні шлаки (електропічні, мартенівські, доменні тощо), що поступаються першим двом матеріалам хімічною активністю і стабільністю властивостей [121].

Головна відмінність НШ від ФХШ у тому, що у НШ двокальцієвий силікат знаходиться у β-формі, а у ФХШ – у γ-формі. При цьому реакція між СН і двокальцієвим силікатом проходе за схемою його попереднього гідролізу [122]:

$$2CaO \cdot SiO_2 + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + CaO \cdot SiO_2(n\text{-}2)H_2O, \quad (1.8)$$

$$2CaO \cdot SiO_2 + Na_2O \cdot nSiO_2 + H_2O \rightarrow 2(CaO \cdot mSiO_2 \cdot kNa_2O)aq + Na_2O \cdot zSiO_2. \quad (1.9)$$

Внаслідок поглинання SiO_2 з рідкої фази РС під час твердіння утворюються гідросилікати. Це призводить до зниження силікатного модуля РС з 2,9 до 0,5 та його твердіння без вилучення з суміші води.

Рідкі самотвердіючі суміші не вимагають додаткового ущільнення. Це обумовлено тим, що ПАР, що вводять до складу РСС, роз'єднують піщинки наповнювача, надаючи суміші рідкорухливу консистенцію. Самозатвердіння РСС на повітрі забезпечує порошкоподібний затверджувач – ФХШ, НШ та ін. При цьому РСС зберігає плинність впродовж 8...10 хв, а достатня маніпуляційна міцність суміші настає через 20...30 хв.

Пластичні самотвердіючи суміші складаються з вогнетривкого наповнювача, глини, меленого вугілля, РС, ФХШ та ТД і на відміну від РСС вимагають механічного ущільнення в оснащенні. Заливати форми із ПСС можна не раніше, чим через 4…6 годин з моменту їх виготовлення.

Слід зазначити також, що ФХШ містить токсичні з'єднання шестивалентного хрому. Тому вдихання пилоподібних частинок шлаку викликає у людей захворювання легень [123]. Крім того, ФХШ та НШ є нестабільними затверджувачами, що призводить до додаткового браку виливків [124], а при підвищеній вологості навколишнього повітря відбувається мимовільне твердіння ФХШ та НШ вже під час їх зберігання.

Ливарні форми та стрижні з РСС та ПСС мають високу пористість, незадовільну якість поверхні виливків, високу роботу вибивання, погану регенерацію піску. При цьому, РСС характеризується високою газотвірною

здатністю і низькою уявною щільністю, що негативно впливає на структуру виливків, а ПСС – тривалим часом затвердіння в оснащенні.

Затвердіння ПРС рідкими затверджувачами. До складу ПСС, як правило, входить вогнетривкий наповнювач, РС, рідкий затверджувач та ТД. В якості рідкого затверджувача використовують: етиленглікольмоноацетат, етиленглікольдіацетат, 1,3-гліцериндіацетат (1,3-діацетин), гліцеринацетат (тріацетат), пропіленкарбонат та ін. [125…127]. Затвердіння РС в ПРС відбувається внаслідок утворення кремнієвої кислоти та спирту протягом певного часу (залежно від природи використаного рідкого затверджувача – від 5 хв до декількох годин) [128].

Процес затвердіння РС в ПСС рідким затверджувачем складається з наступних стадій:

1) дифузія рідкого затверджувача в мікрооб'ємі РС;

2) гідроліз рідкого затверджувача в лужному середовищі:

$$ROR'+HOH \rightarrow HR+R'OH, \qquad (1.10)$$

де R – кислотний залишок (ацетат-іон або карбонат-іон);

R' – спиртовий радикал (етилен, пропіленгліколю або гліцерину);

3) нейтралізація кислоти НР (оцтової або вугільної), що утворилася:

$$HR+NaOH \rightarrow NaR+HOH, \qquad (1.11)$$

4) підвищення модуля РС (M_{SIO2}>4) та його затвердіння.

Недоліками ПСС є обмежений час її живучості, крихкість та усадка при затвердінні ЛФС, висока газотвірна здатність, нестабільність властивостей, необхідність підігріву приміщення або суміші для реалізації процесу структурування, збільшені ухили на оснащенні, що знижує точність розмірів та маси виливків [129].

Підвищення адгезійної складової міцності ПРС – один з напрямів

підвищення міцності та зниження обсипальності ЛФС. Для цього перед використанням кварцовий пісок олужують водним розчином їдкого натру, що дозволяє отримати шар гідратованого СН на поверхні кожної піщини, у зв'язку з чим зменшити в ПРС вміст РС до 4% [130].

Тим не менш, даний технологічний прийом хоч і підвищує адгезійну міцність ПРС, але не призводить до поліпшення її вибивання, оскільки сумарна маса оксиду натрію в ній практично не змінюється.

З цією ж метою при сушінні ПРС у мікрохвильовій печі активацію поверхні зерен піску здійснюють шляхом їх попереднього змочування водою [131].

1.4 Модифікування рідкого скла та технологічні добавки до піщано-рідкоскляних сумішей

Метою модифікування РС або введення в суміш ТД, як правило, є підвищення міцності ПРС та/або поліпшення вибивання ПРС.

Модифікування РС проводять способами, що змінюють його структуру або властивості. До таких способів належать ультразвуковий [132], магнітний [133…135], електричний, електрогідравлічний [117, 136] та ударно-хвильовий вплив на РС [137].

Зокрема, обробка ультразвуком безпосередньо РС, що твердіє в ПРС під дією складного ефіру, сприяє підвищенню міцності структурованої ПРС на 20% [132].

Попередня магнітна обробка РС призводить до збільшення міцності ПРС на 40...60%, що при незмінній міцності дозволяє зменшити вміст у суміші РС та ФХШ на 30...40%, зменшити в 3...5 разів роботу вибивання сумішей [134, 135]. Такий вплив постійного магнітного поля на властивості структурованих ПРС автори [134, 135] пов'язують із наявністю неконтрольованих домішок у воді. В той же час, змінне магнітне поле змінює структуру водно-дисперсних систем, ступінь гідратації та відповідним чином властивості структурованої суміші [133].

При електрогідравлічній обробці хімічного модифікування РС під впливом електричного поля та високовольтних імпульсних електричних

розрядах інтенсифікується розчинення полімерних модифікаторів у РС, змінюється конформація молекул полімерів та створюються фрагментарні просторові мережі їх молекул. Зрештою, ці процеси разом із подрібненням колоїдної структури РС призводять до збільшення міцності структурованих ПРС на 20...60% і їх пластичності – в 1,5...2,0 рази.

За даними [136] електромагнітна обробка РС на 30...40% підвищує міцність холоднотвердіючих ПРС, дозволяє на 1,5% знизити вміст РС в суміші і на 30...40% знизити роботу вибивання стрижнів з виливків.

Автор роботи [116] перед додаванням в пісок активує РС міцним електромагнітним полем. За даними [116], така обробка РС підвищує заряд його частинок, збільшує кількість активних функціональних груп у розчині, зменшує в'язкість та крайовий кут змочування кварцового піску. Як результат – міцність структурованої суміші збільшується і на 30...40% скорочується цикл приготування суміші у частині її перемішування.

Істотним недоліком описаних вище електрофізичних та магнітних способів обробки РС є обмеженість у часі прояву позитивних ефектів, що досягаються, складність забезпечення стабільності ефекту обробки, а також відсутність централізованого виготовлення необхідного обладнання [136].

Підвищення міцності структурованої ПРС спостерігається і при обробці ущільненої суміші в оснащенні ультразвуковими коливаннями. Короткочасна обробка робочих поверхонь заздалегідь ущільненої ПРС ультразвуком хоч дещо і підвищує її міцність [132] завдяки перерозподілу РС між поверхнею піщинок та манжетами між ними на користь останніх, проте сам процес не технологічний, тривалий і практичного значення для виготовлення ЛФС не має. На сьогодні цей спосіб в ливарних цехах не використовують.

З метою зміни властивостей структурованих ПРС їх модифікують речовинами з поверхневою енергією більшою, ніж у застосовуваного РС (контакт Петрова, ДС-РАС, милонафт, солі неорганічних кислот), використовують комбіновані ТД (відпрацьоване машинне масло з алюмінієвою пудрою, графітовий порошок, пил коксу з петролатумом,

кам'яновугільний пил з нафталіном, сечовини з гіпсом тощо) [138...143]. Зокрема, за даними [144], до ТД, що знижують роботу вибивання, відноситься комплексна ТД, що містить за масою 1...2% керогену-70, 1...4% кукерситу, 1...5% сланцевої породи.

Модифікатор комплексного впливу на властивості ПРС запропоновано в роботах [145, 146]. В даному випадку, в якості модифікатору при автоклавному розчиненні силікат-брили, використовують поліакриламід і силікофосфат. За даними авторів цієї розробки використання таких комплексних модифікаторів дозволяє на 10...15% скоротити витрату сполучного матеріалу (РС) та затверджувача, а також у 3...7 разів зменшити трудомісткість вибивання ПРС при отриманні сталевих та чавунних виливків.

Для підвищення міцності та пластичності ПРС, зменшення роботи їх вибивання автор роботи [147] під час розчинення силікат-брили в автоклаві модифікує РС багатоатомними спиртами (гліцериновий гудрон, ксилітан та меляса), а як затверджувач використовує складні ефіри. Рекомендований масовий вміст багатоатомних спиртів від маси силікат-брили становить 1,5...3,0% для меляси та 1,5...6,0% для гліцеринового гудрону.

Позитивний вплив ТД на властивості структурованих ПРС встановлено в багатьох роботах [148…153, 438]. Зокрема, для збільшення міцності затверділого РС в нього вводять аморфний кремнезем (білу сажу), натрію триполіфосфат або тринатрійфосфат. Для підвищення пластичності РС в нього вводять фурилові солі, високомолекулярні спирти та їх похідні (оксоль, ПВС), целюлози ефіри, водні дисперсії полівінілацетату.

Для реалізації подвійного ефекту, наприклад, підвищення міцності і пластичності структурованої суміші в РС додають поліфосфат натрію або карбамід. Введені в РС солі вугільної кислоти ($CaCO_3$, $MgCO_3$ і т.п.), перманганат або біхромат калію при нагріванні суміші виділяють газ, що призводить до руйнування манжет РС, а також зниження спікання суміші за рахунок виникнення нових тугоплавких або крихких систем.

Зниження роботи вибивання ПРС з виливків, також досягають за рахунок:

- зниження адгезії РС до поверхні піщинок (парафін, петролатум, бітум, ПВС, глина та ін.);
- формування значних внутрішніх напружень в манжетах або зменшення їх відносної міцності (крейда, перліт, вермикуліт, обсидіан, слюда, парафін, петролатум, каніфоль, гідрол, бітум, пеки, кокс, цукор, термопластичне вугілля, мазут, синтетичні олії, смоли та ін.) в результаті порушення їх суцільності структури, зростання внутрішніх напружень та зниження відносної міцності манжет, утворення термостійких карбонатів тощо;
- руйнування манжет при виділенні газу або в рази розширення частинок ТД під час нагрівання суміші до певної температури (крейда, перліт, вермікуліт, сульфат амонію, сульфат натрію, вуглекислий амоній, гідроксид амонію, карбамід, поліакриламід тощо), які розпушують структуру манжет;
- підвищення температури плавлення РС (глина, крейда, зола торфу, доменні шлаки, спучений перліт, вермікуліт, доломіт, боксит, шамот, відходи виробництва соди і т. д.), що збільшує внутрішні напруження в манжетах;
- протидії спіканню РС (тринатрійфосфат, триполіфосфат натрію, силікофосфат, фосфат натрію), що збільшує внутрішні напруження в манжетах.

Технічні напрями вирішення проблеми утрудненого вибивання ливарних стрижнів за даними [154] наведено в табл. 1.7.

На думку авторів роботи [154] найбільш перспективними напрямками вирішення проблеми вибивання стрижнів з виливків є застосування у складі стрижневих сумішей пороутворювальних або терморозширюваних матеріалів.

Зниження роботи вибивання також досягають за рахунок попередження змочування розплавленим СН (температура понад 780 °С) зерен кварцового піску під час відведення теплоти від залитого розплаву у форму. З цією метою в ПРС вводять матеріали, окислення яких супроводжується виділенням великої кількості сажистого вуглецю (подрібнений бітум, пил кам'яного вугілля та коксу, мазут, пек, карбамід, цукор, парафін, крохмаль, пилоподібний торф, патока, декстрин, каніфоль, синтетичні смоли та ін.) або підвищенням поверхневої енергії розплавленого СН (нафтобітум, полівінілхлорид).

Таблиця 1.7

Технічні напрямки вирішення проблеми утрудненого вибивання ливарних стрижнів

Напрямок вирішення проблеми	Недоліки напрямку вирішення проблеми
Зменшення вмісту сполучної речовини	Можливе зниження інших експлуатаційних характеристик стрижнів
Використання добавок, що зміцнюють сполучне при підвищених температурах	Відсутність універсальності (необхідність розробки різних добавок для різних типів сумішей)
Застосування фізичних методів обробки сполучного та вогнетривкої основи суміші	Складність та висока вартість обладнання, що застосовується
Використання пороутворюючих добавок	Виділення газів та, як наслідок, погіршення екологічної обстановки стрижневої ділянки. Забруднення поверхневого шару виливка
Використання терморозширюваних добавок	Висока вартість. Неможливість прожарювання суміші при високих температурах

Для поліпшення окремих технологічних властивостей структурованих ПРС до їх складу також додають гліцерин, алкіларилсульфонат, малеїновий ангідрид, етиленгліколь, сорбітол, казеїн, сульфат та хлорид алюмінію, борну кислоту, тринатрійфосфат тощо.

За результатами аналізу управління властивостями структурованих ПРС автори роботи [87] дійшли висновку у тому, що, можливості поліпшення властивостей даних сумішей з допомогою використання в їх складі різноманітних ТД практично вичерпані. Подальші роботи, на думку [87, 155] щодо вдосконалення ПРС слід проводити у напрямі використання у складі РС малих кількостей ультрадисперсних матеріалів. При цьому автори [87]

зазначають, що додавання у РС ультрадисперсного порошку у кількості 12...16% від РС дозволяє знизити роботу вибивання суміші у 4…6 разів.

З викладеного витікає, що всі відомі способи модифікування та ТД не дозволяють в комплексі поліпшити властивості ПРС. Тобто при позитивному впливі на одні параметри вони, як правило, негативно впливають на інші параметри структурованих ПРС. В інших випадках придбані після модифікування позитивні властивості РС не завжди тривалі і прогнозовані в часі. При цьому, використання будь-якого модифікатора або ТД потребує певних витрат на його придбання та обов'язкової регенерації піску з ПРС, що, як правило, робить недоцільним вторинне використання кварцового піску у ФСС і зумовлено витратами на його регенерацію, які у рази перевищують сумарну вартість свіжого кварцового піску та його доставку в ливарний цех.

Слід зазначити, що крім конкретних завдань, розв'язуваних за допомогою ТД у складі будь-якої суміші, до ТД також пред'являють певні обов'язкові вимоги. Зокрема, універсальні ТД для стрижневих сумішей не повинні [156]: виявляти розміцнюючу дію на суміш до моменту повного затвердіння виливка, знижувати експлуатаційні властивості стрижнів, мати велику гігроскопічність, бути хімічно активними до компонентів більшості сумішей і стрижневих вогнетривких фарб, знижувати якість поверхневого шару виливків, перешкоджати можливості виготовлення стрижнів із застосуванням їх теплового сушіння, бути екологічно небезпечними, дефіцитними, мати високу вартість тощо.

Виходячи з викладеного, можна констатувати, що для виготовлення ЛФС структурування ПРС потрібно проводити таким чином, щоб при досягненні потрібного рівня властивостей структурованої ПРС за короткий час її обробки не проводити модифікацію РС і не використовувати в складі ПРС будь-яких ТД. До числа таких способів відноситься спосіб структурування ПРС в паро-мікрохвильовому середовищі [157], дані про можливості якого на сьогодні відсутні. Проте, даним способом комплексно вирішують проблеми, притаманні іншим способом структурування ПРС, а також проблема регенерації, яка стає

непотрібною у зв'язку з тим, що відпрацьована ПРС може бути використана в якості сировини для виготовлення силікат-брили, наповнювача бетонних виробів, компонента сумішей для дорожніх покриттів тощо.

1.5 Мікрохвильова сушка

Як було зазначено вище, сушіння ПРС можливо проводити [158]: природним [159], конвекційним [159...163], радіаційним [160, 164, 165], сублімаційним [160, 166], діелектричним [159, 166...173] і іншими способами.

Серед відомих способів сушіння особливе місце займає діелектричне нагрівання у високочастотному змінному електричному полі струмами високої частоти (ВЧ) – високочастотне нагрівання (частота 0,3…300 МГц) або у електромагнітному полі – мікрохвильове або надвисокочастотне (НВЧ) нагрівання (частота 0,4…10 ГГц) [174…180]. Особливість такого нагрівання, на сам перед, полягає в об'ємності тепловиділення в нагріваємому матеріалі, що забезпечує цьому способу найбільшу перспективність, ефективність і швидкість нагрівання серед інших способів нагрівання діелектриків [175, 177].

Істотним недоліком ВЧ-нагрівання є необхідність максимального відтворення індуктором рельєфу поверхні тіла, що нагрівають, для досягнення максимальної ефективності нагріву. Для НВЧ-нагрівання цього обмеження не існує, а в порівнянні з іншими способами, НВЧ-нагрівання характеризується: високим ККД, малим циклом, селективністю (вибірковістю) та безінерційністю нагріву, збігом у часі та просторі напрямків векторів переміщення вологості та температури в капілярно-пористих тілах, сталістю готовності обладнання до роботи та ін. [170, 181...185 і т.д.]. У зв'язку з цим, для нагрівання діелектриків все частіше в промисловості, медицині, харчовій промисловості та побуті перевагу віддають печам мікрохвильового нагріву. Цей вибір пояснюється ще і тим, що, при значному скороченні тривалості сушіння НВЧ-печі споживають менше електричної енергії [185…190].

1.5.1 Мікрохвильове випромінювання. Мікрохвильові печі

В даний час мікрохвильові печі (камери печей) конструктивно поділяють на резонаторні (зі стоячою хвилею), хвилеводні (з хвилею, що біжить) і променевого типу [191]. Істотним недоліком нагрівання тіл з діелектричних матеріалів мікрохвильовою енергією в камерах будь-якого типу є нерівномірність виділення теплоти в різних частинах тіла, що нагрівають.

Камери з хвилею, що біжить, характеризуються нерівномірністю нагріву матеріалів з різними або змінними відносної діелектричної проникності (ε) і тангенсу кута діелектричних втрат (tgδ) при постійних електричних параметрах мікрохвильової установки, що обумовлено залежністю ε і tgδ матеріалу, що нагрівають, від температури [191].

Нерівномірність нагріву матеріалів у камерах зі стоячою хвилею (в резонаторі) обумовлена циклічністю розташування хвильових пучностей та вузлів [192]. Тобто, в мікрохвильових печах зі стоячою хвилею нагрівання діелектрика відбуватиметься лише на ділянках пучностей, потужність яких знижується з віддаленість від виходу хвилеводу в резонатор.

Для зниження впливу цього негативно фактора в резонаторі встановлюють металевий дисектор або обертовий стіл, що дозволяє більш рівномірно обробляти мікрохвильовим випромінюванням діелектричні тіла різної форми і розмірів, з різними і змінними величинами ε і tgδ. При цьому, у зв'язку з тим, що дисектор змінює умови узгодження магнетрона з резонатором, його використання призводить до зменшення ККД печі і додаткового нагрівання магнетрону [193]. Тому, в конструкціях сучасних мікрохвильових печей перевагу віддають обертовому столу.

Важливим фактором рівномірності мікрохвильового нагріву є теплофізичні властивості тіла, що нагрівають. Така залежність обумовлена замалою швидкістю дисипації теплоти в об'ємі тіла, що спричиняє в тілі утворення зон з підвищеною температурою, де поглинання мікрохвильового випромінювання буде значно змінено [194].

У більшості конструкцій сучасних мікрохвильових печей робоча камера – це об'ємно-замкнений металевий резонатор, що має у плані форму квадрата з розмірами сторін рівними (1,5…3,5)·λ, де λ – довжина хвилі мікрохвильового випромінювання, яке збуджується магнетроном печі. Як правило, споживана потужність таких печей становить 1,1...2,5 кВт, при номінальній корисній потужності мікрохвильового випромінювання в резонаторі від 600±75 до 1500±100 Вт (ККД – 55...62%) при номінальній напрузі 220 В, частоті електричного струму 50 Гц, відносній вологості повітря не більше 80% та діапазоні температури навколишнього повітря від 10 до 35 °С. При цьому такі печі забезпечують величину коефіцієнта відносної рівномірності нагрівання тіл 0,4...0,8 [181, 186].

Під час роботи мікрохвильової печі електромагнітні хвилі в резонаторі, багаторазово відбиваючись від її стінок і тіл, що нагрівають, загасають, формуючи численні пласкі стоячі хвилі з областями вузлів і пучностей. Діелектричний матеріал, що знаходиться в такій камері, нагріваючись, випаровуючись або розплавляючись, частково поглинає мікрохвильову енергію. Часткове, змінне в часі поглинання енергії матеріалом діелектриком разом з його примусовим переміщенням та/або циклічною зміною напряму поширення хвиль всередині резонатора призводять до безперервної зміни розташування (дрейфу) зон вузлів, пучностей та їх потужності. При цьому з моменту збудження мікрохвильового випромінювання потужність його пучності збільшується до тих пір, поки потужність мікрохвильового випромінювання, поглинається діелектриком, не стане рівною потужності мікрохвильового випромінювання на виході з хвилеводу в камеру печі [181, 182, 186, 195].

1.5.2 Нагрівання тіл в полі мікрохвильового випромінювання

Основними показниками нагрівання тіл мікрохвильовим випромінюванням є швидкість та однорідність підвищення їх температури, які залежать від природи, складу матеріалу, маси та конфігурації таких тіл.

Тверді матеріали за характером взаємодії з мікрохвильовим випромінюванням поділяють на:

1) відбивні – метали та металеві сплави, гладка поверхня яких відбиває мікрохвильове випромінювання і які навіть практично не нагріваються, оскільки втрат енергії мікрохвильового випромінювання у їх об'ємі практично немає [196…198];

2) прозорі – діелектрики, які пропускають через свій об'єм мікрохвильове випромінювання (плавлений кварц, поліетилен, полістирол, скло та ін.) [196, 199, 200];

3) поглинаючі – діелектрики, які поглинають мікрохвильове випромінювання і при цьому нагріваються (оксиди, сульфіди, карбіди, деякі кисневмісні солі і т.д.) [196, 201, 202].

За інших рівних умов потужність мікрохвильового випромінювання, що поглинається матеріалом, який нагрівають, залежить від потужності і частоти електромагнітного випромінювання, а також від відносної діелектричної проникності (ε) матеріалу [113, 203…205]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' , \tag{1.12}$$

де ε' – діелектрична проникність матеріалу (дійсна);

ε'' – фактор, пропорційний енергії поля, що поглинається за період коливань (уявна діелектрична проникність);

j – уявна одиниця;

і від коефіцієнта втрат tgδ цього матеріалу:

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} . \tag{1.13}$$

У свою чергу діелектрики поділяють на [181]:

1) діелектрики, діелектрична проникність яких практично не залежить від

температури (полівініл, поеліфірна смола, дерево і т.д.);

2) діелектрики, діелектрична проникність яких слабко залежить від температури (кераміка, фарфор, тефлон і т.д.);

3) діелектрики, діелектрична проникність яких значно залежить від температури (вода, харчові продукти і т.д.).

На сьогодні для розрахунку діелектричної проникності використовують аналітичні вирази Максвелла, Максвелла-Гарнетта, Одолевського, Ліхтенекера і т.д. [428...434], які, тим не менше, не дають результатів, які б добре узгоджувались з експериментальними даними [435]. Це відноситься і до теоретично отриманих величин tgδ, а так само ε' і ε" для твердих і рідких тіл [196].

Значна розбіжність між експериментальними та разрахуноковими значеннями цих параметрів вирогідно повязана не тільки з точністю використаних математичних моделей, але і з відмінністю використаних методик їх визначення, в числі яких резонансний метод, метод биття, метод розбудови контурів, метод куметра, коаксіальні методи, хвильоводні методи, метод короткого замикання, балансні методи та ін. [436], а також чистотою використаних матеріалів і точністю вимірювань.

Зокрема, величина ε та tgδ однакових мінералів, залежить і від їх родовища, виду і кількості в них хімічних домішок, вмісту вологи та ін. Про це, наприклад, свідчать дані на рис. 1.3, де представлені результати визначення ε і tgδ сумішей на частоті 2,45 ГГц різнофракційних пісків, а також їх сумішей з РС (M_{SIO2}=2,4...2,6) при його вмісті в піску 5% (за масою) [113].

З аналізу отриманих даних (див. рис. 1.3) автори [113] констатують, що:

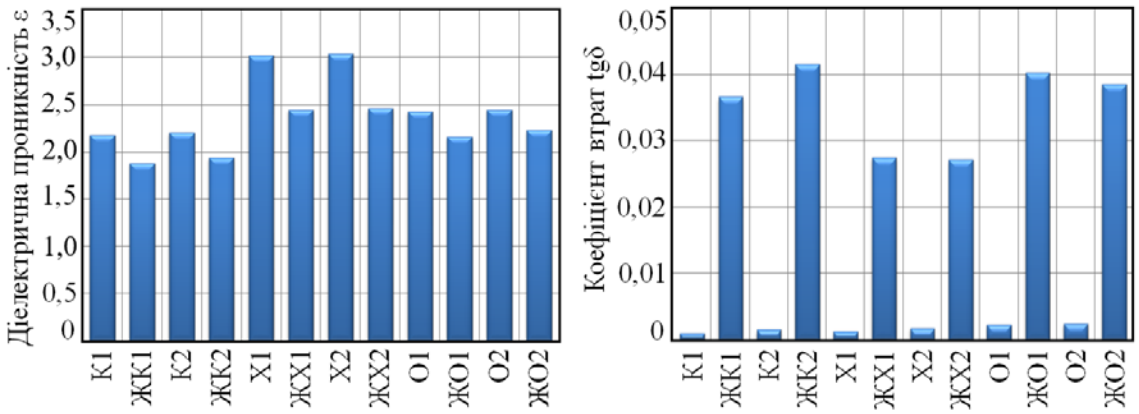
- з числа досліджених пісків для виготовлення ПРС доцільно використовувати олівіновий пісок, як матеріал, що найбільш швидко нагрівається мікрохвильовим випромінюванням;

- РС у складі ПРС, інтенсифікує процес її нагрівання;

- величина діелектричної проникності та коефіцієнт втрат пісків залежать від виду та мінералогічного складу піску.

Формувальні піски характеризуються різною діелектричною проникністю

також в силу різного хімічного, мінералогічного, кількісного і якісного складу [206…208]. При цьому залишковий вміст води в РС зменшується зі збільшенням тривалості мікрохвильового сушіння та його силікатного модуля [209], що також призводить до відповідної зміни дії електричної проникності ПРС загалом і, відповідно, параметрів сушіння ЛФС у часі.



а б

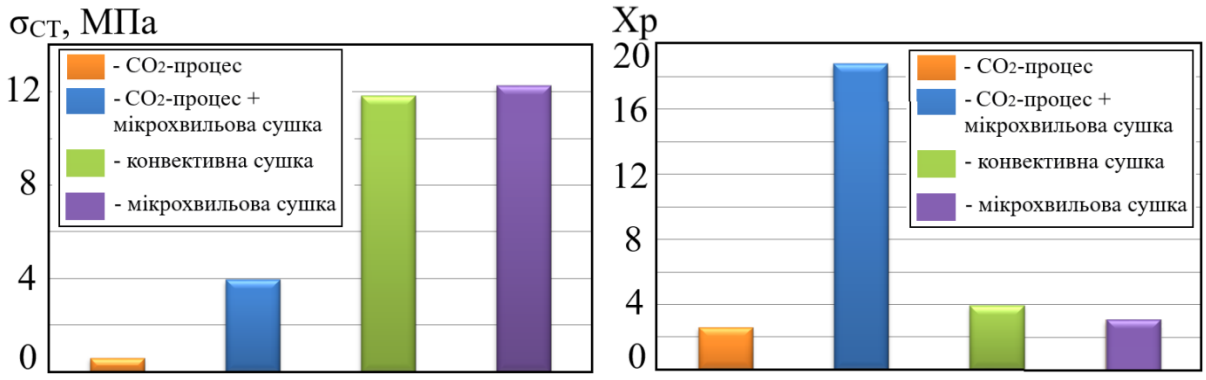
Рисунок 1.3 – Діелектрична проникність (а) та коефіцієнт втрат (б) піску та формувальної суміші: К1 – кварцовий пісок дрібнозернистий; ЖК1 – кварцовий пісок дрібнозернистий з РС; К2 – кварцовий пісок крупнозернистий; ЖК2 – кварцовий пісок крупнозернистий з РС; Х1 – хромистий пісок дрібнозернистий; ЖХ1 – хромистий пісок дрібнозернистий з РС; Х2 – хромистий пісок крупнозернистий; ЖХ2 – хромистий пісок крупнозернистий з РС; О1 – олівіновий пісок дрібнозернистий; ЖО1 – олівіновий пісок дрібнозернистий з РС; О2 – олівіновий пісок крупнозернистий; ЖО2 – олівіновий пісок крупнозернистий з РС

Слід зазначити, що, мабуть, на характер і інтенсивність нагріву матеріалів впливає не тільки просторове розташування пучностей і вузлів стоячих хвиль у резонаторі, але й положення тіл, що нагрівають, на обертовому столі, їх маса, розміри, електричні властивості тощо, відомості про які для більшості матеріалів та їх сумішей, в тому числі і для ПРС, на сьогоднішній день відсутні.

1.5.3 Властивості піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані мікрохвильовим випромінюванням

У роботі [53] наведені результати дослідження впливу чотирьох способів затвердіння на міцність ПРС, серед яких структурування зразків за CO_2-процесом, конвекційною сушкою в печі, мікрохвильовою сушкою в продовж 240 с в мікрохвильовій печі з частою мікрохвильового випромінювання 2,54 ГГц, комбінованим способом, в якому здійснили поєднання CO_2-процесу з мікрохвильовою сушкою впродовж 240 с.

Зразки для випробувань виготовляли із ПРС, в яку понад 100% кварцового піску додавали 2,5% РС і 0,5% води за масою. Суміші ущільнювали трьома ударами лабораторного копра. Результати визначення межі міцності на стиск та коефіцієнта крихкості зразків, розраховані за формулою (1.1) з використанням даних [53], представлені на рис. 1.4 [210].



а б

Рисунок 1.4 – Вплив способу затвердіння ПРС на їх межу міцності на стиск (а) та крихкість (б)

З аналізу даних на рис. 1.4 витікає, що найменшою крихкістю характеризується ПРС, яка була структурована за комбінованим способом, а найбільшою міцністю – ПРС, що структурована шляхом конвекції повітря в печі та мікрохвильовою обробкою. При цьому, слід зазначити, мікрохвильове

сушіння дозволяє значно скоротити час процесу до рівня, порівнянного із структуруванням ПРС за CO_2-процесом.

У роботі [54] представлені результати досліджень впливу способу структурування на міцність (міцність на вигин) та обсипальність структурованих ПРС.

Суміш №1, яка складалась з кварцового піску 100%, 0,4% рідкого затверджувача (діацетат етиленгліколь) та 3,5% РС, затверджували шляхом додавання в неї складних ефірів, а також поєднанням додавання складних ефірів і мікрохвильової обробки (сушіння).

Під час виготовлення, всі зразки із суміші № 1 для структурування комбінованим способом після механічного ущільнення витягали з оснащення через 50 хв після додавання РС до піску і протягом 4 хв обробляли мікрохвильовим випромінюванням.

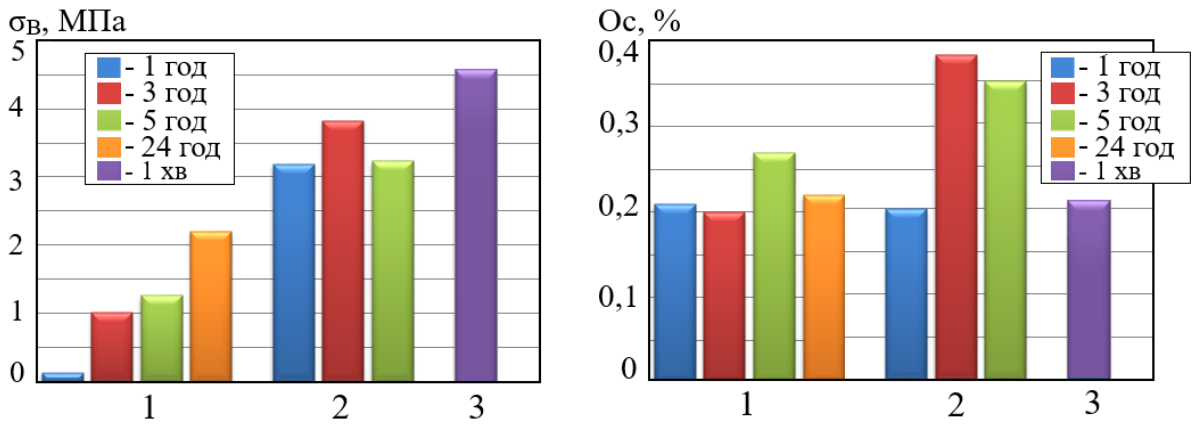
Суміш №2, яка складалась зі 100% кварцового піску, 3,5% РС та 0,5% води, після механічного ущільнення витягали з оснащення і структурували шляхом виключно мікрохвильової обробки (сушіння).

Вплив способу затвердіння та часу витримки на повітрі на міцність на вигин та обсипальність представлені на рис. 1.5 [210].

Встановлено, що комбінування хімічного та мікрохвильового затвердіння призводить до найбільшого підвищення міцності та зменшення обсипальності структурованих ПРС, а також значно знижує час їх затвердіння [54].

У роботі [211], використовуючи суміш аналогічну роботі [53], виготовляли зразки шляхом віброущільнення з їх подальшою обробкою мікрохвильовим випромінюванням протягом 60...360 с. Встановлено, що оптимальний час обробки ПРС мікрохвильовим випромінюванням становить 240 с, що забезпечує структурованим ПРС стабільність властивостей.

У роботі [212, 213] автори досліджували вплив вмісту РС від 1% до 5% та 0,5% води у ПРС, ущільненої 3 ударами копра та висушеної мікрохвильовим випромінюванням протягом 4 хв, на її властивості.



а б

Рисунок 1.5 – Вплив способу затвердіння та часу витримки на повітрі на міцність на вигин (а) та обсипальність (б) ПРС: 1 – суміш № 1 (затвердіння складними ефірами); 2 – суміш № 1 (затвердіння складними ефірами та обробкою мікрохвильовим випромінюванням); 3 – суміш № 2 структурована мікрохвильовим випромінюванням

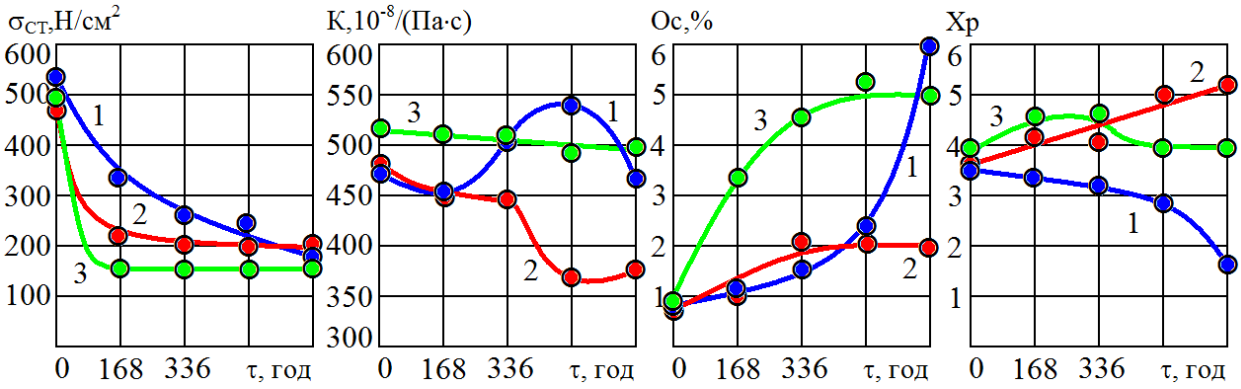
Встановлено, що вже при вмісту 1% РС суміш набуває достатній для ЛФС рівень фізико-технологічних та механічних властивостей. Рекомендований авторами [212, 213] вміст РС в ПРС при мікрохвильовому сушінні становить 1,5%.

Визначаючи при кімнатній температурі величину залишкової міцності на стиск ПРС з 1,5...3,5% РС та 0,5% води, висушених мікрохвильовим випромінюванням та попередньо нагрітих від 100 до 1200 °С протягом 30 хв, автори роботи [214] встановили, що у зразках мікрохвильового сушіння руйнування манжет при стиску носить адгезійний характер в інтервалі попереднього нагріву зразків від 100 до 750 °С. При температурах попередньо нагрітих зразків більше 750 °С, характер руйнування переходить з адгезійного до когезійного. При цьому, найменшою міцністю на стиск (0,6 МПа) характеризуються ПРС з 1,5% РС, які були попередньо нагріті від 300 до 1200 °С.

У роботі [55] автори досліджували вплив відносної вологості повітря (40...80%) та тривалості витримки в ньому зразків з ПРС з 1,5% РС (M_{SIO2}=2,5) та 0,5% води після мікрохвильового сушіння на їх властивості. Випробовувану

ПРС вібраційно ущільнювали та сушили у мікрохвильовому випромінюванні з частотою 2,45 ГГц та потужністю магнетрону – 1 кВт протягом 4 хв.

Результати досліджень представлені у вигляді залежностей на рис. 1.6 [55].



а б в г

Рисунок 1.6 – Залежність міцності на стиск (а), газопроникності (б), обсипальності (в) та крихкості (г) висушених ПРС від тривалості їх витримки на повітрі за його відносної вологості: 1 – 40%; 2 – 60%; 3 – 80%

З аналізу перебігу залежностей на рис. 1.6 витікає, що зі збільшенням часу витримки та відносної вологості повітря міцність на стиск ПРС зменшується, обсипальність зростає, газопроникність знаходиться в межах 375...525 од. При цьому обсипальність у всіх зразків неприпустимо висока, крихкість, яка розрахована за даними авторів та формулою (1.1), підвищується при відносній вологості повітря 40% та 80%, але знижується при відносній вологості 60%. За результатами досліджень автори [55] рекомендують ЛФС з ПРС після мікрохвильового сушіння зберігати при зниженій відносній вологості повітря.

Розглядаючи питання про властивості ПРС, що структуровані мікрохвильовим випромінюванням, слід зазначити, що автори робіт [53…55, 211…214] в дослідженнях використовували свіжоприготовлені ПРС, які ущільнювали набиванням в оснащенні та сушили їх за межами оснащення.

Як свідчить практика використання таких сумішей, їх сушіння мікрохвильовим випромінюванням дійсно потрібно вести поза межами оснащення, що в більшості випадків неможливо реалізувати через їх вкрай низьку сиру міцність [210]. Тому дані робіт [53…55, 211…214] мають виключно інформаційну цінність з обмежено практичним значенням.

Ускладнена вибиваємість з виливків стрижнів з ПРС – одна з проблем формоутворення, якій присвячено значне число публікацій і винаходів [58, 276, 415...417, 421, 422 і ін.]. Ускладнена вибиваємість (висока робота руйнування) ПРС зумовлена розплавленням при 800...900 °С дегідратованого СН в суміші від РС за рахунок теплоти залитого в форму розплаву [58]. Перехід СН під дією температури в рідкий стан, в свою чергу, призводить до часткового розчинення в ньому поверхневого шару зерен кварцового піску. В кінцевому рахунку це не тільки підвищує адгезійну складову міцність манжет з СН до частинок кварцового піску в ПРС, але і сприяє появі шару осклованої маси на поверхні виливка, яка на відмінність від використаного в ПРС СН відрізняється хімічним складом (підвищеним силікатним модулем) та, відповідно, фізичними властивостями.

Зменшення кількості РС в ПРС до 3% значно знижує товщину такого осклованого шару і, практично, вирішує проблему вибиваємості структурованих ПРС з виливків [214]. Однак зі зниженням вмісту РС зменшується і міцність ПРС, що негативно позначається як на властивостях ЛФС, так і на якості виливків.

Як результат, на сьогодні є чотири основні напрямки технологічного вирішеннях даної проблеми, а саме:

- використання в складі ПРС ТД, що руйнують або розпушують структуру міжзеренних манжет з СН при нагріванні ПРС до 800...900 °С за рахунок їх вигоряння, випаровування, деструкції, розширення, втрати початкової міцності, тощо (пилоподібний деревний пек, бітум, графіт, кокс, папір, парафін, полімери і ін.) [59, 416, 418, 419];

- використання в складі ТД, що при кімнатній температурі або при

нагріванні утворюють з СН речовини з більш високою температурою плавлення (глина, боксит, крейда, металургійний пил, кальційборфосфат тощо) [420, 423].

- зменшення вмісту РС в ПРС до 3,0...3,5% (за масою), з одночасним збільшенням міцності затверділого РС [417];

- зменшення вмісту РС в ПРС до 1,5...2,5% (за масою) з використанням мікрохвильового випромінювання для структурування суміші [157, 214].

Перші два напрямки, вирішуючи проблему вибивання, не вирішують проблему регенерації піску, його рециклінгу в ливарному цеху або подальшої утилізації ПРС, що знижує їх перспективність. Модифікування РС з метою підвищення його міцності в затверділому стані при одночасному зниженні в ПРС до 2...3% (третій напрямок), також вирішуючи проблему вибивання, не вирішує проблему регенерації піску та подальшої утилізації ПРС.

Зменшення вмісту РС в ПРС до 1,5...2,5% (за масою), з використанням мікрохвильового випромінювання для структурування суміші за даними [214] доволі ефективно і вирішує ряд проблем по скороченню енергоємності процесу сушіння стрижнів, по зниженню роботи вибивання стрижнів з виливків, регенерації відпрацьованої суміші. При цьому, такий спосіб структурування ПРС має суттєвий недолік, зумовлений тим, що реалізація такого процесу можлива лише при зовнішньо-механічному способу ущільнення ПРС в стрижневому ящику та проведенні сушіння стрижнів поза межами стрижневого ящику, що зумовлено характером переносу вологи в суміші під дією мікрохвильового випромінювання.

Крім того, ефективність мікрохвильової сушки залежить від природи матеріалів ПРС [406], від величини силікатного модуля РС, маси кварцового піску і маси води в резонаторі [407], природи зернистого вогнетривкого матеріалу суміші [408] тощо.

Для вирішення цієї проблеми мікрохвильового сушіння використовують комбіновані способи виготовлення стрижнів. Зокрема, за кордоном ця ідея реалізована в технології AWB (Minelco), де в складі ПРС використовують

модифіковане РС зниженої в'язкості, а сушку стрижнів проводять спочатку в гарячому стрижневому ящику з подальшим сушінням стрижня в мікрохвильовому випромінюванні малої потужності [409]. Для підвищення міцності структурування ПРС виконують в два етапи – на першому етапі механічно ущільнену ПРС продувають вуглекислим газом, а на другому етапі – обробляють мікрохвильовим випромінюванням [410].

Вирішенням цих проблем ПРС є їх дегідратація в полі мікрохвильового випромінювання з одночасним зниженням вмісту РС в ПРС до 1,5...3,5% (за масою) та для підвищення первинної міцності та зниження обсипальності додатково вводити в ПРС під час її приготування 0,5% води [131, 411, 412].

В роботі [413] автори зазначають, що міцність ПРС, структурованих в результаті сушіння мікрохвильовим випромінюванням залежить від кількості РС в суміші і потужності мікрохвильового випромінювання. Тобто, зі зниженням вмісту РС в ПРС від 5,0% до 1,5% межа міцності при розтягуванні знижується з 3,5...3,0 МПа до 1,0 МПа. При цьому ПРС з вмістом 1,5% РС незалежно від потужності мікрохвильового випромінювання характеризується стабільною величиною міцності при розтягуванні дорівнює 1 МПа, яка не залежить від потужності використаного мікрохвильового випромінювання. Зі збільшенням вмісту РС в ПРС більше 1,5% автори рекомендують підвищити потужність мікрохвильового випромінювання з 270 Вт до мінімум 450 Вт. В іншому випадку такі ПРС не структуруються.

Найбільшу міцність ПРС набуває після сушки в мікрохвильовому полі потужністю від 450 Вт до 630 Вт при кількості в суміші РС менш 3,5%. Найбільш стабільною міцністю характеризуються ПРС з вмістом РС від 1,5% до 2,5%. При цьому автори зазначають, що мікрохвильова сушка ПРС на відміну від традиційних способів сушіння забезпечує значне скорочення і енергоємності процесу сушіння, покращує вибиваємість суміші з виливків.

Дослідженнями М. Стаховича з співавторами встановлено, що робота вибивання ПРС залежить від структури манжет і, відповідно, від характеру їх руйнування. При цьому, адгезійний механізм руйнування міжзеренних

манжет притаманний для ПРС, які попередньо були нагріті до 100...750 °С. При 750 °С відбувається перехід механізму руйнування ПРС від адгезійного до когезійний, який зберігається аж до 900 °С. При температурі попереднього нагрівання понад 900 °С, відбувається часткове плавлення СН і його розтікання по поверхні зерен суміші.

Відмінністю ПРС, структурованих (висушених) мікрохвильовим випромінюванням від загальноприйнятих способів, є низька робота вибивання після їх попереднього нагрівання більше 500 °С, про що, зокрема, свідчать залежності залишкової міцності ПРС на стиск при кімнатній температурі від температури їх попереднього нагріву на рис. 1.7.

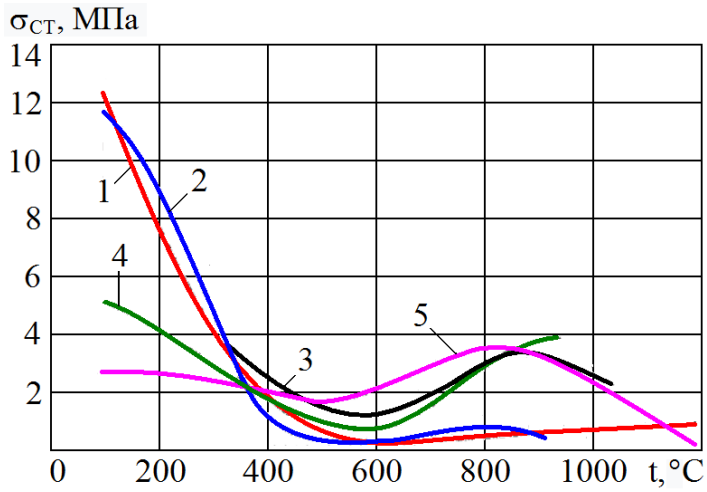


Рисунок 1.7 – Вплив температури попереднього нагріву ПРС на їх залишкову міцність на стиск [413]: 1 – сушка в мікрохвильовому випромінюванні (вміст РС 2,5%, M_{SIO2} = 2,50); 2 – сушка в мікрохвильовому випромінюванні (вміст РС 3,0%, M_{SIO2} = 2,75); 3 – затвердіння РС під дією рідкого ефіру Flodur 1 (вміст РС 2,5%, M_{SIO2} = 2,0); 4 – затвердіння РС, модифікованого рідким ефіром Flodur 1 (вміст РС 2,5%, M_{SIO2} = 2,04); 5 – затвердіння РС під дією вуглекислого газу (CO_2-процес)

Слід зазначити, що на відміну від традиційно застосовуваних у ливарних цехах стрижневих ящиків з металевих сплавів, дерева, епоксидної смоли з наповнювачем і т.п., в якості матеріалу оснащення для обробки ПРС

мікрохвильовим випромінюванням автори роботи [414] рекомендують використовувати як нові, так і відпрацьовані тефлони, оскільки ці матеріали мають кращі з досліджених матеріалів діелектричні властивості і, відповідно, найменший коефіцієнт втрат потужності мікрохвильового випромінювання. Менш придатний для цих виробів пенополітрафторетілен. Не рекомендовано для такого оснащення використовувати композиційний матеріал на основі епоксидної смоли і бавовняної тканини.

Тобто, суттєвим недоліком ПРС є висока залишкова міцність, що підвищує трудоємність або робить неможливим вибивання стрижнів з виливків. Існуючи способи поліпшення вибиваємості не дозволяють у повній мірі вирішити цю проблему.

Одним з перспективних сучасних напрямків комплексного вирішення проблеми зменшення роботи вибивання та утилізації відходів ЛФС з ПРС – є спосіб ПМЗ-процес [157]. Принциповою відмінністю ПМЗ-процесу від відомих способів є використання в складі суміші виключно піску і сполучного матеріалу (немодифікованого РС) без будь-яких ТД, його затвердіння дегідратацією в паро-мікрохвильовому середовищі та переважно «адресний» розподіл сполучного матеріалу в міжзеренному просторі ПРС.

1.5.4 Механізм поризації (спінювання) рідкого скла

Під час швидкого нагрівання, що реалізується, і під дією мікрохвильового випромінювання, при досягненні 100 °С РС поризується – спінюється. Пороутворюючою речовиною РС в процесі його поризації шляхом нагрівання є його вода. Окрім відповідної температури та наявності води необхідною умовою проходження процесу поризації також є знаходження РС в піропластичному стані. Тобто, при певному вмісті води в РС температура початку його дегідратації T_d повинна перевищувати температуру його склування T_g [215].

За даними [216, 217] найбільш інтенсивне утворення пор у РС проходить при температурі 120...250 °С – в період знаходження РС в пропластичному стані та найбільш інтенсивного виділення з нього вільної та адсорбційної води. При цьому, як зазначає Кудяков А.І. і Свергунова Н.А., дані закономірності притаманні всім РС і не залежать від їх силікатного модуля [218]. В той же час, за даними Григор'єва П.М. і Матвєєва М.А., основна кількість вільної та адсорбційної води при нагріванні РС з M_{SiO2}=3,0 видаляється при температурі 130...150 °С [111].

За даними Генералова Б.В. із співробітниками, вода з РС (M_{SiO2}=2,5...3,0) з твердими наповнювачами виділяється при температурі 120...350 °С [219], а за даними І.В. Рижкова і В.С. Толстого [220] поризація РС практично повністю завершується при температурі 200...250 °С і не залежить від величини силікатного модуля РС. Хімічно пов'язана вода з гідросилікатів при поризації РС видаляється при температурі 600...800 °С після чого завершується його аніонна поліконденсація [221].

На думку Кудякова А.І., Свергунова Н.А. та Іванова М.Ю., представляючи у вихідному стані РС у вигляді гранули із затверділою оболонкою кремнегелю на поверхні, поризація РС при його нагріванні проходить у два етапи за механізмом, принципова схема якого представлена на рис. 1.8 [222].

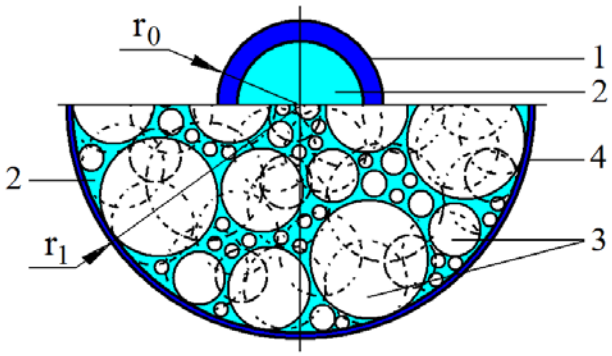


Рисунок 1.8 – Принципова схема рідкоскляної гранули до та наприкінці поризації: 1 – оболонка з кремнегелю вихідної (формованої) гранули; 2 – в'язкопластичне РС; 3 – пори; 4 – оболонка поризованої гранули

Відповідно до уявлень авторів роботи [222], у вихідному стані гранула РС 1 (див. рис. 1.8) має радіус r_0 і являє собою капсулу в'язкопластичного РС, зовнішня оболонка якої – щільний кремнегель, що виник у результаті хімічної взаємодії поверхні краплі РС з вуглекислим газом повітря.

На першому етапі поризації при нагріванні від зовнішнього джерела тепла кремнегель у зовнішній оболонці 2 розм'якшується і при температурі 100 °С переходить у в'язкопластичний стан (див. рис. 1.8).

На другому етапі, з підвищенням температури у глибинних шарах РС гранули, вода переходить у пару, що підвищує газовий тиск в гранулі і призводить до її розширення до радіусу r_1. При цьому її малопроникла для водяної пари зовнішня оболонка, ставши пластичною, розтягується, РС під оболонкою при зневодненні переходе з в'язкопластичного у піропластичний стан, а внутрішня порожнина гранули наповнюється порами 3.

За даними Кутугіна В.О. [223] процес поризації в частково дегідратованому РС, яке наповнено технологічними домішками (РСК), складається з трьох етапів, тривалість протікання яких залежить від виду та кількості води у матеріалі, що поризують.

Відповідно до [223] на першому етапі поризації проходить нагрівання РСК до температури 100...120 °С, частковий перехід РСК в псевдопіропластичний стан з деяким збільшенням його в об'ємі.

Другий етап проходить при температурі 130...150 °С і супроводжується не тільки інтенсивним виділенням вільної та адсорбційної води, а й поризацією РСК.

Третій етап поризації РСК проходить при температурах понад 150 °С і супроводжується видаленням конституційної води, залишковою перебудовою структури РСК і завершенням фізико-хімічних процесів, що проходять в ньому.

Механізм поризації оцінюють за величиною уявної енергії активації ($E_П$) цього процесу. Зокрема, за даними [223], в інтервалі температур 100...120 °С величина $E_П$ складає 15...30 кДж/моль (для чистого РС $E_п$=24,57 кДж/моль), що відповідає рівню енергії, яка витрачається на розрив водневих зв'язків в РС. При температурі 120...400 °С величина $E_П$=40...100 кДж/моль і

притаманна механізму в'язкої течії РС. Для чистого РС при температурі більше 120 °С величина Еп = 36,25 кДж/моль.

Енергія активації при нагріванні РС за даними [224] надана в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Температурні інтервали (етапи), температура максимально інтенсивного випаровування (t_{MAX}) та енергія активації ($E_П$) випаровування води з РС [223]

Склад	Етап 1 (t=25...95 °С)		Етап 2 (t=95...220 °С)		Етап 3 (t=220...610 °С)	
	t_{MAX}, °С	$E_П$, кДж/моль	t_{MAX}, °С	$E_П$, кДж/моль	t_{MAX}, °С	$E_П$, кДж/моль
РС без розбавлення	80	15,76	110	17,28	610	39,72
РС з розбавленням водою на 50%	-	-	120	25,85	550	31,3
РС з розбавленням водою на 90%	-	-	100	19,89	490	20,15

Для визначення величини $E_П$ використовують метод ізоординатних перетинів, де в якості залежної змінної в кінетичних дослідженнях процесу поризації використовують параметр α_n – ступінь перебудови структури РС [223, 225]. Тобто, на основі кінетичних даних процесу поризації будують графічні залежності $\ln(1-\alpha_n)=f(\ln\tau)$, де τ – час досягнення в структурі РС заданої величини α_n, і для прямих ділянок графічних залежностей, при заданому α_n, розраховують $E_П$ за формулою, кДж/моль [223, 226]:

$$E_{П} = \frac{R(\ln\tau_1 - \ln\tau_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \qquad (1.14)$$

де R – універсальна газова постійна, R = 8,314 Дж/(моль·К);

T_1, T_2 – початкова та кінцева температура системи відповідно, К;

τ_1, τ_2 – час досягнення α_n = 0,8 при температурі T_1, T_2 відповідно, с.

Зокрема, за даними [226], процес поризації РСК з використанням H_2O_2

під дією мікрохвильового випромінювання характеризується двома значеннями уявної енергії активації, а саме 27,64 кДж/моль (при 100...105°С), що відповідає енергії розриву водневих зв'язків та інтенсивній поризації РСК за рахунок випаровування води та розкладання газоутворювача (H_2O_2), і 116,98 кДж/моль (при 115...120 °С), що вказує на переважання механізму в`язкої течії під час послідуючої поризації РСК.

В даний час дані про механізм переносу РС, питому енергію активації поризації РС в ПРС під час її структурування за ПМЗ-процесом не відомі.

1.6 Теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей

Механічні та експлуатаційні властивості ливарних сплавів структурно-чутливі, тобто залежать як від хімічного складу сплаву, так і від швидкості його затвердіння [227…231]. Зміна швидкості затвердіння сплаву призводить до зміни дисперсності його дендритної структури, розподілу та морфології його фазових складових [232…235], відстані між вторинними вісями дендритів та кількості вторинних фаз між ними, величини та розподілу в об’ємі усадкових дефектів тощо, що, зрештою, позначається на механічних, технологічних та експлуатаційних властивостях литої деталі.

Швидкість затвердіння практично будь-якого виливка багато в чому визначається рівнем теплофізичних властивостей використаної формувальної суміші [236], в числі яких: питома теплоємність (c_2), теплопровідність (λ_2), температуропровідність (a_2), теплоакумулююча здатність (b_2) та питома щільність (ρ_2). Дані параметри є базовими для моделювання процесів затвердіння виливків та прогнозуванні їх якості і властивостей, які виконують як аналітичними, так і чисельними методами [237...239].

Точність такого прогнозу великою мірою залежить від адекватності використаних величин теплофізичних параметрів матеріалу ливарної форми. Тим не менш, в даний час відомі експериментальні дані про теплофізичні параметри формувальних і стрижневих матеріалів фрагментарні і, як правило, безсистемні.

Використання таких даних у будь-якому моделюванні разом із прийнятими припущеннями під час створення математичних моделей досліджуваних процесів призводить до значних невідповідностей прогнозів реальним результатам. Тобто, використання таких даних, як інформаційне забезпечення моделюючих систем неприпустимо.

Особливістю теплофізичних властивостей будь-якого зернистого матеріалу та його сумішей є їх залежність від температури і щільності зернистого матеріалу та його сумішей. Як наслідок, в умовах нестаціонарної теплопередачі облік безперервної зміни даних параметрів для виливків складної конфігурації можливий тільки при знанні закономірностей зміни теплофізичних властивостей від цих параметрів та використання чисельних методів розрахунку.

На відміну від чисельних методів, аналітичні методи розрахунку дають вельми достовірні уявлення комплексного впливу змінюваних теплофізичних параметрів на досліджуваний процес лише для виливків простої конфігурації (плита, куля, циліндр та ін.).

В інженерних аналітичних розрахунках тривалості затвердіння та охолодження виливків у формах на пропозицію А.І. Вейніка та Г.А. Анісовича використовують інтегрально-ефективні значення теплофізичних величин [240…244], які залежать від товщини стінки виливка, властивостей сплаву, що заливається у форму, про що свідчать дані табл. 1.9 та табл. 1.10 [245] від властивостей зернистого вогнетривкого матеріалу суміші (наповнювача), про що свідчать дані табл. 1.11 [86] тощо.

З аналізу даних табл. 1.9...1.11 випливає, що будь-які інтегрально-ефективні значення теплофізичних величин характерні тільки для тих умов затвердіння, тільки для даного виливка і тільки для того металу (сплаву), який був використаний. Тим не менш, на сьогодні дані про інтегрально-ефективні значення теплофізичних параметрів ПРС, структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі відсутні. Таке положення не дозволяє оцінити реальні можливості впливу ПРС, структурованих у паро-мікрохвильовому середовищі, на процеси живлення та формування виливків.

Таблиця 1.9

Вплив товщини стін чавунного виливка (δ) на теплофізичні властивості ПГС [245]

δ, мм	$\rho_2, \frac{кг}{м^3}$	$c_2, \frac{Дж}{кг \cdot °C}$	$\lambda_2, \frac{Вт}{м \cdot °C}$	$a_2 \cdot 10^6, \frac{м^2}{с}$	$b_2, \frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2 \cdot °C}$
10	1700	992	1,100	0,40	1372
20	1760	963	1,380	0,50	1540
30	1720	1030	1,550	0,53	1660
50	1670	1063	1,640	0,56	1708

Таблиця 1.10

Теплофізичні властивості ПГС при литті алюмінію, чавуну та сталі [245]

Метал, сплав	$t_{КР}$, °С	$\rho_2, \frac{кг}{м^3}$	$c_2, \frac{Дж}{кг \cdot °C}$	$\lambda_2, \frac{Вт}{м \cdot °C}$	$b_2, \frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2 \cdot °C}$
Алюміній	660	400	1070	0,400	775
		1600	1030	0,451	860
		1750	1000	0,518	945
Чавун	1147	1400	1300	0,732	1157
		1600	1280	0,715	1210
		1750	1237	0,707	1300
Сталь (С=0,3%)	1487	1400	1425	0,898	1340
		1600	1425	0,840	1383
		1750	1380	0,828	1420

Таблиця 1.11

Теплофізичні властивості ПРС [86]

Властивості	Зернистий вогнетривкий наповнювач ПРС				
	Кварц	Дістен-силіманіт	Циркон	Хромомагнезит	Хроміт
b_2, Вт·с^{0,5}/(м^2·°С)	1260	1470	1820	2100	2380
$a_2 \cdot 10^6$, м^2/с	0,67	0,89	0,92	-	-

1.7 Кінетика сушіння капілярно-пористих тіл

Кінетика сушіння капілярно-пористих тіл є фундаментальними знаннями з великим практичним значенням. Маючи в своєму розпорядженні такі данні, визначають кількість і види існування вологи в матеріалах, що висушують, призначають спосіб сушіння, оптимізують її режим і оцінюють енергоємність процесу, визначають тип і розраховують число необхідного обладнання, розраховують енергію активації етапів процесу і т.д.

Вивченню кінетики сушіння процесів тепло- та масопереносу в капілярно-пористих пов'язаних та незв'язаних, моно- та полідисперсних середовищах присвячено значну кількість робіт [166, 246…252 та ін.]. Причина цього – нескінченна різноманітність матеріалів, їх капілярно-пористих структур, розмірів тіл, умов та форм їх існування, властивостей та областей застосування у техніці, медицині, сільському господарстві, харчовій промисловості тощо.

Як правило, кінетику сушіння будь-якого тіла представляють у вигляді термограми сушіння або у вигляді залежності зміни маси тіла в часі і тому подібними способами для тих чи інших умов сушіння. Зокрема, розглядаючи питання кінетики сушіння, А.В. Ликов [253] зазначає, що загальний вигляд термограми ізотермічного сушіння тонкого зразка будь-якої речовини та кількість критичних точок на ній залежать виключно від диференціальної водопоглинаючої здатності даної речовини по відношенню до вологи різних форм та видів зв'язку.

На пропозицію П.А. Ребіндера, за формою зв'язків вологи з твердим матеріалом поділяють на фізико-хімічну та фізико-механічну [249, 254].

В промисловості, як правило, використовують термограми та криві кінетики сушіння того чи іншого капілярно-пористого матеріалу, які, в якості прикладу, представлено на рис. 1.9 для двох форм зв'язку в капілярно-пористому матеріалі води [253, 255].

Відповідно до рис. 1.8, період часу нагрівання $0…\tau_1$ відповідає вологому стану тіла, період часу більше τ_1 – гігроскопічному стану. Форми зв'язку

вологи з тілом, що висушується, на рис. 1.9 розділені критичними точками. При цьому, до вологи з фізико-механічним зв'язком з капілярно-пористим тілом відноситься волога ділянок б, в, до вологи з фізико-хімічним зв'язком – волога ділянок а, г, д.

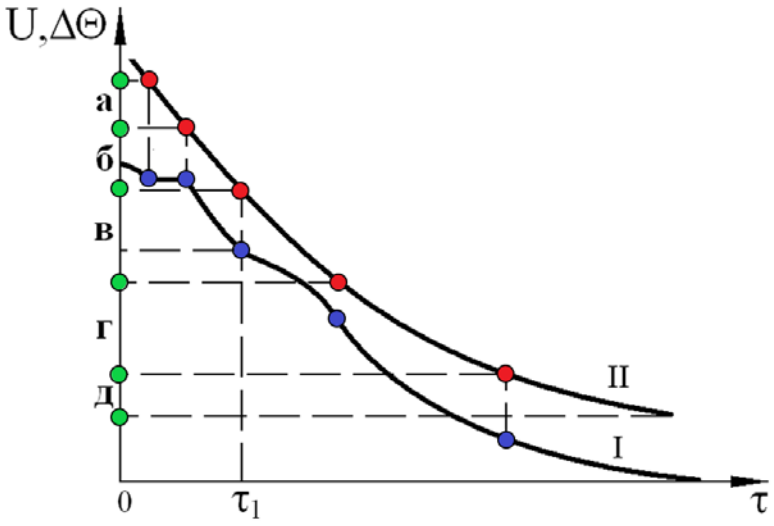


Рисунок 1.9 – Термограма сушіння (I) та крива кінетики сушіння (II) капілярно-пористих матеріалів різної природи, де види зв'язку вологи: а – осмотична волога колоїдного тіла або волога капілярного стану в порах з радіусом понад 10^{-5} см; б – стикова волога в порах радіусом більше 10^{-5} см; в – капілярна волога мікропор радіусом менше 10^{-5} см; г – волога полімолекулярної адсорбції; д – волога мономолекулярної адсорбції

В даний час, стосовно капілярно-пористих тіл, під кінетикою сушіння також мають на увазі залежність зміни в часі середнього значення вологості (маси води) [256] або температури [257], або питомої швидкості випаровування вологи з висушуваного матеріалу (піску, ПРС) або виробу (ЛФС). При цьому для опису етапів сушіння кварцового піску, ПГС, ПРС тощо, радіаційним або конвективним нагріванням використовують наступну класифікацію видів води [258]:

- вільна або гравітаційна (температура випаровування 100 °С),

- гігроскопічна або адсорбційна (температура випаровування 103...108 °С),
- кристалізаційна або гідратаційна (температура випаровування – 300 °С),
- конституційна (температура випаровування 300...1000 °С).

На сьогодні в процесі сушіння капілярно-пористих тіл, як правило, виділяють три періоди [259]. Перший період триває до досягнення тілом, що висушується, температури 100 °С і характеризується підвищенням температури тіла і швидкості випаровування вологи з його поверхні. Другий період характеризується незмінністю швидкості сушіння і температури тіла, що висушується, досягнутих у першому періоді. Третій період характеризується зниженням (аж до нуля) швидкості сушіння та монотонним підвищенням температури тіла. Інтенсивність масопереносу у цей період лімітується як зовнішньою і внутрішньою дифузією вологи у тілі, а перенесення теплоти стає залежним як від умов зовнішнього, так і від внутрішнього теплообміну.

Особливостями нагрівання мікрохвильовим випромінюванням від інших традиційних способів є: збіг векторів перенесення вологи та тепла в капілярно-пористих тілах (з середини до поверхні), селективність нагрівання та залежність її рівня від величин діелектричних проникностей кожного компонента суміші. Ці особливості призводять до того, що швидкість сушіння мікрохвильовим випромінюванням значно вища, ніж сушіння конвективним теплообміном [260…263]. При цьому, з підвищенням потужності мікрохвильового випромінювання підвищується і швидкість сушіння, а кожному значенню потужності мікрохвильового випромінювання відповідає певна ефективна маса матеріалу, що висушується.

Досліджуючи властивості ПРС, висушених мікрохвильовим випромінюванням, автори роботи [264] відзначають, що разом із високою міцністю ПРС набувають і високої схильності до поглинання вологи з повітря. При цьому вплив вмісту в піску РС в межах від 1 до 2% і потужності мікрохвильового випромінювання в межах від 700 до 2000 Вт на міцність затверділої свіжоприготовленої суміші неоднозначний, хоча і простежується

певна прямо пропорційна залежність між міцністю ПРС і потужністю мікрохвильового випромінювання.

У числі компонентів ПРС, що структурують за ПМЗ-процесом, є вода в рідкому та пароподібному стані, кварцовий пісок, СН та його водний розчин. При цьому, величини діелектричної проникності кварцового піску і СН хоч і різні, але із зміною температури під час реалізації ПМЗ-процесу мало змінюються. У той же час діелектрична проникність води з підвищенням температури значно зменшується, що, зокрема, випливає з формули [265]:

$$\varepsilon = 24{,}174\frac{N \cdot \rho \cdot \mu^2}{M \cdot k \cdot T} - 7{,}180\,, \qquad (1.15)$$

де N – число Авогадро;

ρ – питома щільність води (пара) при температурі Т;

μ – дипольний момент молекули води;

М – молекулярна маса води;

k – стала Больцмана;

Т – температура.

Якщо прийняти, що $N=6{,}02209\cdot10^{23}$, $\mu=0{,}0473\cdot10^{-23}$; М=0,018 кг і $k=1{,}38066\cdot10^{-23}$, а питому щільність води в інтервалі температур від 283 до 373 К розрахувати за рівнянням:

$$\rho = 327{,}6447399 + 5{,}9221562\cdot T - 0{,}0162779\cdot T^2 + 0{,}0000132\cdot T^3,$$

де Т – температура води, К;

то виявиться, що при 20 °С величина ε = 81, а при 100 °С ε = 51.

У стані пари діелектрична проникність води стає близькою до 1 [266]. З цього можна припустити, що оскільки при мікрохвильовому сушінні ПРС водяна пара не нагрівається, то кінетику сушіння ПРС у мікрохвильовому випромінюванні визначає її вода.

У випадках, коли суміш, що висушується, містить легкоплавку або розчинну у воді сполучну речовину, процес сушіння такої суміші супроводжується ще і її структуруванням. Механізми структурування сумішей з різними за природою сполучними матеріалами характеризуються низкою важливих відмінностей. Зокрема, глини тверднуть за коагуляційним механізмом, коли невеликий вміст води в глині перетворює її на в'язку висококонцентровану колоїдну масу з високими адгезійними властивостями по відношенню до піску, а після видалення води – у твердий та міцний конгломерат вихідних мікрочастинок. Твердіння гіпсу та цементу відбувається в результаті їх замішування з водою, яка є одним з компонентів реакцій гідратації та утворення нових кристалогідратів певної форми [267…269]. Фосфатні сполучні тверднуть за коагуляційно-поліконденсаційним механізмом [270], термореактивні смоли – за поліконденсаційним механізмом [271, 272] і т.д. У той же час, РС може твердіти за механізмом поліконденсації з виникненням в ньому нових твердих в'яжучих хімічних сполук [268, 273, 274] або за коагуляційним механізмом в результаті дегідратації (в результаті зневоднення або використання певних органічних сполук) [105, 194, 268] зменшення його водневого показника, підвищення силікатного модуля тощо.

При невисокій швидкості зовнішнього нагріву РС твердне при 100 °С і містить 17...35% за масою залишкової води [105,220, 275]. Вода, що залишилася в РС, є гідратною і видаляється шляхом дифузії при вищій температурі зі швидкістю меншою, ніж швидкість видалення вільної води. Повне зневоднення РС (видалення останніх 3...4% води) та його перетворення на СН відбувається при 600 °С [105].

Збільшення інтенсивності нагріву РС з метою скорочення тривалості його сушіння призводить не тільки до інтенсивного зневоднення РС, але й до спінювання, і, відповідно, зміни властивостей структурованої ПРС. Причина спінювання, на думку, [105, 220] – перевищення тиску пари в глибинних шарах РС величини атмосферного тиску або значний градієнт вмісту вологи по глибині або шару затверділого РС.

З викладеного витікає, що кінетика сушіння є комплексним відображенням процесів тепло- і масопереносу, які проходять у капілярно-пористих тілах при їх нагріванні та за певних умов формують рівень фізичних, хімічних, технологічних, споживчих та експлуатаційних властивостей цих тіл. При цьому дані про кінетику сушіння ПРС, яка в ПМЗ-процесі поєднана в часі та просторі з її структуруванням, дотепер відсутні.

1.8 Дефекти та загальні недоліки ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей

Поверхневі дефекти ЛФС з будь-яких сумішей – це зворотний відбиток майбутніх поверхневих дефектів на виливках, а невідповідність властивостей ЛФС необхідному рівню – запорука виникнення на виливках як внутрішніх, так і поверхневих дефектів.

Дефекти ЛФС притаманні всім способам формоутворення та всім видам ФСС. При цьому, число дефектів виливків, обумовлених якістю та властивостями ЛФС, в загальному об'ємі дефектів, складають: 55...65% засори, 10...15% пригар, 15...20% гарячі тріщини, 5% газові раковини, 5% деформація геометрії виливків [84]. В той же час, аналіз видів браку виливків зі сталі, чавуну та бронзи масою від 5 до 200 кг в ливарному цеху ТОВ «ПК«Перспектива» (м. Дніпро) свідчить про те, що в загальному об'ємі браку (остаточному та виправному) від 11...62%, при використанні ЛФС з ПРС, що структуруванні за CO_2-процесом, засор складає 40...57%, спаї 22...38%, газові раковини 5...13%, руйнація форми до 6%, деформація геометрії виливків до 4%, гарячі тріщини до 3%, інші дефекти (пригар, усадкові раковини, недолив, корольки тощо) – до 9%.

Тобто, дефекти виливків, що зумовлені дефектами та рівнем властивостей ЛФС з ПРС у своїй більшості подібні до дефектів та рівню властивостей ЛФС з ФСС інших типів.

Різновиди та величина браку виливків багато в чому залежать від рівня

властивостей використовуємих ЛФС. В той же час, рівень властивостей ЛФС на основі ПРС багато в чому залежний від способу і умов їх виготовлення, тривалості і умов зберігання, режиму фізичної і температурної дії на них з боку виливків і т.д. [276, 277]. При цьому, незалежно від способу виготовлення ЛФС застосування хімічно інертних формувальних матеріалів з високою теплоакумулюючою здатністю запобігає появі у виливках багатьох дефектів [278], за умови дотримання технології виробництва, використання якісного, правильно спроектованого модельно-опочного оснащення і т.д.

Недоліки способів структурування та рівнів властивостей ЛФС з ПРС приведені в табл. 1.12 [103, 264, 276, 277, 279…293].

Таблиця 1.12

Недоліки способів структурування та рівнів властивостей ЛФС з ПРС

№ п/п	Недоліки способів структурування та рівнів властивостей ЛФС з ПРС	Спосіб структурування			
		Дегідратаційний (тепловий)	Хімічний затверджувач		
			газоподібний (CO_2)	твердий порошковий	рідкий
1.	Обмежена живучість суміші			+	+
2.	Висока енергоємність і/або тривалість виготовлення ЛФС	+/+		-/+	
3.	Низька оборотність модельно-стрижневого оснащення	+		+	
4.	Низька стабільність властивостей ЛФС		+	+	+
5.	Низька первинна міцність ЛФС	+	+	+	+
6.	Підвищена обсипальність, гігроскопічність ЛФС	+	+	+	
7.	Розтріскування поверхні ЛФС	+			
8.	Усадка при структуруванні				+
9.	Крихкість ЛФС		+	+	
10.	Висока газотвірна здатність ЛФС		+	+	+
11.	Токсичність деяких компонентів суміші			+	+
12.	Низький термін зберігання ЛФС	+	+		
13.	Низька піддатливість ЛФС відносно виливка	+	+	+	
14.	Висока енергоємність вибивання ЛФС з виливків	+	+		
15.	Висока енергоємність регенерації піску з суміші		+	+	+

До дефектів виливків, що найбільш часто зустрічаються, виникнення яких обумовлено низьким рівнем властивостей ЛФС з ПРС відносяться:

засмічення, спаї та газові раковини.

Засмічення виникає в результаті руйнування форми при протяжці моделі та спарюванні півформ через недостатню податливість ПРС, «заклинювання» суміші вузьких порожнинах моделі через відсутність усадки ПРС при структуруванні, при транспортуванні ЛФС через високу обсипальність структурованої ПРС і т.д. Спаї на виливках з'являються в результаті низької масової швидкості заливки розплаву у форму, невисокого перегріву розплаву, що заливають, недостатнього металостатичного напору у формі при заливці, неправильно спроектованої ливникової системи і т.п. Газові раковини у виливку, як правило, виникають внаслідок недостатньої газопроникності форми та підвищеної газотвірної здатності суміші тощо [84, 294…297 та ін.].

Розглядаючи властивості ЛФС з ПРС слід відзначити такий показник якості структурованих сумішей як обсипальність, оскільки саме величина даного показника визначає ймовірність не тільки появи у виливках засмічення, а й точність їх розмірів, і придатність ЛФС до використання після їх зберігання на повітрі тощо. Обсипальність ЛФС залежить від значної кількості факторів, серед яких [298…300]: природа компонентів суміші, фракційний склад суміші зернистого вогнетривкого матеріалу у ФСС, кількість у суміші сполучного матеріалу, його властивості та спосіб затвердіння, вид та кількість ТД у ФСС, вологість ФСС та гігроскопічність сполучного матеріалу, спосіб структурування та сушіння ФСС, термін зберігання суміші та готових ЛФС тощо.

Дослідженнями [264] властивостей ПРС, затверділих внаслідок їх обробки мікрохвильовим випромінюванням, продування вуглекислим газом, а також шляхом введення в РС ефіру встановлено, що затвердіння РС мікрохвильовим випромінюванням дозволяє отримати ПРС з 1,5...2,0% РС (за масою) з міцністю на стиск такої ж, як і у суміші, затверділою ефіром з 2,5...3,5% РС, і, затверділою вуглекислим газом з 5...6% РС. Однією з проблем ПРС, які були структуровані мікрохвильовим випромінюванням, є їх здатність поглинати вологу з навколишнього повітря. Зі збільшенням маси

РС у суміші до її затвердіння, збільшується і маса поглиненої вологи ПРС після структурування мікрохвильовим випромінюванням. Це явище, на думку Wang Jina та його співробітників, призводить до суттєвого збільшення обсипальності ЛФС, а також зниження їх міцності на стиск.

По суті, для успішного та широкого використання ПРС у ливарних цехах необхідно знайти комплексне вирішення проблеми, усунувши недоліки наведені у списку табл. 1.12. Тобто, по суті, для цього необхідно розробити та дослідити новий спосіб структурування ПРС, позбавлений зазначених у табл. 1.12 недоліків. Таким способом в даний час є спосіб структурування ПРС в паро-мікрохвильовому середовищі (ПМЗ-процес), відомості про який досі носять фрагментарний характер.

Проблемою застосування водних розчинів СН у виробництві ЛФС займалися багато вчених та дослідників, серед яких С.С. Жуковський С.С., Васін Ю.П., Берг П.П., Д.М. Кукуй, А.М. Лясс, П.А. Борсук та ін. [9, 15, 39,41, 58, 86, 103, 149, 276, 281]. Тим не менш, на сьогоднішній день:

- не визначена кінетика карбонізації у тонких шарах затверділого чистого РС та вплив ТД у РС на цей процес;

- не встановлені види дефектів, властивих ЛФС, структурованих за ПМЗ-процесом, механізм їх виникнення, не розроблені рекомендації щодо запобігання виникненню цих дефектів;

- не встановлені технологічні можливості виробництва ЛФС за способом ПМЗ;

- не встановлено вплив ЛФС, структурованих за ПМЗ-процесом на схильність до утворення пригару, структуру, шорсткість поверхні та розмірну точність виливків тощо.

1.9 Мета та завдання досліджень

Мета роботи – встановлення механізму, кінетики та закономірностей структурування в паро-мікрохвильовому середовищі сипучого кварцового піску, плакованого РС, і результату його застосування на властивості ЛФС,

якість дрібних виливків загальномашинобудівного призначення.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні ***завдання***:

1. Встановити кінетику, визначити енергію активації і розробити опис механізму структурування кварцового піску плакованого СН в середовищі водяної пари під дією мікрохвильового випромінювання.

2. Скласти матеріальний баланс та визначити допустимі температурні, часові і розмірно-масові межі структурування за ПМЗ-процесом.

3. Визначити раціональний рівень параметрів процесу структурування ПРС за ПМЗ-процесом та оптимізувати її склад.

4. Одержати функціональні залежності між рядом параметрів і властивостями ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом.

5. Дослідити та розробити опис механізму переносу РС та його дегідратації в капілярному каналі під дією мікрохвильового випромінювання.

6. Для шару плівкового типу з РС в умовах одностороннього контакту з повітрям встановити кінетику його карбонізації.

7. Встановити теплофізичні властивості ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом, та можливість їх використання в якості теплоізоляційного матеріалу при виробництві виливків

8. Визначити особливості нагрівання матеріалів та випаровування води в резонаторі мікрохвильової печі, що має номінальну потужність магнетрону від 700 до 1200 Вт та частоту випромінювання 2,45 ГГц.

9. Встановити особливості та визначити роботу вибивання з виливків стрижнів з ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом.

10. Дослідити механізм руйнування ПРС структурованих за ПМЗ-процесом, та вплив ливарних форм з цих сумішей на якість виливків.

11. Дослідити можливість склеювання структурованих ПРС під дією мікрохвильового випромінювання.

12. Встановити можливість виготовлення об'ємно-замкнутих ливарних форм за ПМЗ-процесом за одноразовими моделями.

13. Встановити причини та розробити опис механізмів виникнення дефектів, притаманних стрижням з ПРС, що структурують за ПМЗ-процесом.

14. Впровадити наукові та технологічні розробки досліджень в навчальний процес.

1.10 Висновки

1. З точки зору екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки, вартості, великотонажності виготовлення, походження та перспективності з числа сполучних матеріалів, що використовують для виготовлення ЛФС, є матеріали неорганічного походження, зокрема, натрієве РС.

2. З числа способів структурування ПРС найбільш перспективними є способи, які основані на дегідратації РС, зокрема під дією мікрохвильового випромінювання.

3. Для успішного використання ПРС, що твердіють під час їх мікрохвильової обробки необхідно знайти комплексне рішення задач, що дозволяють скоротити трудомісткість на формування, підвищити живучість суміші, скоротити час її структурування, підвищити міцність і пластичність ЛФС, знизити час та витрати на вибивання стрижнів з виливків.

4. Відомі способи модифікування РС та використання ТД в ПРС не дозволяють одночасно поліпшити рівень властивостей структурованих ПРС та вирішити проблеми регенерації з них кварцового піску. Тому найбільш перспективним комплексним вирішенням цієї проблеми є структурування ПРС мікрохвильовим випромінюванням без модифікування РС та використання ТД в ПРС, зокрема, структуруючи ПРС за ПМЗ-процесом.

5. На сьогодні відсутні рекомендації і дані щодо структурування ПРС за ПМЗ-процесом, нагрівання тіл та випаровування різної маси води в мікрохвильовому випромінюванні зі стоячими хвилями достатні для початку використання ПМЗ-процесу в промислових умовах.

6. На даний момент не встановлено механізм, кінетику та закономірності структурування плакованого СН кварцового піску під дією мікрохвильового випромінювання в середовищі насиченої водяної пари і

результату формування виливків в структурованих таким чином сумішах.

7. В наявний час не оптимізовано склад ПРС та параметри структурування сумішей за ПМЗ-процесом, не встановлено їх властивості, умови використання, не досліджено механізм переносу маси РС в капілярних каналах ПРС тощо.

8. На основі отриманих даних розроблено мету та сформульовано задачі досліджень.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ, ПРИБОРИ, ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали

У роботі використовували:

– кар'єрний кварцовий пісок марки $1К_2О_202$, $2К_1О_3016$, $1К_3О_302$ за ГОСТ 2138-91 з подальшим вимучуванням до вмісту глини 0,1% (за масою), дистильовану та водопровідну воду, натрієве РС (ГОСТ 13078-81) з $М_{SIO2}$ = 2,8...3,0 і питомою щільністю 1,42...1,44 г/см^3, графіт сріблястий (ГОСТ 5279-74);

– концентрат ільменіту (ТУ-У: 14-10-005-98), силіко-алюмінат кобальту, оксид кобальту (ГОСТ 18671-73), оксид хрому (ГОСТ 2912-79), карбід бору (ГОСТ 5744-85), карбід кремнію (ГОСТ 26327-84);

– силікат-брила з питомою щільністю 2,44 г/см^3 з $М_{SIO2}$ = 2,8…3,0 (ГОСТ 80110-53), рутил (ГОСТ 22938-78);

– електрокорунд нормальний (ГОСТ 28818-90), концентрат цирконовий (ГОСТ 4882-74), концентрат дистен-силіманітовий (ТУ-У 14-10-017-98), кварцит рожевий (ТУ-У 23,2-00190503-382:2014), шамот (ГОСТ 23037-78), натрій хлористий (ГОСТ 13830-97), β-Гіпс (марка Г-4) і α-Гіпс (марка Г-22) за ГОСТ 125-79;

– алюмінієвий сплав АЛ2 (ДСТУ 2839-94), Al-Mg (8,5% Mg); сірий чавун СЧ200 (ДСТУ 8833:2019); сталь 20Х24Н18С2Л, 30Л (ГОСТ 977-88); бронза БрА9Ж3Л (ГОСТ 493-79), БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613-79), БрО4Ц4С17 (ГОСТ 613-79), БрА9, БрА5 (ГОСТ 18175-78), БрА5О5;

– сухий їдкий натр NaOH (ГОСТ Р 55064-2012), каніфоль соснову;

– лист пінопласту марки ПСБ-С-25, з питомою щільністю 1,5 г/см^3, картонні стакани з розмірами (∅75×∅50)×85 та (∅80×∅53)×110 мм, поліпропіленові стрижневі ящики витрушеного типу з товщиною стінок до 2 мм, губку поліуретанову, чорнила WWM Carmen Canon, вуглекислий газ.

2.2 Обладнання, прибори, вимірювальний інструмент

Обробку матеріалів мікрохвильовим випромінюванням проводили в мікрохвильових печах з частотою мікрохвильового випромінювання 2,45 ГГц та обертовим столом з боросилікатного скла, основні параметри яких наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри мікрохвильових печей

Номінальна потужність магнетрону, Вт	Об'єм резонатору, $м^3$	Обертовий стіл резонатору	
		частота обертання, $хв^{-1}$	діаметр, мм
700	0,023	6,0	220
900	0,032	2,5	280
1200	0,023	6,0	220
1500	0,031	2,5	325

Час фіксували за секундоміром з точністю 1 с. Розміри визначали штангенциркулем з точністю 0,1, 0,01 мм та лінійкою з точністю 1 мм.

Змішування і помел сумішей проводили в каткових бігунах мод. 15111. Розсів піску проводили на приладі мод. 029.

Ущільнення сумішей проводили на вібраційному столі мод. М1 з частотою коливань 50 Гц і амплітудою 0,8...1,0 мм та лабораторному копрі мод. 5033А. Температуру виміряли та фіксували на електронному потенціометрі мод. АТ4208.

Хімічне травлення шліфів з бронзи для дослідження її мікроструктури проводили в розчині, у складі якого: 3,5 г $FeCl_3$, 25 мл HCl та 75 мл C_2H_5OH, а шліфів зі сталі – в ніталі [301, 302].

Дослідження структур сплавів проводили за допомогою інвертованого

фотомікроскопа відбитого світла NEOPHOT 21, дослідження структур ПРС – за допомогою бінокулярного мікроскопу МБС-10.

Структуру поверхонь руйнування ПРС досліджували на растровому електронному мікроскопі мод. РЕМ-106І при прискорювальній напрузі від 20 до 30 кВ і силі струму зонда від 4 μА до 30 μА у вторинних електронах з діаметром зонда від 1000 до 200 нм.

Масу вимірювали, використовуючи ваги електронні мод. Pocket Scale/1724, Notebook series VS-1108-20, ВТА-60/6-73-AL.

Рентгенодифрактографію проводили на дифрактометрі ДРОН-3М в Co-Kα випромінюванні з автоматичною реєстрацією сигналів кутових відбитків і з використанням програми X-REY. Розшифрування отриманих спектрів проводили по базах даних PCPDFWIN.

Руйнування зразків структурованих сумішей проводили на лабораторному копрі мод. 5033А.

Термічну обробку зразків ПРС проводили в лабораторній печі опору марки СНО 4/1100 И4А.

Міцність на стиск, розтяг та вигин структурованих сумішей визначали на приладі мод. LRu-2e.

Обсипальність структурованих сумішей визначали на приладі мод. 04812, газопроникність – на приладі мод. 04315.

Відносну вологість і температуру повітря вимірювали за допомогою електронного термометра-гігрометра мод. ТА-318.

Пісок сушили в сушильній шафі мод. СНОЛ 58/350.

Ситовий (фракційний, гранулометричний) аналіз пісків проводили на приладі мод. 029.

Визначення параметрів шорсткості литих поверхонь проводили на профілографі мод. 170622 в комплекті з ІОК.

Розплави сталей 30Л та 20Х24Н18С2Л готували в індукційній печі ІСТ-0,16 з кислою футерівкою. Бронзи, чавун та алюмінієві сплави виплавляли в індукційній печі з графітовим тиглем металоємністю 3 кг за міддю.

2.3 Плакування кварцового піску рідким склом

Плакування кварцового піску РС проводили наступним чином:

- кварцовий пісок сушили в сушильній шафі при 150...200 °С до вмісту в ньому вологи менше 0,1% та охолоджували на повітрі до кімнатної температури;
- після підготовки відповідних наважок кварцовий пісок впродовж 5...6 хв змішували з РС в лабораторних каткових бігунах;
- після змішування суміш витримували на повітрі до сипучого стану і подрібнювали в лабораторних каткових бігунах;
- після досягнення сипучого стану суміші її сушили в мікрохвильовій печі протягом 3...4 хв в шарі товщиною до 30 мм;
- висушений плакований кварцовий пісок з мікрохвильової печі подрібнювали в лабораторних каткових бігунах в продовж 5...10 хв і охолоджували на повітрі до температури навколишнього середовища.

2.4 Стандартні методи і методики досліджень

Обсипальність зразків визначали на приладі мод. 04812 відповідно до ГОСТ 23409.9-78. Газопроникність формувальних сумішей визначали на приладі мод. 04315 відповідно до ГОСТ 23409.6-78. Міцність на стиск, розтяг та вигін структурованих сумішей визначали на приладі мод. LRu-2e відповідно до ГОСТ 23409.7-78. Вміст вологи в кварцовому піску визначали відповідно до ГОСТ 29234.5-91.

2.5 Загальноприйняті та відомі методи і методики досліджень

2.5.1 Сипкість чистого та плакованого рідким склом кварцового піску

Сипкість піску оцінювали за результатами вимірювання діаметру (D*) плями його розтікання по горизонтальній скляній поверхні після підняття бездонного мірного циліндру ємністю 200 г попередньо наповненого

досліджуваним піском [303]. Вимірювали діаметр в 4 напрямах, лінійкою з точністю 1 мм, відповідно до схеми на рис. 2.1.

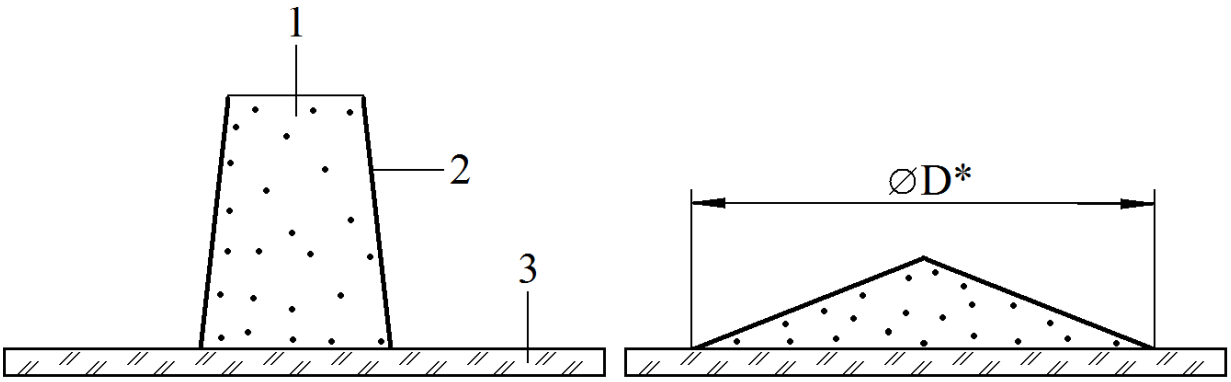


Рисунок 2.1 – Схеми розташування мірного циліндра 1 з піском 2 на поверхні скла 3 (а), і визначення діаметра плями розтікання піску по поверхні (б)

За справжню величину приймали середнє арифметичне значення вимірів діаметра розтікання у 4-х напрямках.

2.5.2. Класифікація піску за вмістом в ньому води, визначення уявної щільності та фракційного складу піску

Класифікацію піску за вмістом в ньому води (сухий, вологий, сирий) здійснювали за результатами візуального контролю виду вібраційно ущільненого піску, видаленого з конусоподібної ємності на горизонтальну поверхню. Вміст води в піску у цих дослідженнях становив від 0,07 до 0,4% (за масою).

Для випробувань склянку ємністю 200 мл, встановлювали на горизонтальний лист скла, наповнювали піском з певною вологістю та ущільнювали вібрацією впродовж ~10 с. Після цього склянку вертикально видаляли з поверхні піску і через 10...15 с візуально оцінювали вигляд форми пісочної гори на склі та вимірювали діаметр плями розтікання піску [303].

Уявну щільність пісків визначали за масою вібраційно ущільненого

піску в скляній ємності об'ємом 1 дм^3. Вимірювання щільності РС проводили за допомогою ареометра з точністю 0,001 г/см^3 при 20±1 °С.

Ситовий (фракційний, гранулометричний) аналіз пісків проводили на приладі мод. 029 з використанням ваг мод. ВТА-60/6-73-AL-2.

2.5.3 Робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей

Роботу вибивання зразків розраховували за методикою ЦНДІТМАШ з використанням формули (1.4) (див. розділ 1, п.п. 1.2.) [87].

В дослідженнях зразки сумішей ∅50×30 мм поміщали в сталеву обойму та руйнували на лабораторному копрі, використовуючи сталевий пробійник Ø16 мм з кутом загострення торця 60°.

Зразки для досліджень виготовляли з ПРС за ПМЗ-процесом в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 900 Вт впродовж 240±5 с, маса водяного заряду (ВЗ) при цьому складала 1 г.

Для проведення досліджень зразки попередньо нагрівали від 100 до 1100 °С з ізотермічною витримкою при заданій температурі впродовж 45...50 хв. По завершенню ізотермічної витримки зразки охолоджували на повітрі до нормальної температури.

2.5.4 Оптимізація складу піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за способом паро-мікрохвильового затвердіння

Оптимізацію проводили для ПРС, які структурували за способом ПМЗ. В дослідженнях використовували кварцовий пісок плакований 0,5...2,5% РС та розсіяний на піщано-рідкоскляні конгломерати за розміром до 0,315 мм та від 0,315 до 0,63 мм. Сушку і структурування наважок ПРС масою 400 г проводили в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 900 Вт протягом 5 хв при вмісті води у ВЗ масою 1 г. Коди конгломератів сумішей плакованого кварцового піску наведені в табл. 2.2.

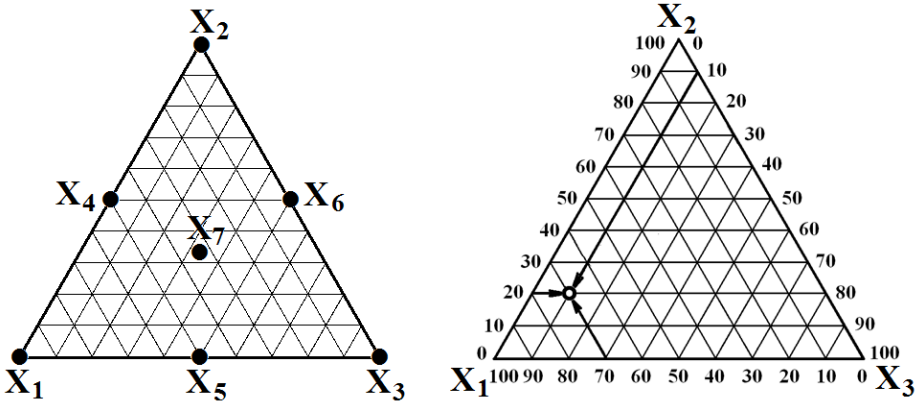
Таблиця 2.2

Коди конгломератів сумішей плакованого кварцового піску

Код конгломератів суміші	Розміри конгломератів, мм		Вміст РС, яке було витрачено на плакування кварцового піску, %	
	< 0,315	≥ 0,315... < 0,63	0,5	2,5
A		+		+
B	+		+	
C	+			+

Процедуру оптимізації проводили за результатами експериментів симплекс-планування шляхом побудови симплекс-трикутників та накладення їх форматованих (масштабованих) зображень одне на одного із затемненими полями між ізолініями, які не відповідають необхідному рівню кожного з параметрів або властивостей структурованої ПРС.

Для побудови симплексних решіток використовували модель за симплекс-решітчастим планом неповного куба в трійній системі Г. Шеффе та схемою на рис. 2.2 [88, 304].



а б

Рисунок 2.2 – Симплексний трикутник (а) та його ключ (б)

Оскільки реалізація плану Г. Шеффе неповного куба в потрійній системі передбачає побудову моделі:

$$Y=\beta_1 x_1+\beta_2 x_2+\beta_3 x_3+\beta_{12} x_1 x_2+\beta_{13} x_1 x_3+\beta_{23} x_2 x_3+\beta_{123} x_1 x_2 x_3, \qquad (2.1)$$

де Y – властивість матеріалу;

β – коефіцієнт регресії;

х – кількість матеріалу в суміші (за масою),

тому розрахунок коефіцієнтів регресії у формулі (2.1) проводили за такими формулами:

$$\beta_1=\xi_1, \quad \beta_{ij}=4\cdot\xi_{ij}-2\cdot\xi_i-2\cdot\xi_j, \quad \beta_{123}=27\cdot\xi_{123}-12\cdot(\xi_{12}+\xi_{13}+\xi_{23})+3\cdot(\xi_1+\xi_2+\xi_3),$$

де ξ_i, ξ_j, ξ_{123} – результати дослідів в точках (див. рис. 2.2) симплексних решіток.

Оптимізацію ПРС, структурованої за способом ПМЗ, проводили за наступними параметрами: межа міцності на стиск, відносна величина стріли прогину до руйнування, обсипальність, газопроникність, уявна щільність, робота вибивання.

2.5.5 Стріла прогину зразків з піщано-рідкоскляних сумішей

Визначення стріли прогину зразків (20×20×220 мм) до їх руйнування проводили за триточковою схемою навантаження на приладі відповідно до схеми на рис. 2.3.

У відповідності до схеми на рис. 2.3, для випробувань зразок 1 встановлювали на опори рами приладу 2. Шляхом обертання воротка вводили в зіткнення з поверхнею зразка 1 рухомий шток 3, встановлювали на місці індикатора годинного типу 6 нульову позначку і здійснювали обертання воротка до руйнування під його штоком випробуваного зразка. Величина відхилення стрілки на індикаторі годинного типу відповідала абсолютній величині стріли прогину (f, мм) зразка до його руйнування. Відносну величину стріли прогину розраховували за формулою, %:

$$\Delta_\varepsilon=0{,}5\cdot f. \qquad (2.2)$$

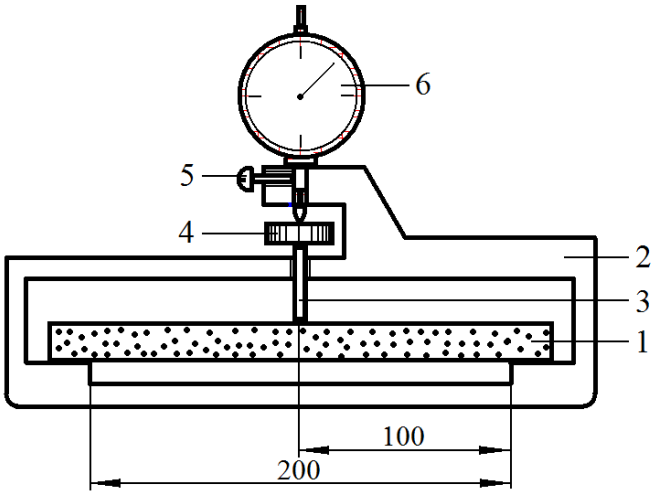


Рисунок 2.3 – Схема приладу для визначення стріли прогину зразків ПРС до їх руйнування за триточковою схемою навантаження: 1 – зразок ПРС; 2 – сталева рама; 3 – рухливий шток вертикального ходу; 4 – вороток; 5 – фіксуючий гвинт; 6 – індикатор годинникового типу

2.5.6. Газотвірна здатність, вологість, вміст води в піщано-рідкоскляних сумішах, кварцовому піску та рідкому склі

Виходячи з того, що в досліджуваних матеріалах окрім води відсутні будь-які газотвірні компоненти, газотвірну здатність ПРС та РС визначали розрахунком за формулою, $см^3/г$:

$$Г = 1620 \cdot \frac{m_1 - m_2}{m_1}, \qquad (2.3)$$

де 1620 – об’єм водяної пари ($см^3$), що виникає при випаровуванні 1 г води, $см^3/г$;

m_1, m_2 – маса наважки до та після прожарювання до 700 °С, г,

а вміст вологи і води в кварцовому піску, ПРС та РС за формулою, %:

$$Вл = 100 \cdot \frac{m_1 - m_2}{m_1}. \qquad (2.4)$$

2.5.7 Теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей

Температуру визначали електронним потенціометром з точністю 1 °С в комплекті з контактною хромель-капелевою (ХК), хромель-алюмелевою (ХА) та вольфрам-молібденовою (ВМ) термопарою з діаметром електродів 0,2 та 0,5 мм з реєстрацією на електронному потенціометрі.

Визначення теплофізичних властивостей ПРС, структурованих за способом ПМЗ проводили за методом Г.А. Анісовича (метод циліндричного виливка) [305].

Для реалізації цього метода розплави сірого чавуну СЧ200 та Al-Mg сплавів заливали в досліджувані форми з розмірами робочої порожнини ∅30×330 мм.

Хромель-алюмелеві термопари, за показаннями яких розраховували розподіл температури по товщині форми в момент завершення затвердіння розплаву в центрі виливка, розміщували в ливарній формі відповідно до схеми, представленої на рис. 2.4.

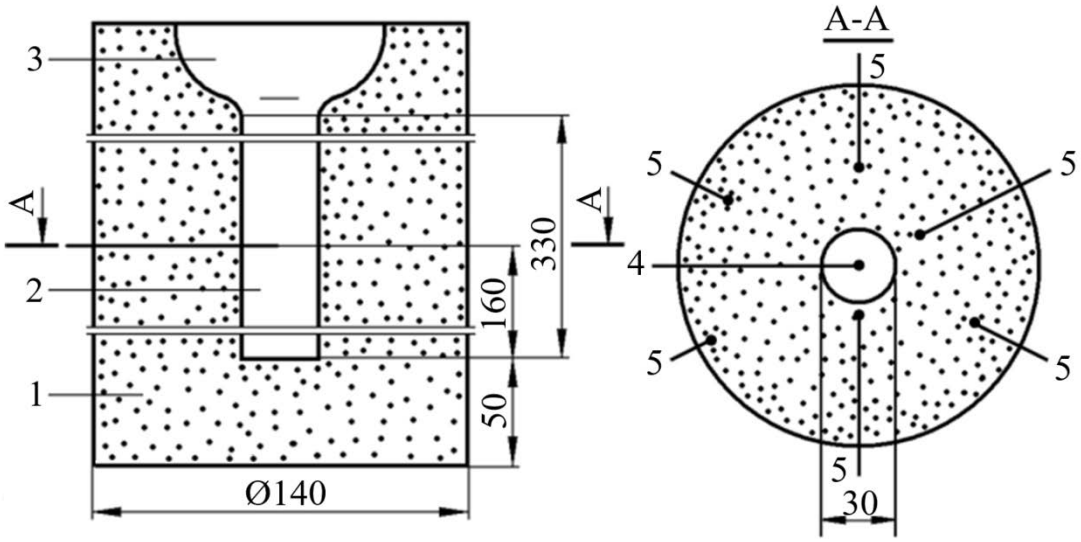


Рисунок 2.4 – Схема розміщення термопар за методом циліндричного виливка: 1 – піщано-рідкоскляна форма; 2 – виливок; 3 – ливникова воронка; 4 – центральна термопара; 5 – термопари, розташовані на відстані 9, 18, 27, 36 і 45 мм від центру виливка

Відповідно до схеми на рис. 2.4, термопару 4 розміщували в центрі виливка 2, а термопари 5 на відстані 9, 18, 27, 36 і 45 мм від центру піщано-рідкоскляної форми 1. Заливка відбувалася через ливникову воронку 3.

Товщина електродів ХА-термопар – 0,2 мм, а діаметр гарячих спаїв – 0,3 мм, що порівняно із середнім діаметром зерен використаного кварцового піску. Робочий спай ВМ термопари діаметром 0,5 мм, що знаходиться в робочій порожнині форми, яку заливали чавуном СЧ200, попередньо покривали шаром суміші РС з пиловидним кварцом товщиною до 0,2 мм.

В дослідженнях ливарну форму виготовляли за способом ПМЗ з кварцового піску, який попередньо плакували 0,5%, 1,5% і 3,0% РС (за масою, понад 100% піску) та висушували на повітрі до сипучого стану, після чого досушували впродовж 5 хв в мікрохвильовому випромінюванні.

Для виготовлення ливарних форм, ПРС засипали в поліпропіленовий короб, на дні якого знаходився ВЗ з 1,5..2,5 г води, віброущільнювали на вібростолі протягом 10...60 с. Структурування плакованої суміші проводили в мікрохвильовій печі з об'ємом камери 40 л, потужністю магнетрона 1,5 кВт протягом 12...17 хв. Теплоємність форми (c_2) розраховували за формулою:

$$c_2 = \frac{R\rho_1 q_{кр}(n+1)}{2X_2\rho_2\vartheta_П\left(1+\frac{1}{n+2}\cdot\frac{X_2}{R}\right)}, \qquad (2.5)$$

де R – радіус виливка;

ρ_1, ρ_2 – щільність розплаву та матеріалу форми відповідно;

$q_{кр}$ – теплота кристалізації розплаву;

n – показник ступеня параболи розподілу температури у формі;

X_2 – глибина проникнення тепла в товщу форми;

$\vartheta_П$ – температура поверхні форми, що контактує з виливком.

Значення теплопровідності структурованого матеріалу форми (λ_2) розраховували за формулою:

$$\lambda_2 = \frac{R^2(n+2)}{4nt_3}\left\{\frac{(n+2)c_2\rho_2}{3(n+1)}\left[\left(1+2\frac{n+1}{n+2}\cdot\frac{\rho_1 q_{кр}}{\rho_2 c_2 \vartheta_П}\right)^{\frac{3}{2}}-1\right]-\frac{\rho_1 q_{кр}}{\vartheta_{П\cdot СР}}\right\}, \qquad (2.6)$$

$$\vartheta_{П\cdot СР} = \frac{\vartheta_П + \vartheta_{КР}}{2},$$

де t_3 – час.

За розрахованим коефіцієнтом теплопровідності визначали перепад температури у виливку і робили поправку на зміну значень $\vartheta_П$ і $q_{КР}$.

Коефіцієнт теплоакумулюючої здатності (b_2) форми розраховували за формулою:

$$b_2 = \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}\ , \qquad (2.7)$$

а температуропровідність (a_2) розраховували за формулою:

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \cdot \rho_2}\ . \qquad (2.8)$$

Величини теплофізичних параметрів сплавів [306…309] і перегрів їх розплавів при заливці в форми, прийняті для розрахунків, наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Теплофізичні параметри сплавів і перегрів їх розплавів при заливці в форми

Сплав	t_L, °С	t_S, °С	ρ_1, $\frac{кг}{м^3}$	c_1, $\frac{Дж}{кг\cdot °С}$	c_l', $\frac{Дж}{кг\cdot °С}$	L, $\frac{кДж}{кг}$	$\Delta t_п$, °С
Al-Mg (8,5%)	623	540	2635	950	1162	372	70
СЧ 200	1200	1150	7100	560	840	263	80

2.5.8 Лінійне розширення чистого та плакованого рідким склом кварцового піску, коефіцієнт термічного лінійного розширення зразків гіпсу та поліпропілену

В дослідженнях використовували кварцовий пісок, який плакували РС з розрахунку 1% та 2,5% РС (за масою, понад 100% піску). Перед використанням плакований пісок сушили в шарі 15...20 мм мікрохвильовим випромінюванням протягом 2...3 хв і охолоджували його на повітрі до кімнатної температури.

Дилатометричні вимірювання проводили при впливу на випробуваний зразок (∅30×110 мм) мікрохвильового випромінювання з використанням пристосування, схема якого представлена на рис. 2.5.

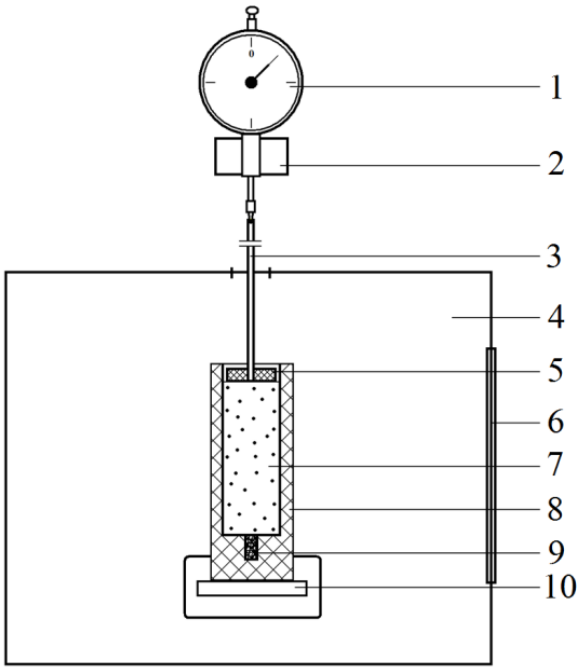


Рисунок 2.5 – Схема пристосування для визначення лінійного розширення піску в залежності від тривалості його обробки мікрохвильовим випромінюванням: 1 – індикатор переміщення годинного типу; 2 – незалежне кріплення індикатора; 3 – кварцова трубка; 4 – резонатор; 5 – гіпсова опорна пластина; 6 – вихідний отвір хвилеводу; 7 – зразок піску; 8 – гіпсокварцова ємність; 9 – ВЗ; 10 – незалежна опора

Лінійну зміну висоти піску в ємності, під час його обробки мікрохвильовим випромінюванням в пристосуванні фіксували за допомогою відеореєстрації шкали індикатора годинникового типу 1 (див. рис. 2.5) з точністю 0,01 мм з побудовою залежностей відносного лінійного розширення піску від тривалості його нагрівання мікрохвильовим випромінюванням.

Випробування пісків проводили як в середовищі мікрохвильового, так і паро-мікрохвильового випромінювання з попереднім просіванням сухого плакованого піску через сито з осередком 0,4 мм і 0,63 мм та використанням ВЗ з масою води в ньому 1 г.

За результатами вимірювань будували залежності змін відносного розширення пісків у часі під дією мікрохвильового випромінювання.

Коефіцієнт термічного лінійного розширення зразків гіпсу Г22 та поліпропілену визначали на їх зразках (200…210)×20×20 мм за допомогою електронного штангенциркуля з точністю 0,001 мм шляхом визначення зміни довжини зразків до та після нагрівання від t_1=20±1 °С до t_2=130±5 °С за формулою:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1}, \tag{2.9}$$

де l_1, l_2 – довжина зразка до і після нагрівання відповідно, м.

2.5.9 Шорсткість литих поверхонь та пригару на виливках

Визначення параметрів шорсткості литих поверхонь проводили на профілографі мод. 170622 в комплекті з ІОК.

Шліфи для дослідження мікроструктури виготовляли з виливків, які були відлито зі сталі 30Л в форми, що виготовлені за Cold-box-amin-процесом з 2% (за масою) сполучної речовини, Resol-CO_2-процесом з 5% сполучної речовини, CO_2-процесом з 5% сполучної речовини і за способом

ПМЗ з 1% сполучної речовини (за масою, понад 100% піску).

Виплавку алюмінієвої бронзи (Cu+9,45%Al) проводили в індукційній печі з графітовим тиглем, використовуючи мідь марки М2 та алюміній технічної чистоти. Щільність зразків виготовленої бронзи визначали методом гідростатичного зважування [310]. Масу визначали шляхом зважування на електронних терезах з точністю 0,01 г.

Для виготовлення моноблочних та комбінованих ливарних форм за схемою на рис. 2.6, використовували моделі виливків та надливів з поліпропілену та гіпсу марки Г22.

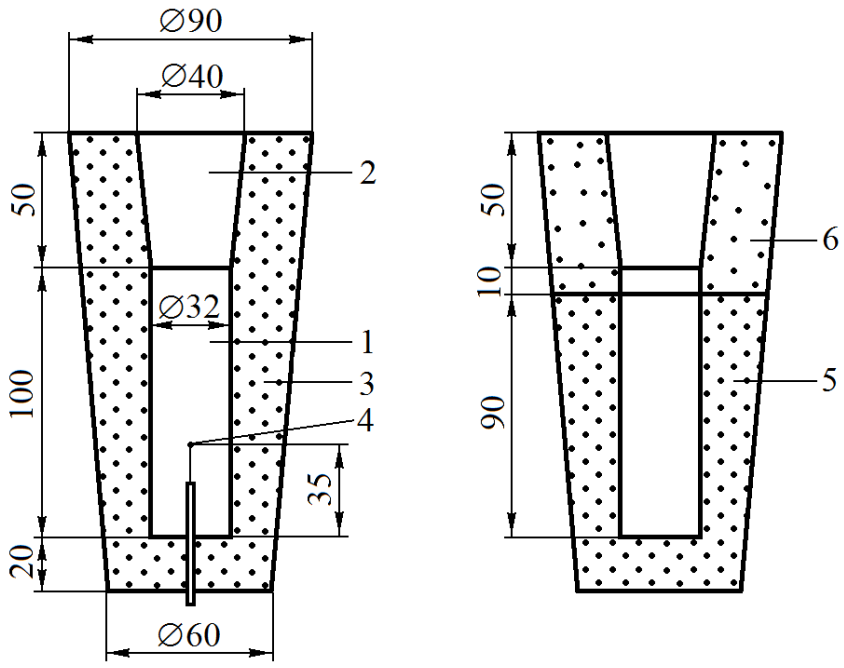


Рисунок 2.6 – Схеми моноблочної (а) та комбінованої (б) ливарної форми: 1 – робоча порожнина форми; 2 – надлив відкритого типу; 3 – ливарна форма з конгломератів кварцового піску розмірами менше 0,315 мм; 4 – гарячий спай термопари; 5 – нижня частина ливарної форми з конгломератів кварцового піску розмірами менше 0,315 мм; 6 – верхня частина ливарної форми з конгломератів кварцового піску розмірами 0,315...0,630 мм

Відповідно до рис. 2.6, циліндричні виливки виготовляли шляхом заливання розплаву у моноблочні та комбіновані форми. Час затвердіння виливків визначали за результатами їх термографування ХА-термопарою у комплекті з електронним потенціометром.

Схильність ПРС до виникнення пригару оцінювали за результатами візуального огляду поверхні виливків ∅32×(100...120) мм. Ливарні форми для виливків, виготовляли із ПРС з 5% РС (за масою, понад 100% піску) шляхом ударно-механічного ущільнення ПРС та її наступного сушіння при 200 °С впродовж 2 годин, а також з кварцового піску, плакованого 1,5% РС (за масою, понад 100% піску), просіяного через сито з осередком 0,315 мм, ущільненого вібрацією та структурованого за способом ПМЗ.

2.5.10 Матеріалізація поля мікрохвильового випромінювання в резонаторі

Дослідження проводили відповідно до методики роботи [311]. У дослідженнях використовували прісну воду технічної чистоти, РС, кварцовий пісок, графіт сріблястий, плити пінопластові з уявною щільністю 20 кг/м^3. Вигляд поля теплового впливу мікрохвильового випромінювання на відстані 50…180 мм від днища резонатора, при нагріванні на обертовому столі 4-х наважок води по 100 г кожна, фіксували фотографуванням поверхні гіпсового відбитка з поверхні пінопласту зі сторони знаходження шару сріблястого графіту.

2.6 Оригінальні методики досліджень

2.6.1 Швидкість підвищення температури сипких матеріалів при їх нагріванні мікрохвильовим випромінюванням

Для визначення швидкості підвищення температури матеріалів при їх нагріванні мікрохвильовим випромінюванням використовували пристрій схематично представлене на рис. 2.7.

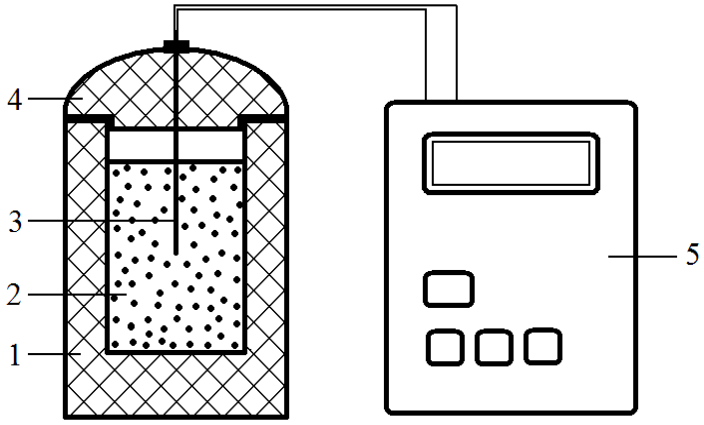


Рисунок 2.7 – Схема пристрою для визначення зміни температури сипучих матеріалів: 1 – контейнер-термостат; 2 – сипкий випробуваний матеріал; 3 – термопара; 4 – кришка; 5 – вимірювальний прилад

У відповідності зі схемою на рис. 2.7 пристрій являє собою контейнер, виконаний з пінопласту з уявною щільністю 22 кг/м^3. Розміри робочої порожнини пінопласту контейнера ∅40×70 мм. У верхній частині контейнера його робоча порожнина закрита пінопластовою кришкою.

В якості контролю працездатності мікрохвильової печі, перед початком чергової серії випробувань матеріалів проводили визначення величини зміни температури наважки дистильованої води масою 180±1 г, що нагрівають в картонному стакані. Результат випробувань будь-якого матеріалу брали за істинний, якщо при попередньому контрольному нагріванні в мікрохвильовій печі температура наважки води за 60 с підвищувалася на 38,3...38,7 °С, а напруга в мережі живлення мікрохвильовій печі під час проведення випробування матеріалу становила 220 ± 3 В.

Для експерименту готували по 5 наважок кожного випробуваного сипкого матеріалу. Маса випробовуваних наважок становила 180...220 г і була обумовлена величиною уявної щільності випробуваного матеріалу і обсягом робочого простору використовуваного пінопластового контейнера-термостата. Замірювання вихідної температури матеріалу наважок здійснювали через 10...15 хв після встановлення випробуваного матеріалу в

контейнер-термостат. Для виміру температури з точністю 0,1 °С використовували ХК-термопару з діаметром робочого спаю 0,2...0,3 мм. Після виміру температури термопару витягували з контейнера-термостата, закривали його робочу порожнину пінопластовою кришкою і встановлювали його в центр обертового столу мікрохвильової печі.

У всіх дослідах тривалість обробки матеріалу в мікрохвильової печі при номінальній потужності магнетрона 700 Вт становила 60 с. Після закінчення обробки контейнер витягували з печі і шляхом його трьох-п'яти кратного струшування з одночасним поворотом на 180° у вертикальній площині перемішували в ньому сипкий матеріал. Після перемішування на певну глибину через робочу порожнину контейнера вводили ХК-термопару і проводили повторний вимір температури. Число повторень однотипних вимірювань для однієї наважки – 2.

Для випробувань були відібрані наступні матеріали:

- в якості екологічно і санітарно-гігієнічно безпечного сполучного матеріалу одноразових сумішей ЛФС – силікат-брила (содова);

- вогнетривкі зернисті матеріали для одноразових ЛФС – рутил, електрокорунд нормальний, концентрат цирконовий, концентрат дистен-силіманітовий, кварцит рожевий, шамот, пісок кварцовий, натрій хлористий;

- в якості екологічно та санітарно-гігієнічно безпечного сполучного матеріалу для модельно-опочного і стрижневою оснащення – затворні водою β-Гіпс (марка Г-4) і α-Гіпс (марка Г-22). У дослідженнях використовували гіпсову крихту, отриману механічним подрібненням до необхідної фракції затворні водою гіпсів зазначених марок з наступним сушінням на повітрі протягом 15 діб при температурі 32...35 °С і відносній вологості повітря 42...45%.

Всі випробовувані матеріали до початку випробувань просушували протягом 3...5 хв в мікрохвильовій печі з номінальною потужністю магнетрона 700 Вт і охолоджували на повітрі до кімнатної температури. Переважний розмір зерен випробовуваних матеріалів – 0,1...0,2 мм.

2.6.2 Залишкова волога у рідкому склі після його обробки мікрохвильовим випромінюванням

Вплив сушіння РС під дією мікрохвильового випромінювання на величину залишкової вологи оцінювали за результатами зважування наважок силікат-брили до і після її сушіння в мікрохвильовій печі. Для цього використовували наважки масою 50...55 г пилоподібної силікат-брили, яку попередньо зважували з точністю до 0,01 г і поміщали в порцелянову ємність відомої маси. Після цього до наважок силікат-брили в порцеляновій ємності додавали 100...105 г дистильованої води і при температурі 70...80 °С повністю розчиняли силікат-брилу в воді. З приготованого розчину відбирали наважку масою 50....70 г і при 95...97 °С упарювали до в'язко-текучого стану, обробляли (сушили) мікрохвильовим випромінюванням протягом 20...25 хв. Після закінчення сушіння ємність з сухим залишком повторно зважували і розраховували відносний вміст залишкової вологи в наважках за формулою (2.4) з відносною похибкою ± 0,02%.

2.6.3 Кінетика сушіння кварцового піку та його сумішей мікрохвильовим випромінюванням

Дослідження проводили на наважках піску і його сумішей масою 200 г. Температуру наважок піску і його сумішей визначали електронним потенціометром з точністю 1 °С в комплекті з контактною ХК-термопарою, що мала діаметр електродів 0,2 мм.

Температуру наважок сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом визначали в їх центральних частинах через кожні 15...60 с нагріву мікрохвильовим випромінюванням. Визначення маси проводили на електронних вагах з точністю 0,01 г.

Для побудови кінетичних кривих використовували дані, отримані на пристосуванні, схема якого представлена на рис. 2.8.

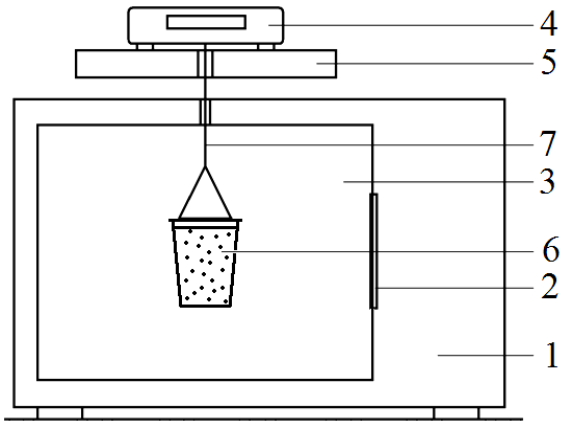


Рисунок 2.8 – Схема пристосування для визначення зміни маси наважок піску при сушінні мікрохвильовим випромінюванням: 1 – прилад генерації мікрохвильового випромінювання; 2 – вихід хвилеводу в резонатор приладу; 3 – резонатор приладу; 4 – електронні ваги; 5 – опора ваг; 6 – наважка піску (суміші) в картонній ємності; 7 – нитка

Для проведення даних досліджень в резонатор 3 приладу 1 підвішували на нитці 7 наважку піску/суміші 6 в картонній ємності (стакані). При необхідності, в донної частини ємності розміщували ВЗ. Нитку 7 закріплювали на електронних вагах 4, які розміщували на опорі 5.

При включенні приладу 1 мікрохвильове випромінювання потрапляло в резонатор через вікно хвилеводу 2. Зміна маси наважки, під час її обробки мікрохвильовим випромінюванням, фіксували відеореєстрацією зі світлового табло електронних ваг з наступною побудовою кінетичних (хроно-гравіметричних) кривих. Середню швидкість нагріву наважок розраховували, використовуючи результати визначення зміни їх температури за перші 2 хв нагрівання мікрохвильовим випромінюванням.

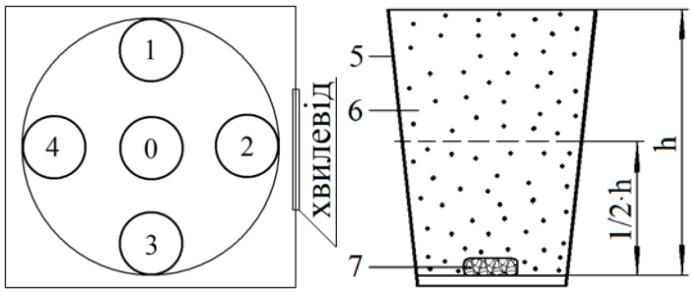
2.6.4 Газотвірна здатність піщано-рідкоскляних сумішей

Піщано-рідкоскляні суміші без структурування, а також після структурування шляхом їх продувки вуглекислим газом (CO_2-процес) протягом 48 с і шляхом сушки при 203±3 °С протягом 2 годин готували

змішуванням кварцового піску з 5% РС (за масою, понад 100% піску). Перед продуванням вуглекислим газом і тепловим сушінням наважки приготованих сумішей ущільнювали двома ударами на лабораторному копрі.

Для структурування в паро-мікрохвильовому середовищі використовували кварцовий пісок попередньо плакований РС. Для цього, після змішування РС з кварцовим піском суміш сушили на повітрі при 20...26 °С до сипучого стану. Після цього частина плакованого кварцового піску протягом 2 або 5 хв додатково сушили в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 700 Вт. Перед структуруванням незалежно від способу сушіння плакований пісок просіювали через сито з розміром сторін його осередку у світлі 0,4 мм.

Структурування плакованого піску в паро-мікрохвильовому середовищі здійснювали з використанням ВЗ – наважки води масою 1 г. Водяний заряд представляв собою просочену водою поліуретанову губку з розмірами ∅15×8 мм. Структурування проводили в картонних стаканах, на дно яких поміщали ВЗ, після чого наповнювали їх 200 г плакованого піску і вібраційно ущільнювали. Для структурування картонні стакани, наповнені плакованим кварцовим піском та встановленим ВЗ, поміщали в резонатор на його обертовий стіл відповідно до схеми, наведеної на рис. 2.9,а.



а б

Рисунок 2.9 – Схема (вид в плані) розміщення наважок суміші на обертовому столі резонатора (а) і схема розміщення ВЗ в склянці (б):
0-4 – умовні номери положень зразків на обертовому столі;
5 – картонний стакан; 6 – ПРС; 7 – ВЗ

Газотвірну здатність структурованої суміші визначали розрахунком, використовуючи дані щодо втрати первинної маси наважок після їх нагрівання при 1000 °С в продовж години. Для досліджень використовували наважки масою 30±1 г, які отримували в результаті розрізання зразків структурованої суміші висотою h на видаленні 1/2 від днища склянки відповідно до схеми на рис. 2.9,б.

Підготовку сумішей, що були структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі, здійснювали відповідно до технологічних схем, графи яких представлені на рис. 2.10.

а б

Рисунок 2.10 – Граф технологічної схеми А (а) і схеми Б (б) підготовки сумішей до структурування в паро-мікрохвильовому середовищі: 1 – змішування кварцовий піску з РС; 2 – сушіння суміші на повітрі до сипучого стану; 3 – сушіння мікрохвильовим випромінюванням; 4 – подрібнення і просіювання плакованого піску через сито з осередком 0,4 мм; 5 – структурування мікрохвильовим випромінюванням

2.6.5 Водостійкість структурованих піщано-рідкоскляних сумішей

В дослідженнях використовували воду водопровідну, РС, кварцовий пісок. Дослідження проводили на зразках кубічної форми ПРС з довжиною ребра 20 мм. Випробовувані зразки отримували в результаті розрізання заготовки масою 2,2 кг з ПРС, структурованої за способом ПМЗ, з кварцового піску, плакованого 0,5...2,5% (за масою, понад 100% піску) РС.

Плакований пісок сушили на повітрі до масового вмісту води в СН 17...19%. Після сушіння на повітрі сухий плакований пісок досушували протягом 5 хв в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 900 Вт.

Структурування плакованого піску проводили після його просіювання через сито з величиною сторони осередку 0,4 мм. Для структурування використовували ВЗ масою 1 г, що представляв собою губку з пінополіуретану з розмірами ∅30×8мм. Для структурування на дно поліпропіленового короба поміщали ВЗ, короб заповнювали 2,2 кг плакованого піску і ущільнювали його протягом 30 с на вібростолі. Після ущільнення короб поміщали в резонатор в центр обертового столу і при обертанні столу печі з частотою 2,5 об/хв обробляли мікрохвильовим випромінюванням протягом 8 хв.

Схема вирізки кубиків з заготовки і схема розміщення кубика в Х-образній опорі-підвісці представлені на рис. 2.11.

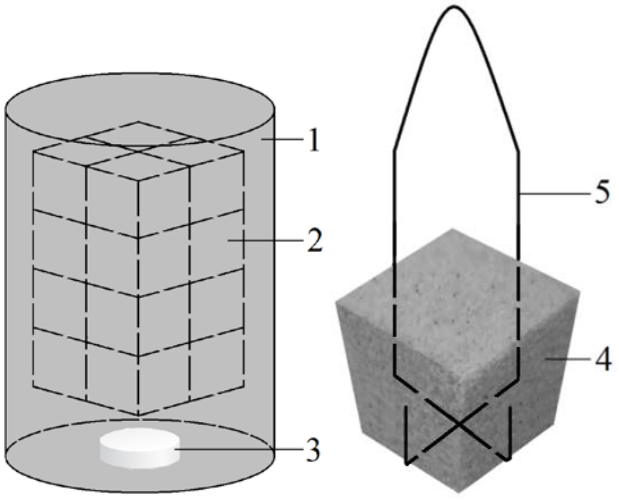


Рисунок 2.11 – Схема вирізки кубиків з заготовки (а) і їх розміщення в Х-образній опорі-підвісці (б): 1 – заготовка структурованої суміші за способом ПМЗ; 2 – контури площин різу заготовки при виготовленні кубиків; 3 – ВЗ в тілі заготовки (пінополіуретан, просочений водою); 4 – зразок кубічної форми (кубик); 5 – Х-подібна опора-підвіска

Для визначення тривалості руйнування випробовувані зразки встановлювали на Х-образну опору-підвіску і в такому стані занурювали в

воду з відповідною температурою. Відношення маси води до маси випробуваного в ній зразка у всіх випадках складало ~100. За тривалість руйнування зразка у воді було прийнято час його повного видалення з Х-образної опори-підвіски.

Зберігання виготовлених зразків до випробувань проводили на відкритому повітрі з відносною вологістю 60...62% при температурі 20...26 °С. Попередній нагрів зразків до заданих температур проводили в лабораторній печі опору за наступним режимом:

- швидкість підвищення температури в робочому просторі печі – 80...170 °С/год;
- тривалість ізотермічної витримки при заданій температурі – 40±1 хв;
- охолодження на повітрі поза печі з заданої температури до досягнення зразком 20...22 °С.

2.6.6 Кінетика карбонізації шару рідкого скла на повітрі

Для встановлення кінетики карбонізації РС на повітрі на поверхню кульок Ø50 мм шляхом зануренням наносили шар РС з товщиною ~30 мкм і шару частково дегідратованого СН товщиною ~20 мкм. Підготовлені таким чином кулі поміщали в кліматичну камеру з певною відносною вологістю повітря і протягом 8 діб з періодичністю 7 годин проводили зважування на електронних вагах з точністю 0,01 г. Відносну вологість і температуру повітря вимірювали за допомогою електронного термометра-гігрометра мод. ТА-318. Для зниження відносної вологості повітря до W=23...25% і зменшення вмісту в повітрі вуглекислого газу в кліматичну камеру поміщали сухий їдкий натр (NaOH).

У якості модифікуючих матеріалів РС використовували: цукор, бікарбонату натрію, хлористий натрій, гліцерин, розчин каніфолі у гліцерині, карбамід, пару ізопропілового спирту, йодований хлористий натрій, соснову каніфоль.

Для оцінки впливу на карбонізацію дегідратованого модифікованого РС в тонкому шарі використовували скляні кульки Ø10 мм, на поверхню яких

наносили шар досліджуваного РС товщиною ~30 мкм. Сушку РС на поверхні кульок проводили на повітрі при його відносній вологості 35...45% і температурі 32...35 °С протягом 6 годин. Після цього кульки на 48 годин поміщали в кліматичну камеру з відносною вологістю повітря в ній W=60...85% і температурою 24...28 °С. Оцінку якості поверхні шарів проводили візуально при збільшені ×30 на мікроскопі NB-XT3B.

2.6.7 Встановлення причин виникнення дефекту «вимоїна» на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях

У дослідженнях використовували кварцовий пісок марки $1К_1О_102$, РС, гіпс марки Г-22. Для виготовлення стрижнів використовували поліпропіленові стрижневі ящики. Зразки вкладених елементів до стрижневих ящиків виготовляли з чистого гіпсу, а також суміші гіпсу та 1% (за масою) ТД: концентрат ільменіту, силіко-алюмінат кобальт, оксид кобальт, оксид хрому, карбід бору, карбід кремнію.

Перед використанням сухий плакований РС кварцовий пісок обробляли мікрохвильовим випромінюванням протягом 2...3 хв і впродовж години охолоджували на повітрі до 20...25 °С та просіювали через сито 0,315.

Схема розташування гіпсових вкладених елементів і ВЗ в поліпропіленовому стрижневому ящику під час структурування суміші представлено на рис. 2.12.

Для випробувань на дно поліпропіленового стрижневого ящику 1 (див. рис. 2.12) укладали пінополіуретанову губку, яку попередньо просочували 1 г води 4. Після цього, ящик на 0,20...0,25 його висоти наповнювали плакованим піском 2. На шар плакованого піску у ящику встановлювали вкладені гіпсові елементи 3 і до верху стрижневого ящику досипали пісок. Після цього пісок у стрижневому ящику упродовж 30...40 с ущільнювали вібрацією.

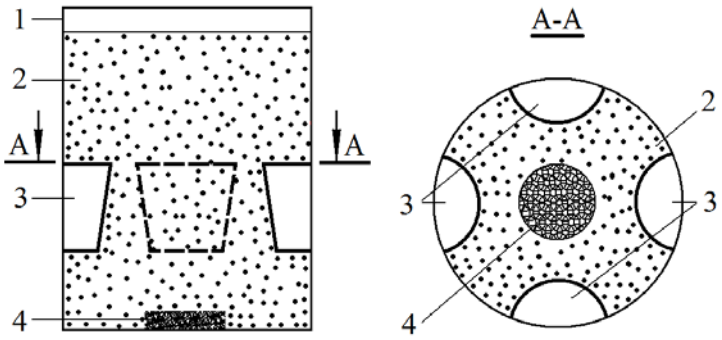


Рисунок 2.12 – Схема розташування гіпсових зразків і ВЗ у поліпропіленовому ящику: 1 – поліпропіленовий стрижневий ящик; 2 – плакований кварцовий пісок; 3 – гіпсові вкладені елементи; 4 – ВЗ

Структурування суміші проводили впродовж 7...8 хв в мікрохвильовому випромінюванні при потужності магнетрона 700 Вт. Дефекти вимоїна спостерігали та оцінювали візуально.

Швидкість нагрівання гіпсових зразків ∅40×70 мм мікрохвильовим випромінюванням розраховували за результатами вимірювання зміни їх температури за 2...3 хв їх нагрівання. Температуру вимірювали в центрі зразків за допомогою ХА-термопари в комплекті з електронним потенціометром.

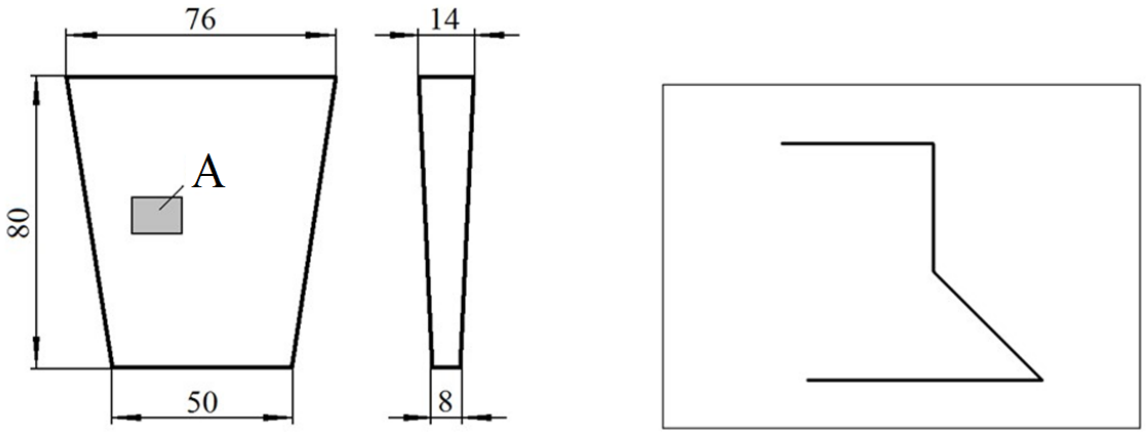
2.6.8 Шорсткість поверхні виливків

У дослідженнях для виготовлення ливарних форм використовували такі матеріали: кварцовий пісок; РС; газ вуглекислий (балонний); сталь 30Л; сірий чавун СЧ200; бронзи БрО5С5Ц5 та БрА9Ж3Л; сталь 40Х24Н18С2Л.

Відповідно до ДСТУ 8981:2020 при визначенні параметрів шорсткості будь-якої поверхні базовою лінією є середня лінія її мікропрофілю, а клас чистоти поверхні оцінюють за величиною Ra (мкм) – середньоарифметичним відхиленням мікропрофілю поверхонь. Шорсткість литої поверхні виливків, отриманих в формах, виготовлених за ПМЗ-процесом, визначали на виливках циліндричної форми ∅30×150 мм зі сталі 40Х24Н18С2Л, 30Л, сірого чавуну СЧ200, бронзи БрО5С5Ц5 і БрА9Ж3Л. Всі сплави заливали з величиною

перегріву 80...110 °С в форми з кварцового піску, попередньо плакованого 1,1% натрієвим РС (за масою, понад 100% піску) і структурованого за ПМЗ-процесом впродовж 5 хв. Перед вимірами шорсткості поверхню виливків очищували металевою щіткою від залишків формувальної суміші. Визначення параметрів шорсткості литих поверхонь проводили на профілографі в комплекті з ІОК мод. 170622.

З метою мінімізації впливу величини металостатичного напору в формі на величину шорсткості поверхні виливків, а також визначення впливу вмісту РС, яке було використане на плакування кварцового піску, температури перегріву розплаву при заливці, відливали клиноподібні виливки трапецієподібної форми з алюмінієвого сплаву АЛ2. Схема моделі клиноподібного виливка представлена на рис. 2.13,а, схема траси профілометра загальною довжиною не менше 8 мм – на рис. 2.13,б.



а б

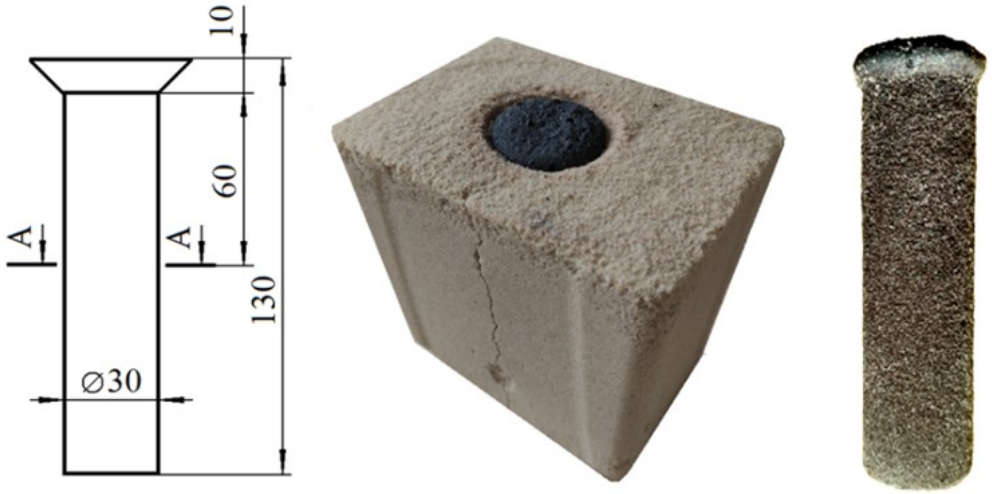
Рисунок 2.13 – Схема моделі виливка для визначення шорсткості поверхні на ділянці А (а) і траси профілометра на ділянці А (б)

2.6.9 Оцінювання якості литої поверхні

У дослідженнях використовували форми, виготовлені за Cold-box-amin-процесом з 2% (за масою) сполучної речовини, Resol-CO_2-процесом з 5%

сполучної речовини, CO_2-процесом з 5% сполучної речовини і за способом ПМЗ з 1% сполучної речовини. Зразки виготовляли зі сталей 30Л, 20Х27Н18С2Л, сірого чавуну СЧ200, бронз БрА9Ж3л, БрО5Ц5С5, БрО4Ц4С17, алюмінієвого сплаву АЛ2. Перегрів розплаву всіх сплавів при заливанні в форму складав 120±7 °С.

Вплив типу формувальної суміші на якість поверхні виливків зі сталі 30Л оцінювали візуально на зразках циліндричної форми, схема яких, вид залитої ливарної форми і вибитого з форми зразка представлені на рис. 2.14.



а б в

Рисунок 2.14 – Схема циліндричного зразка (а), вид залитої ливарної форми (б) і вибитого з форми зразка (в)

Для металографічних досліджень зразки зі сталі 30Л, відлиті в форми з різних сумішей, розрізали по лінії А-А (див. рис. 2.14,а). Мікроструктуру зразків досліджували на оптичному мікроскопі МБС-10 до і після їх травлення ніталем. Об'ємний вміст перліту в зразках визначали по зображеннях мікроструктури 5-ти полів кожного шліфа на видаленні 5 мм від їх циліндричної поверхні в перерізі А-А з використанням комп'ютерної програми ImageJ 1.53e (http://imagej.nih.gov/ij).

2.6.10 Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей

Плакування кварцового піску для виготовлення ливарної форми проводили шляхом введення в нього 1% РС (за масою, понад 100% піску), сушіння піску на повітрі протягом 2 години при кімнатній температурі і подальшого сушіння його в мікрохвильовій печі протягом 3 хв.

Для отримання замороженої піщано-водяної моделі використовували суміш кварцового піску з 5% (за масою, понад 100% піску) дистильованої води. Заморожування моделі проводили в морозильній камері з температурою -17 °С протягом 12 годин.

2.7 Статистичні методи обробки експериментальних даних

Значення середньої арифметичної вибірки (величини х) розраховували за формулою:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_n}{n}, \qquad (2.10)$$

де $x_1, x_2,...x_n$ – значення виміру i-ого елементу вибірки;
n – число вимірів величини x (обсяг вибірки).

Середнє квадратичне відхилення величини (показник розсіювання значень випадкової величини x щодо її математичного очікування) розраховували за формулою [312, 313]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x} \right)^2} . \qquad (2.11)$$

Дисперсію (міру розкиду даних навколо їх середньої арифметичної величини) розраховували за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2 . \qquad (2.12)$$

Кореговане стандартне відхилення (незміщену оцінку середньо-квадратичного відхилення випадкового значення величини x відносно її математичного очікування) при вибірці (n≤50) розраховували за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1}\cdot\sigma^2} , \qquad (2.13)$$

або:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} . \qquad (2.14)$$

Мінімальну кількість випробовуваних зразків визначали за величиною коефіцієнта варіації (відносним розкидом даних у вибірці) при довірчій ймовірності 0,95, %:

$$V = 100\cdot\frac{\sigma}{\bar{x}} , \qquad (2.15)$$

з використанням номограми, на рис. 2.15 [314].

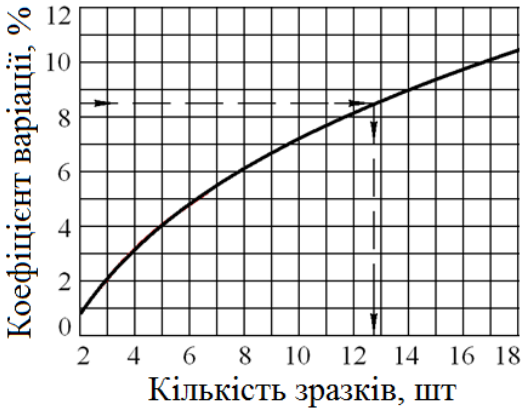


Рисунок 2.15 – Номограма для визначення мінімального числа випробовуваних зразків (довірча ймовірність – 0,95) [314]

2.8 Висновки

1. У роботі використані стандартні методи і методики, обладнання, прибори, вимірювальні інструменти, загальноприйняті, відомі і оригінальні методики, які у сукупності з статистичними методами обробки експериментальних даних та визначенням мінімального числа випробовуваних зразків з довірчою ймовірністю 0,95, дозволили встановити об'єктивний зв'язок між досліджуваними параметрами, визначити раціональні умови використання ПМЗ-процесу та оптимізувати склад ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом.

2. На основі стандартних та загальноприйнятих методів і методик досліджень розроблені методики, що дозволяють провести якісну і кількісну оцінку досліджуваних параметрів, встановити кінетику та механізми реалізації досліджуваних процесів та явищ.

РОЗДІЛ 3. НАГРІВАННЯ ТВЕРДИХ ТА РІДКИХ МАТЕРІАЛІВ В ОБЛАСТІ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Оцінюючи будь-який спосіб нагрівання, його, перш за все, розглядають з точки зору швидкості підвищення температури речовини (матеріалу, мінералу, виробу), що нагрівають. При мікрохвильовому нагріванні основним параметром, що визначає швидкість нагрівання будь-якої речовини (матеріалу, мінералу) є величина її/його діелектричної проникності [166].

Діелектрична проникність є числовим показником здатності речовини (матеріалу, мінералу) змінювати напруженість первинного електричного поля, що обумовлено виникненням явища поляризації – упорядкуванням в речовині орієнтування пов'язаних електричних зарядів. Тобто, величина діелектричної проникності показує у скільки разів досліджувана речовина в мікрохвильовому випромінюванні зменшує напруженість електричного поля між електричними зарядами в порівнянні з вакуумом.

У мінералів з початком підвищення температури величина діелектричної проникності збільшується незначно. Після досягнення певного значення температури діелектрична постійна різко підвищується, прагнучи певного постійного значення, притаманного даній речовині (матеріалу, мінералу) [315]. При цьому, діелектрична проникність для одних і тих же матеріалів залежить від ряду факторів, в числі яких їх склад, чистота (вид та кількість домішок), наявність вологи, щільність, твердість, електричний опір, методика визначення цього параметру та інше [325, 361].

В свою чергу, особливості розподілу вузлів та пучностей стоячих хвиль в резонаторі будь-якої мікрохвильової печі, маса речовини або речовин, їх вологість, місць розташування на обертовому столі, конфігураційних особливостей виробу, що нагрівають, і таке інше відповідним чином привносять певні зміни в процес, характер та швидкість нагрівання речовин (матеріалів, мінералів) мікрохвильовим випромінюванням [192].

3.1 Діелектрична проникність зернистих вогнетривких матеріалів

Питому потужність мікрохвильового випромінювання, що витрачається на нагрівання матеріалу, розраховували за формулою [316], Вт/см^3:

$$p = 55{,}63 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot f, \tag{3.1}$$

де ε – відносна діелектрична проникність матеріалу, що нагрівають;

ε_0 – електрична постійна ($8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

E – вектор напруженості електромагнітного поля, В/м;

f – частота електромагнітного поля, Гц.

Тривалість нагрівання матеріалу від його початкової (t_1) температури до температури t_2 розраховували за формулою, с:

$$\tau_A = \frac{c \cdot m(t_2 - t_1)}{p} = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{p}. \tag{3.2}$$

Оскільки:

$$p = F_p \cdot P_M,$$

де F_p – коефіцієнт, що враховує зниження питомої потужності магнетрона в і-тій точці резонатора мікрохвильової печі, то з формули (3.2) знаходимо, що швидкість підвищення температури матеріалу, що нагрівають в мікрохвильовому випромінюванні, становить:

$$w = \frac{\Delta t}{\tau} = \frac{F_p \cdot P_M}{c \cdot m}, \text{ °C/хв.} \tag{3.3}$$

В той же час, вирішуючи (3.2) відносно *p,* отримуємо:

$$p = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{\tau} \quad . \tag{3.4}$$

Для проведення розрахунків формулу (3.1) запишемо у вигляді:

$$\varepsilon = \Delta \cdot p, \tag{3.5}$$

де Δ – постійна величина для умов проведення прийнятого експерименту.

Експериментальні значення величин швидкості нагріву випробуваних зернистих матеріалів наведені в табл. 3.1 [317].

Таблиця 3.1

Швидкість нагрівання зернистих матеріалів мікрохвильовим випромінюванням

Матеріал	Хімічна формула (прийнята питома щільність основної речовини матеріалу, кг/м^3)	w, °С/хв
Силікат-брила (содова)	$nNa_2O \cdot mSiO_2$ (2440)	122,0±8
Рутил	TiO_2 (4290)	38,6±1,4
Електрокорунд нормальний	α-Al_2O_3 (3970)	48,0±1,0
Концентрат цирконовий	$ZrSiO_4$ (4670)	22,6±1,2
Кварцит рожевий	SiO_2 (2650)	14,5±0,7
Концентрат дистен-сіліманітовий	$nAl_2O_3 \cdot mSiO_2$ (3520)	20,4±0,8
Шамот	$nAl_2O_3 \cdot mSiO_2$ (3000)	25,4±2,1
Пісок кварцовий	SiO_2 (2650)	28,0±1,5
Натрій хлористий	NaCl (2164)	26,4±1,3
β-Гіпс (Г-4)	$CaSO_4$ (2320)	22,6±0,9
α-Гіпс (Г-22)	$CaSO_4$ (2320)	12,0±0,3

Використовуючи дані табл. 3.1 , прийнявши Δ=0,07, за формулами (3.3) і (3.5) розрахували значення p і ε для досліджуваних матеріалів.

Результати розрахунку і значення ε з літературних і електронних джерел наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахункові значення p і ε для середніх значень параметрів досліджуваних матеріалів, що нагрівають мікрохвильовим випромінюванням з частотою 2,45 ГГц з номінальною потужністю магнетрона 700 Вт протягом 60 с

Матеріал	c, $\frac{Дж}{кг \cdot град}$	Δt, °C	m, г	p, $\frac{Вт}{см^3}$	ε	
					розр. за (3.5)	з джерел [319…324]
Силікат-брила (содова)	837	122,0	144	245	17,2	16
Рутил	690	38,6	222	99	6,9	10,6-175
Електрокорунд нормальний	800	48,0	170	109	7,6	10,5-12
Концентрат цирконовий	550	22,6	218	45	3,2	3,6-5,2
Кварцит рожевий	980	14,5	200	47	3,3	4,5-6,0
Концентрат дистен-сіліманітовий	900	20,4	200	61	4,3	5,7
Шамот	825	25,4	200	70	4,9	5,5
Пісок кварцовий	740	28,0	191	66	4,6	2,5-3,5
Натрій хлористий	920	26,4	187	76	5,3	23
β-Гіпс (Г-4)	880	22,6	195	65	4,5	2,5-6,0
α-Гіпс (Г-22)	880	12,0	195	34	2,4	

Примітки. розр. – розрахунок

З аналізу даних табл. 3.1...3.2, з урахуванням походження, поширення досліджених матеріалів в Укрііні, їх властивостей і вартості, витікає, що найкращим матеріалом для виробництва ЛФС за ПМЗ-процесом є кварцовий пісок. У той же час для виготовлення оснащення для реалізації ПМЗ-процесу доцільно використовувати α-Гіпс, який з числа досліджених сполучних матеріалів (див. табл. 3.2) характеризується найменшою швидкістю нагрівання в мікрохвильовому випромінюванні.

За винятком силікат-брили за величиною діелектричної проникності досліджені матеріали можливо умовно віднести до групи діелектриків з

низькою діелектричною проникністю (ε<10). При цьому, між величиною ε і швидкістю нагрівання даних матеріалів при Δ=0,07 існує прямий пропорційний зв'язок, про що свідчить залежність на рис. 3.1.

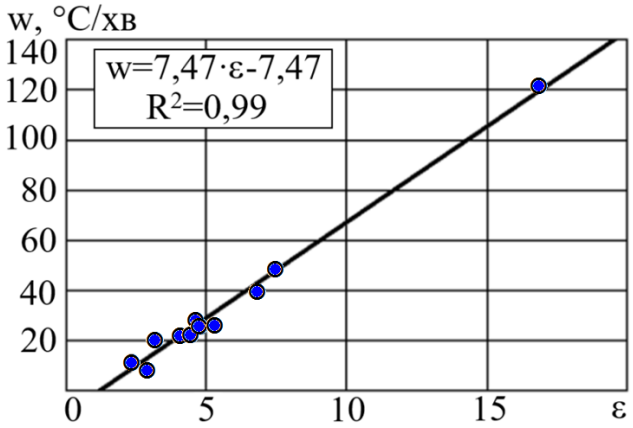


Рисунок 3.1 – Залежність w=f(ε) при частоті мікрохвильового випромінювання 2,45 ГГц

Різниця між розрахунковими та експериментальними даними по діелектричній проникності матеріалів (див. табл. 3.2) пояснюється, як залежністю даного параметра від їх хімічного складу, методики досліджень, так і частоти використаного мікрохвильового випромінювання [325, 406]. Тобто, досліджувані зернисті матеріали (див. табл. 3.2) в своєму складі крім основної речовини містять і речовини-домішки, які впливають на величину їх ε.

Виходячи з природи виникнення випробуваних матеріалів (їх хімічної чистоти) можна припустити, що вони не є механічними сумішами основної речовини і речовин-домішок, а сплавами цих речовин. При цьому, що витікає з відомостей по мінералогії, речовини-домішки змінюють не тільки фізико-хімічні показники основної речовини, але і її структуру.

У зв'язку з цим, для оцінки впливу основної речовини і речовин-домішок на величину відносної діелектричної проникності досліджуваних діелектриків для матеріалів з умовно низькою діелектричною проникністю, використовуючи дані табл. 3.1 і табл. 3.2, запишемо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} 97\cdot TiO_2+1,7\cdot Fe_2O_3+0,5\cdot Al_2O_3+0,4\cdot SiO_2+0,2\cdot ZrO_2 =6,9; \\ 95\cdot Al_2O_3+0,5\cdot Fe_2O_3+1,8\cdot TiO_2+0,6\cdot CaO = 7,6; \\ 65\cdot ZrO_2+32,5\cdot SiO_2+2\cdot Al_2O_3+0,4\cdot TiO_2+0,1\cdot Fe_2O_3 = 3,2; \\ 57,8\cdot Al_2O_3+39\cdot SiO_2+1,8\cdot TiO_2+0,8\cdot ZrO_2+0,8\cdot Fe_2O_3 + \\ +0,4\cdot(Na_2O+K_2O+MgO+CaO) =4,3; \\ 28\cdot Al_2O_3+64,1\cdot SiO_2+6,1\cdot Fe_2O_3= 4,9; \\ 99,7\cdot SiO_2 +0,07\cdot Al_2O_3+ 0,03\cdot Fe_2O_3+ \\ +0,29\cdot(Na_2O+K_2O+CaO+MgO) = 4,6. \end{cases} \quad (3.6)$$

Позначивши сумарний масовий вміст Na_2O, K_2O, CaO і MgO в досліджуваних матеріалах, як компонент f і перейменувавши f в x_1, SiO_2 в x_2, Al_2O_3 в x_3, Fe_2O_3 в x_4, TiO_2 в x_5, ZrO_2 в x_6 приходимо до наступної системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} 0,4\cdot x_2+0,5\cdot x_3+1,7\cdot x_4+97\cdot x_5+0,2\cdot x_6=6,9; \\ 0,6\cdot x_1+95\cdot x_3+0,5\cdot x_4+1,8\cdot x_5=7,6; \\ 32,5\cdot x_2+2\cdot x_3+0,1\cdot x_4+0,4\cdot x_5+65\cdot x_6=3,2; \\ 0,4\cdot x_1+39\cdot x_2+57,8\cdot x_3+0,8\cdot x_4+1,8\cdot x_5+0,8\cdot x_6 =4,3; \\ 64,1\cdot x_2+28\cdot x_3+6,1\cdot x_4=4,9; \\ 0,29\cdot x_1+99,7\cdot x_2+0,07\cdot x_3+0,03\cdot x_4=4,6. \end{cases} \quad (3.7)$$

Вирішив систему (3.7) методом Гауса, для зернистих матеріалів, що містять за масою SiO_2 в межах від 0 до 99,7%, Al_2O_3 – 0,07...95,0%, ZrO_2 – 0...65% , TiO_2 – 0...97%, Fe_2O_3 – 0,03...6,1% і сумарного вмісту Na_2O + K_2O + CaO + MgO – від 0 до 0,6%, отримали наступне рівняння:

$$\varepsilon = 0,0307\cdot ZrO_2 + 0,0326\cdot SiO_2 + 0,0483\cdot Al_2O_3 + 0,0665\cdot TiO_2 + \\ + 0,2394\cdot Fe_2O_3 + 4,6262\cdot(Na_2O + K_2O + CaO + MgO), \quad (3.18)$$

де ZrO_2, SiO_2, Al_2O_3 і інші – масовий вміст речовин, %,

з якого витікає, що величина ε досліджуваних матеріалів залежить виключно від їх хімічного складу і з точністю, прийнятною для інженерних розрахунків, може бути визначена за правилом адитивності на основі масового вмісту простих речовин (у даному випадку – оксидів). При цьому, якщо в (3.8) масовий вміст оксидів представити в масових долях, то, по суті, коефіцієнти до них є величинами діелектричної проникності цих речовин в чистому вигляді, а саме: ε_{ZrO2} = 3,07; ε_{SiO2} = 3,26; ε_{Al2O3} = 4,83; ε_{TiO2} = 6,65; ε_{Fe2O3} = 2,39. Таким чином, виходячи з того, що у повітря ε = 1,0001959 [326], для інженерних розрахунків припустимо скористатися спрощеною формулою залежності w=f(ε), яка має вигляд (°С/хв):

$$w=7,47\cdot(\varepsilon-1), \tag{3.9}$$

і з якої випливає, що швидкість підвищення температури матеріалу з ε≤10, що нагрівають в пучності мікрохвильового випромінювання з частотою 2,45 ГГц, прямо пропорційна величині його відносної діелектричної проникності і залежить виключно від його хімічного складу.

Отримані закономірності також свідчать про те, що за рахунок використання матеріалів з різною діелектричною проникністю в складі як використаного оснащення або ФСС, так і їх окремих елементах можливо ефективне управління інтенсивністю їх нагріву. При цьому повинно існувати відповідне співвідношення між масою, наприклад, води та масою зернистого матеріалу, при якому співпадає час їх нагрівання до 100 °С.

3.2 Розподіл пучностей мікрохвильового випромінювання в резонаторі мікрохвильової печі

В резонаторах мікрохвильових печей мають місце пласкі стоячі хвилі мікрохвильового випромінювання, що певним чином впливає на характер та величину розподілу пучностей в об’ємі резонатору. Відповідно, в залежності

від частоти обертання столу в резонаторі, положення наважок з матеріалами на обертовому столі, а також напрямку обертання столу для кожної наважки початок і інтенсивність нагріву будуть відрізнятися. Цю закономірність можна пояснити схемою, що представлена на рис. 3.2 [327].

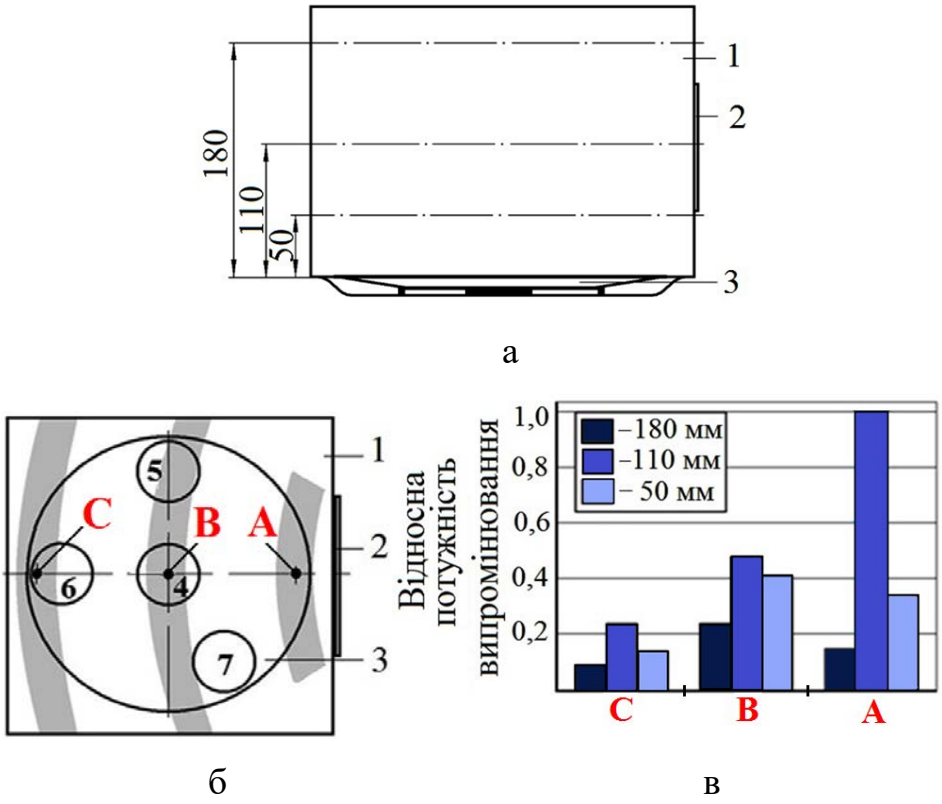


Рисунок 3.2 – Схема резонатора (а), розташування наважок води на обертовому столі (б), гістограма відносної потужності в точках А, В, С на різних рівнях від днища резонатору (в): 1 – резонатор; 2 – вихід хвилеводу в резонатор; 3 – обертовий стіл; 4...7 – наважки

На рис. 3.2,а представлена схема резонатора мікрохвильової печі із зазначенням відстані від її днища (вигляд збоку) і активні області (пучності) нагріву мікрохвильовим випромінюванням на відстані 110 мм від днища резонатора, які на рис. 3.2,б (вигляд зверху) виділені сірим кольором.

На гістограмі рис. 3.2,в представлені дані відносної (щодо точки «А», на відстані 110 мм від днища резонатора) потужності мікрохвильового випромінювання на відстані 50, 110 і 180 мм від днища резонатора печі.

У відповідності зі схемою на рис. 3.2,б наважка матеріалу (у даному випадку наважка води в стакані з картону), що нагрівають, наприклад, може бути поміщена в місця, позначені на рисунку цифрами від 4 до 7, що суттєво впливає на час нагрівання та випаровування води з наважок під дією мікрохвильового випромінювання.

Виходячи з отриманих результатів, характер нагріву наважок можна розділити на 3 типи:

- тип 1 – безперервний нагрів (наважка 4 на рис. 3.2,б);
- тип 2 – змінний нагрів з початком нагріву в області пучностей (наважка 5 і 6 на рис. 3.2,б);
- тип 3 – змінний нагрів з початком нагріву в вузлі стоячій хвилі (наважка 7 на рис. 3.2,б).

Відповідно до гістограми на рис. 3.2,в на рівні 110 мм від днища резонатора потужність мікрохвильового випромінювання в зонах пучностей в міру віддалення від хвилеводу знижується по статечній залежності. У той же час на рівні 50 і 180 мм потужність в зонах пучностей нижче, ніж на рівні 110 мм, а її зміна носить екстремальний характер з максимумом в центральній частині. Дані закономірності пояснюються тим, що рівень 110 мм відповідає центру вікна виходу хвилеводу в резонатор, а затухання амплітуди хвилі в міру віддалення від хвилеводу носить статечний характер. У той же час рівень 50 мм відповідає положенню нижньої кромки вікна хвилеводу, що, відповідно, призводить до значного зниження потужності мікрохвильового випромінювання в цій області.

Хвилям мікрохвильового випромінювання, як і хвилям іншої природи, притаманний процес загасання, що позначається на зниженні потужності мікрохвильового випромінювання з віддаленням від виходу хвилеводу в резонатор. В випадку мікрохвильового випромінювання загасання хвиль обумовлено як поглинанням енергії хвиль в печі матеріалом наважки, що нагрівають, так і конструкцією хвилеводу, і стінками резонатора.

Величину коефіцієнта загасання (χ) мікрохвильового випромінювання в

резонаторі реальних мікрохвильових печей оцінювали, як співвідношення тривалості нагріву і випаровування 100 г води з картонного стакану, розташованого на різному віддаленні від центру обертового столу мікрохвильової печі (24, 36, 48, 60, 84, 120 мм), до суми теоретичних величин для прийнятих параметрів проведення експериментів, розрахованих за формулами [328, 329]:

$$\chi=\tau_P/\tau, \tag{3.10}$$

$$\tau = \tau_A + \tau_A^* = \frac{c_A \cdot m_A \cdot \Delta t_A}{P_M} + \frac{L_A \cdot m_A}{P_M} = \frac{(c_A \cdot \Delta t_A + L_A) m_A}{P_M}, \tag{3.11}$$

де τ_P, τ – реальний та теоретичний час нагрівання та випаровування наважки води мікрохвильовим випромінюванням відповідно, с;

τ_A, τ^*_A – час нагрівання від початкової температури до 100 °С та випаровування наважки води мікрохвильовим випромінюванням відповідно, с;

c_A – питома теплоємність води, Дж/(кг·°С);

m_A – маса наважки води, кг;

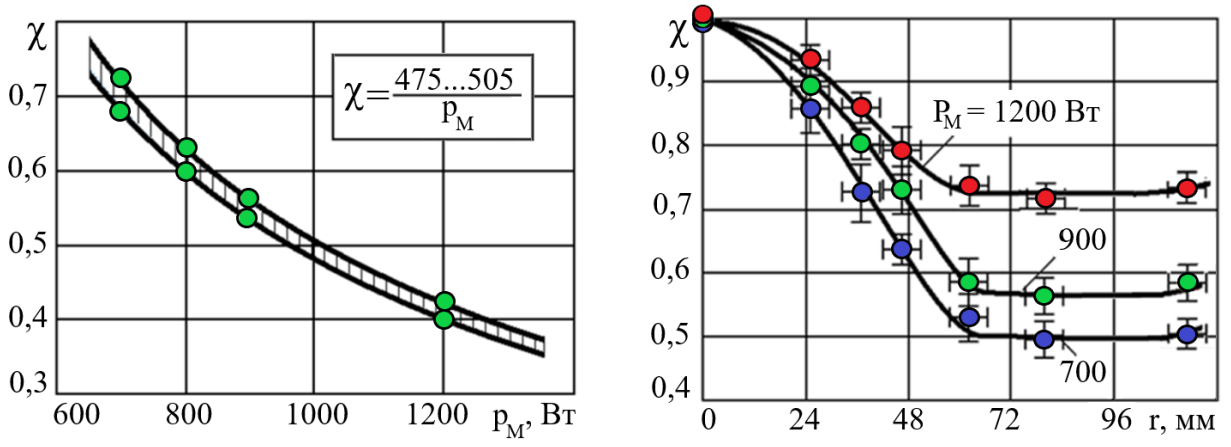
Δt_A – різниця між кінцевою (100 °С) і початковою температурою води, що нагрівають протягом часу τ, °С;

L_A – питома теплота випаровування води, Дж/кг;

P_M – номінальна потужність магнетрона мікрохвильової печі, Вт.

Результати розрахунків і експериментів представлені у вигляді залежностей на рис. 3.3 [330].

На рис. 3.3,а представлена залежність співвідношення реального і теоретичного, розрахованого за формулою (3.10), часу нагрівання і випаровування води з наважки, розташованої в центральній області обертового столу, від номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі. Час випаровування води з наважки фіксували за результатом вимірювання її маси з точністю 0,1 г.



а б

Рисунок 3.3 – Залежність χ в центральній області резонатора від номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі (а) та від номінальної потужності її магнетрона і віддалення від вісі обертового столу (б)

Відповідно ходу залежності на рис. 3.3,а реальна потужність мікрохвильового випромінювання в центральній області мікрохвильової печей становить χ=0,40...0,72 номінальної потужності їх магнетронів, що пояснюється конструктивними особливостями та призначенням використовуваних в дослідженнях моделей мікрохвильових печей.

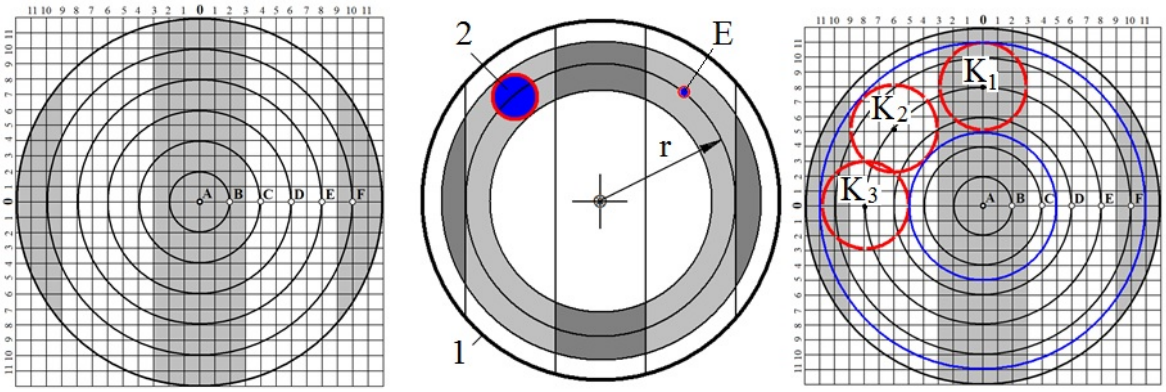
Справа в тому, що використані в експериментах мікрохвильові печі призначені для роботи з харчовими продуктами. У зв'язку з цим, конструкція їх резонаторів і хвилеводів виконана таким чином, щоб при забезпеченні максимально можливої рівномірності нагріву продуктів не допустити їх перегрів або перевитрат.

На рис. 3.3,б представлені залежності величин співвідношення реального і теоретичного, розрахованого за формулою (3.11), часу нагрівання і випаровування води з наважок від віддалення від вісі обертового столу та номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі.

Відповідно ходу залежностей на рис. 3.3,б, найбільша реальна потужність мікрохвильового випромінювання спостерігається в центральній області мікрохвильової печі. З віддаленням від вісі обертового столу реальна

потужність мікрохвильового випромінювання різко знижується і на відстані більше ~60 мм складає χ=0,29...0,36 номінальної потужності їх магнетронів, що пояснюється особливостями стоячих хвиль в резонаторі.

До різновидів і особливостей реалізації технології за способом ПМЗ належать і розміри у плані наважок води (ВЗ). Тому необхідно встановити вплив габаритних розмірів наважок та місця їх розташування на обертовому столі на тривалість випаровування з них води. Ця необхідніть пояснюється схемою на рис. 3.4 [331].



а б в

Рисунок 3.4 – Схеми пучностей (темно-сірі) і вузлів (білі) на контурі в координатній сітці обертового столу (а), розташування великої і точкової наважок (б), схема проходження наважкою радіусом, рівним половині довжині стоячої хвилі мікрохвильового випромінювання зон пучностей і вузлів при обертанні столу проти годинникової стрілки (в): 1 – обертовий стіл (в плані); 2 – наважка великого діаметра; Е – наважка точкового типу

Якщо на контур обертового столу мікрохвильової печі в плані нанести координатну сітку і затемнити на ній поверхні, що знаходяться в області пучностей, то в першому наближенні така схема відповідатиме зображенню, представленому на рис. 3.4,а, де можливі траєкторії переміщення центрів основ наважок позначені літерами від А до F.

Припустимо, що на віддаленні від вісі обертання на поверхні столу

розмішені дві наважки – наважка 2 з великим діаметром основи в плані (див. рис. 3.4,б) і наважка точкового типу – Е. У цьому випадку, роблячи один оберт навколо вісі обертового столу мікрохвильової печі, траєкторія точкової наважки може бути представлена у вигляді лінії – кола радіусом r. Тривалість переходу меж зон пучностей і вузлів точковою наважкою прагне до нулю. У той самий час для наважки 2 (див. рис. 3.4,б) траєкторія її руху по колу є коло з певною площею. При цьому тривалість переходу меж зон пучностей і вузлів такою наважкою різко зростає, процес нагрівання води в областях пучностей стає складнішим. Це пов'язано з тим, що, наприклад, відповідно до схеми на рис. 3.4,в, така наважка з області пучності (положення $К_1$) протягом певного часу переміщується в область вузла (положення $К_2$) стоячих хвиль. Після цього дана наважка входить в область пучності меншої потужності, але не повністю, а фрагментарно (положення $К_3$) і т.д.

Якщо припустити, що тривалість нагрівання і випаровування води з наважки зворотно пропорційна тривалості її перебування в зонах пучностей, а тривалість нагрівання і випаровування води з наважок пропорційні довжині дуг, що відсікаються зонами пучностей на схемі рис. 3.4,а, то можливо розрахувати залежність зміни потужності випромінювання від віддалення наважки точкового типу від вісі обертового столу. Тобто, для точкової наважки умовну тривалість перебування в зонах пучностей розраховували шляхом підсумовування довжин дуг, які відсікає зона пучності на траєкторії переміщення точкової наважки на прийнятому для розрахунків її віддалення від центру обертання столу мікрохвильової печі. За відносну одиницю (F_h) прийнято час випаровування води з наважки в центрі обертового столу.

Результати розрахунку представлені на рис. 3.5, а на рис. 3.6 – вигляд хвиль випромінювання в резонаторі (поверхня з нульовою тепловою активністю затемнена) мікрохвильового випромінювання в резонаторі [331].

Для порівняння, на рис. 3.5 нанесена область усереднених значень для реальних наважок масою 0,1 кг (3) з радіусом основи в плані 50 мм.

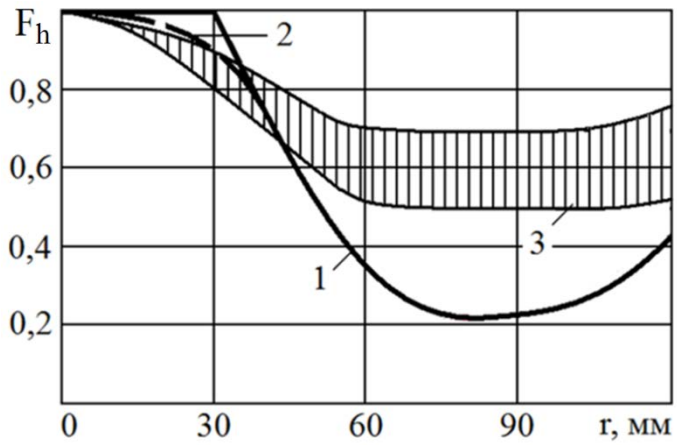
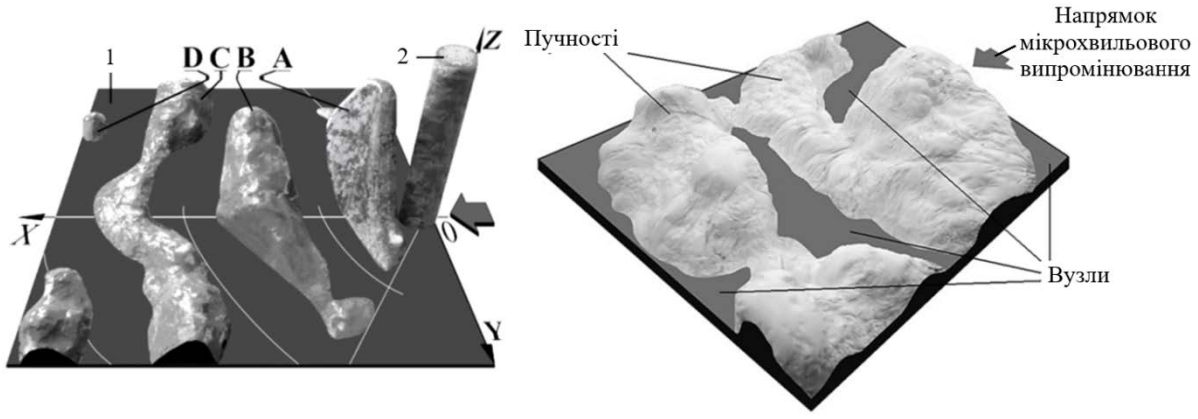


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта F_h від відстані від вісі обертання обертового столу гіпотетичних наважок точкового типу (1, 2) і реальної наважки масою 0,1 кг з радіусом основи в плані 50 мм (3)



а б

Рисунок 3.6 – Вигляд хвиль випромінювання в резонаторі без наважок [311] (а) та при нагріванні на обертовому столі чотирьох наважок води по 100 г кожна [327] (б): 1 – вузли; 2 – найбільша пучність; A, B, C, D – пучності, відповідно, першого, другого, третього та четвертого порядку

З аналізу залежностей на рис. 3.5, витікає, що характер зміни потужності мікрохвильового випромінювання від радіусу віддалення від вісі обертового столу ідентичний для обох наважок. При цьому, залежність 1 розраховували, прийнявши положення про те, що потужність мікрохвильового випромінювання стала по ширині будь-якої пучності. Насправді, виходячі з

класично відомої форми хвилі [332], в зоні пучності максимальна потужність розташовується в її середині і за синусоїдальною залежністю знижується з віддаленням від її центру. Якщо врахувати цю обставину, то хід залежності для наважки точкового типу в інтервалі від r = 0 до r = 30 мм можливо описати спадаючою кривою 2.

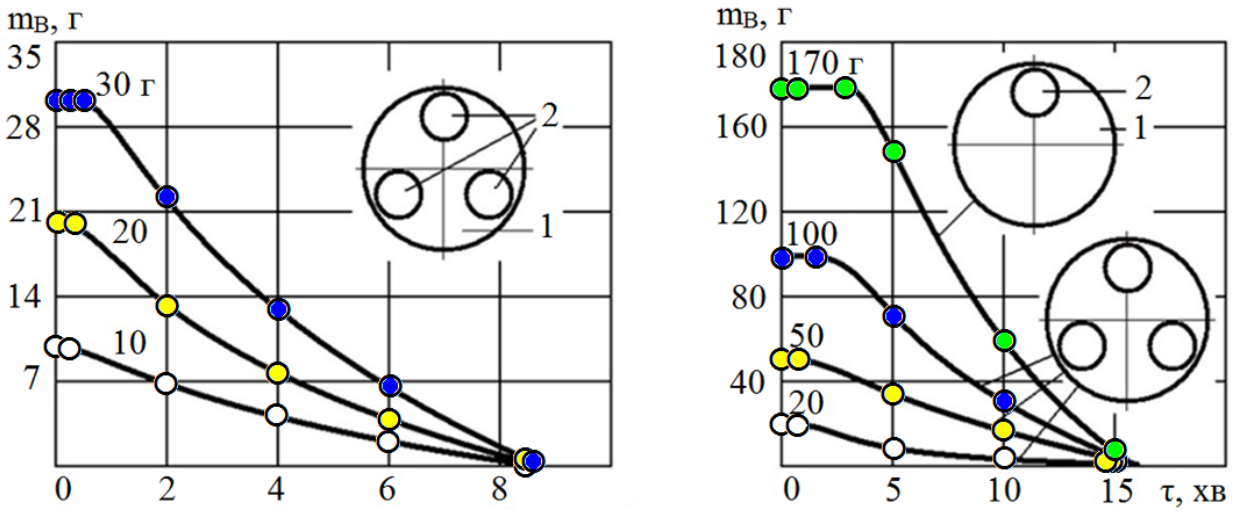
Отримані залежності підтверджують вирішальне значення характеру розподілу стоячих хвиль у резонаторі на однорідність та інтенсивності нагріву в ній тіл та матеріалів. Розбіжність ходу залежностей 1 та 3 на рис. 3.5 обумовлена відмінністю між теоретичним та реальним характером розподілу пучностів в резонаторі, що витікає з вигляду хвиль на рис. 3.6.

З викладеного вище витікає, що характер зміни потужності мікрохвильового випромінювання від радіусу віддалення наважки від вісі обертового столу носить статечний характер. Відмінність у ступені впливу такого віддалення на зміну інтенсивності нагріву наважок зумовлено їх габаритними розмірами (в плані).

3.3 Вплив положення наважок води на обертовому столі і їх маси на час випаровування під дією мікрохвильового випромінювання

Залежності характеру зміни маси наважок води різної початкової маси розташованих на одному радіусі обертового столу від тривалості їх нагрівання в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 900 Вт, представлені на рис. 3.7 [327].

Аналіз ходу залежностей на рис. 3.7 свідчить, що незалежно від початкової маси води і числа наважок, вода з кожної наважки випарується практично за той же час, за який би вода випарувалася з однієї наважки масою, що дорівнює сумі всіх наважок. Тобто, незалежно від початкової маси води в наважці швидкість її випаровування з кожної наважки, що одночасно нагрівають, буде змінюватися пропорційно співвідношенню її вихідної маси до вихідної маси всіх наважок за весь час випаровування.



а б

Рисунок 3.7 – Залежність маси води в наважках від тривалості їх нагрівання в мікрохвильовій печі при загальній сумарній масі води в трьох наважках 60 г (а), при початковій масі води в одній наважці 170 г і тієї ж сумарної масі води в трьох наважках масою 20, 50 і 100 г (б):1 – обертовий стіл; 2 – наважка води

При цьому, з аналізу гістограми на рис. 3.8 випливає, що тривалість випаровування води під дією мікрохвильового випромінювання зростає зі збільшенням вихідної маси води, що нагрівають в печі.

З аналізу гістограми на рис. 3.9,б випливає, що початкове положення наважок на обертовому столі (див. рис. 3.9,а) істотно впливає на тривалість нагрівання і випаровування з них води. При цьому збільшення номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі від 700 до 1200 Вт практично не впливає на середню тривалість нагрівання і випаровування води з наважок, але підвищує рівномірність їх нагрівання. Зокрема, в мікрохвильовій печі з номінальною потужністю магнетрона P_M=700 Вт тривалість нагрівання і випаровування води з наважок склала 2835±225 с, при P_M=900 Вт – 2832±67 с і при P_M=1200 Вт – 2797±51 с.

Отриманий результат не узгоджується з теоретичною формулою (3.11), за якою тривалість нагрівання і випаровування води повинна неухильно зменшуватися з підвищенням номінальної потужності магнетрона. Проте,

цей результат стає зрозумілим, якщо врахувати залежність на рис. 3.3,а та тривимірне зображення на рис. 3.6.

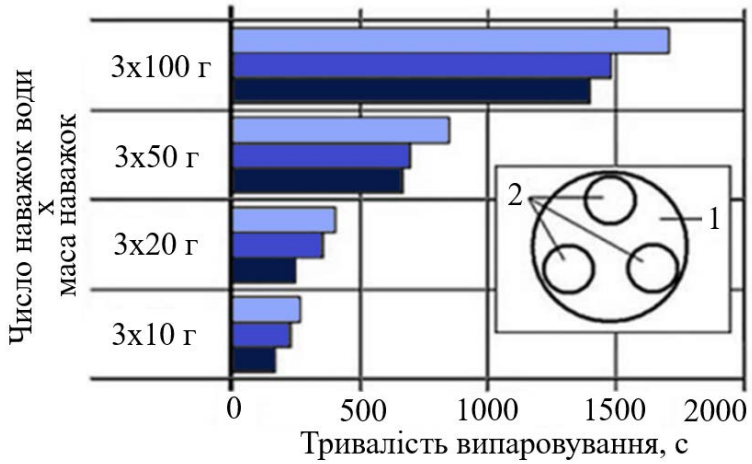
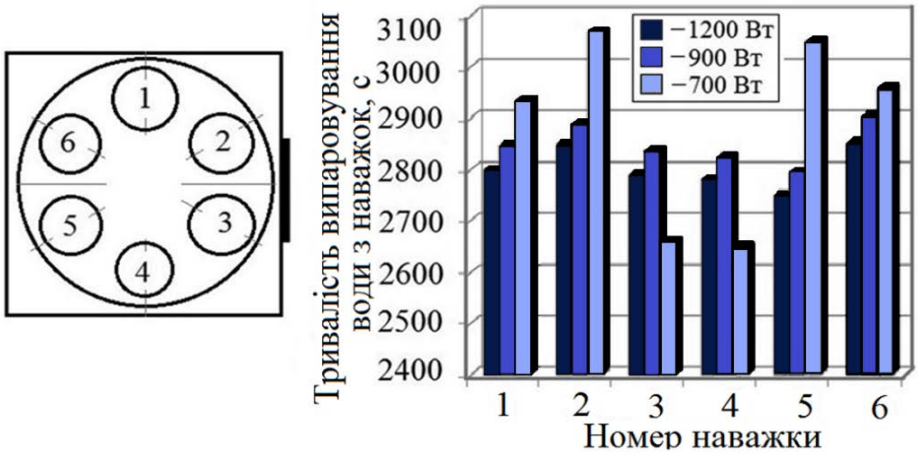


Рисунок 3.8 – Тривалість випаровування води з трьох наважок однакової початкової маси, розташованих на обертовому столі мікрохвильової печі з потужністю магнетрона 900 Вт: 1 – обертовий стіл; 2 – наважка води

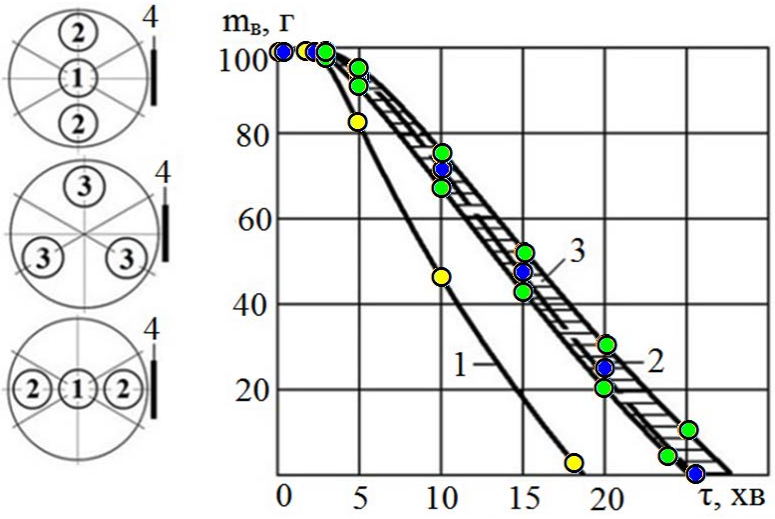


а б

Рисунок 3.9 – Схема розташування наважок води на обертовому столі (а), гістограма тривалості нагрівання і випаровування води з наважок (б): 1...6 – номери наважок води масою 100 г кожна

Для оцінки впливу розташування наважок на обертовому столі на тривалість нагрівання і випаровування з них води, а також для підтвердження

екстремального характеру розподілу потужності в резонаторі з максимумом в його центрі визначали тривалість нагрівання і випаровування води з наважок однакової маси по 100 г кожна. Для цього наважки води однакової маси поміщали на обертовий стіл (P_M=900 Вт) у відповідності до схемам на рис. 3.10,а. Встановлені залежності представлені на рис. 3.10,б.



а б

Рисунок 3.10 – Схеми (в плані) вихідного положення наважок води на обертовому столі (а), залежності маси води в наважках від тривалості їх нагрівання (б): 1...3 – наважки води; 4 – вихід хвилеводу в резонатор

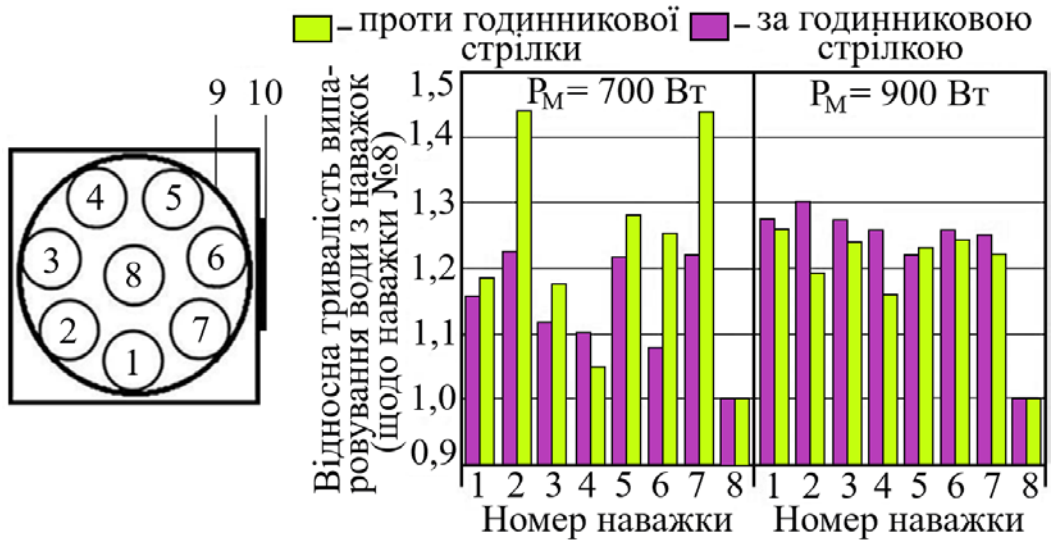
Аналіз залежностей на рис. 3.10,б показує, що загальний час нагрівання і випаровування води з наважок, розташованих в центрі обертового столу і на краю, різний і для наважок №1...№3 ця різниця досягає 28...35%.

Для визначення впливу напрямку обертання наважок на обертовому столі на тривалість нагрівання і випаровування води з наважок, використовували схему розміщення на ньому наважок води масою по 100 г кожна, представлену на рис. 3.11,а.

Результати досліджень представлені у вигляді гістограми на рис. 3.11,б.

Відповідно до даних на рис. 3.11,б, де за одиницю була прийнята тривалість нагрівання і випаровування води з наважки № 8 (в центрі

обертового столу), напрямок обертання наважок на столі також впливає на час випаровування.



а б

Рисунок 3.11 – Схема розташування наважок води по 100 г кожна на обертовому столі (а), гістограма відносної тривалості нагрівання і випаровування води з наважок (б): 1...8 – наважка води; 9 – обертовий стіл; 10 – вихід хвилеводу в резонатор

При цьому різниця тривалості випаровування води з наважок, що обертаються безперервно в різних напрямках, тим значніша, чим нижче потужність мікрохвильової печі, що узгоджується з результатами досліджень, викладених в підрозділі 3.2.

3.4 Випаровування малих мас води при їх обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання

З метою визначення тривалості нагрівання та випаровування води з одиночних наважок, підготовлені наважки води масою до 600 г встановлювали у центрі та рівно віддалено від центру обертового столу печі з номінальною потужністю магнетрону 900 Вт.

Результати вимірювань сумарного часу нагрівання та випаровування води в наважках, що були розташовані в центрі (τ_0) та на відстані 90 мм від центру обертового столу (τ_{90}), а також розрахункові значення середньої масової швидкості випаровування води з наважок (W) представлені в табл. 3.3 [333].

Таблиця 3.3

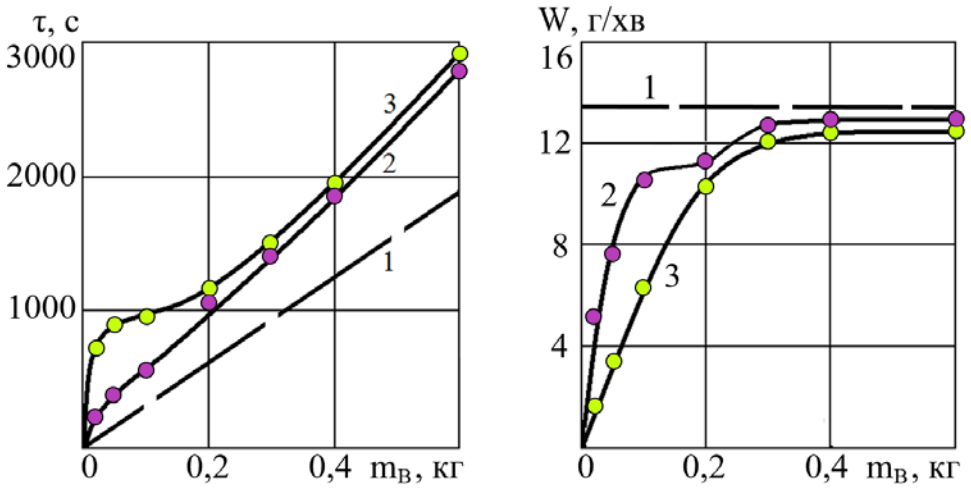
Експериментальні значення тривалості нагрівання та випаровування води, а також середньої масової швидкості випаровування води наважок

Маса наважки, кг	0,02	0,05	0,10	0,2	0,3	0,4	0,6
Схема розташування наважки на обертовому столі							
τ_0, с	232	392	568	1067	1417	1859	2788
W, г/хв	5,17	7,65	10,56	11,25	12,70	12,91	12,91
Маса наважки,кг	0,02	0,05	0,10	0,2	0,3	0,4	0,6
Схема розташування наважок на обертовому столі							
τ_{90}, с	734	894	960	1170	1500	1940	2900
W, г/хв	1,63	3,36	6,25	10,26	12,00	12,37	12,41

За експериментальними (див. табл. 3.3) і теоретично розрахованими даними за формулою (3.2) побудували залежності тривалості нагрівання і випаровування, а так само середньої масової швидкості випаровування води від її початкової маси в наважках, які представлені на рис. 3.12.

Результати аналізу ходу залежностей на рис. 3.12 показують, що:

- тривалість нагрівання та випаровування води з наважок з початковою масою до 600 г більше, а середня масова швидкість випаровування води менше у наважок, розташованих на краю обертового столу, ніж у наважок, розташованих в центрі;



а б

Рисунок 3.12 – Залежність тривалості нагрівання та випаровування (а), середньої масової швидкості випаровування (б) наважок води від їх вихідної маси: 1 – теоретична залежність за формулою (3.2); 2 – експериментальна залежність для наважок в центрі обертового столу; 3 – експериментальна залежність для наважок на краю обертового столу

- тривалість нагрівання та випаровування води з наважок з початковою масою до 600 г і середня масова швидкість випаровування води з наважок неухильно зростає зі збільшенням їх початкової маси;

- з підвищенням початкової маси наважки до 200 г темп зростання досліджуваних параметрів істотно більший, ніж у наважок з початковою масою більше 200 г;

- у наважок з початковою масою понад 200 г рівень зміни показників стають практично однаковими, а середня масова швидкість випаровування води з них із збільшенням їхньої вихідної маси практично не змінюється;

- у наважок з вихідною масою до 200 г, розташованих у центрі обертового столу тривалість нагрівання та випаровування води істотно менша, а масова швидкість випаровування значно більша, ніж у подібних наважок, розташованих на краю обертового столу.

Дані закономірності пояснюються тим, що у формулі (3.2) в знаменнику стоїть величина потужності магнетрону. Тому, за формулою (3.2), чим вища

потужність магнетрону, тим менша тривалість нагрівання та випаровування наважок води. Проте, реальна потужність мікрохвильового випромінювання в центральній області мікрохвильової печі становить χ=0,40...0,72 номінальної потужності їх магнетронів. З віддаленням від вісі обертового столу реальна потужність мікрохвильового випромінювання різко знижується і на відстані більше ~60 мм становить χ=0,29...0,36 номінальної потужності їх магнетронів, що пояснюється характером розподілу в просторі і параметрами стоячих хвиль у резонаторі [330]. Тобто теоретичні та експериментальні дані не можуть збігатися без урахуванням втрат потужності при нагріванні, яка витрачається на нагрівання, як конструктивних елементів резонатору використовуємої мікрохвильової печі, так і наважок води та їх ємностей.

Локальне зниження швидкості випаровування води в інтервалі маси наважок 100...180 г, що розташовані в центрі обертового столу очевидно пов'язане з особливостями використаної методики досліджень та зумовлено насиченням водяною парою простору резонатору мікрохвильової печі під час нагрівання наважки.

Зі збільшенням маси води до 600 г як в одиночній, так і парних наважках, швидкість випаровування води становить в них 12,4…12,9 г/хв, що зумовлює тривалий час її випаровування. Якщо за такий же час мікрохвильовим випромінюванням оброблювати кварцовий пісок, то згідно з формулою (3.11) при відповідній масі кварцового піску, його температура може сягнути вище 100 °С, що унеможливлює виникнення конденсату на піщинках та реалізацію структурування ПРС за ПМЗ-процесом.

Для області малих мас наважок води (до 10 г) залежності на рис. 3.12 були екстрапольовані та на їх основі побудовано аналогічні залежності, які представлені на рис. 3.13.

В результаті математичної обробки екстраполяційних кривих та використання залежності Джоуля-Ленца (3.2) отримали наступну формулу:

$$\tau = \frac{F \cdot \left(c_A \cdot \Delta t_A + L_A\right)}{P_M}, \qquad (3.12)$$

де F – поправочний коефіцієнт, наведений у табл. 3.4.

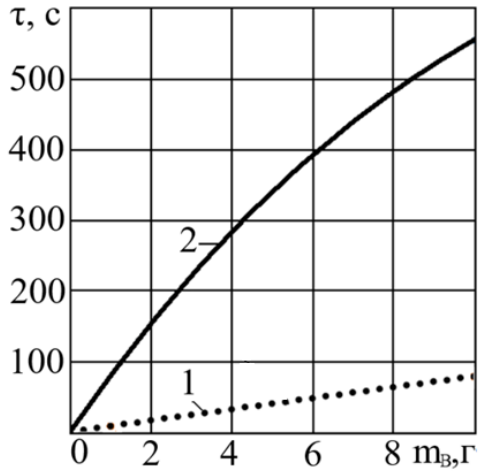


Рисунок 3.13 – Залежність тривалості нагрівання та випаровування наважок води масою до 10 г від її вихідної маси та положення на обертовому столі: 1 – в центрі; 2 – на краю

Таблиця 3.4

Коефіцієнт F для однієї наважки води, що нагрівають в мікрохвильовій печі

Число наважок, що одночасно нагрівають	Розташування на обертовому столі	F
1	в центрі	$2{,}812 \cdot \left(m_B - 3m_B^2\right)$
	на краю	$25{,}7946 \cdot \left(m_B - 25{,}3m_B^2\right)$

Примітка: m_B – маса води у наважці, кг

При математичній обробці прийняли середню питому теплоємність води в інтервалі температур від 20 °С до 100 °С рівною с = 4180 Дж/(кг·°С), питому теплоту випаровування L = 2258000 Дж/кг, Δt = 80 °С та потужність магнетрону P_M = 900 Вт.

В цьому випадку:

$$c_A \cdot \Delta t_A + L_A = 4180 \cdot 80 + 225800 = 2592400 \text{Дж/кг}.$$

Результати перевірки адекватності формули (3.12) і відносні величини розбіжностей між експериментальними та розрахунковими значеннями (розрахунок за формулою 3.2) тривалості нагрівання та випаровування води з одиночних наважок масою до 10 г наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Експериментальні та розрахункові значення тривалості нагрівання та випаровування води з наважок масою до 10 г

Розташування наважок на обертовому столі	Маса води в наважці, г	1	2	3	5	7	10
В центрі	τ, с (експ.)	9	15	23	41	56	77
	τ, с (розр.)	8,1	16,1	24,1	39,9	55,5	78,6
	похибка, %	10,3	-7,4	-4,7	2,7	0,9	-2,0
На краю	τ, с (експ.)	65	135	220	320	430	545
	τ, с (розр.)	72,4	141	215	324	428	555
	похибка, %	-11,4	-4,5	2,3	-1,4	0,5	-1,8

Аналіз даних табл. 3.5 показує, що розбіжність між розрахованими та експериментальними значеннями тривалості нагрівання та випаровування води з наважок масою до 10 г не перевищує 12%, що дозволяє рекомендувати формулу (3.12) для проведення відповідних інженерних розрахунків.

Результати експериментального та теоретичного визначення тривалості нагрівання та випаровування води з парних наважок масою до 10 г наведені в табл. 3.6.

Для парних наважок розрахунок проводили за формулою (3.12), використовуючи значення коефіцієнтів F, наведених в табл. 3.7.

Аналіз величини відхилень (див. табл. 3.6) між розрахунковими та експериментальними даними показує, що отримані значення F при збереженні загальної структури формули (3.2) дозволяють розраховувати тривалість нагрівання та випаровування води з парних наважок з похибкою не більше 10%.

Таблиця 3.6

Експериментальні та теоретичні значення тривалості нагрівання та випаровування води з парних наважок масою до 10 г

№ п/п	$m_Ц$, г	$m_К$, г	Час нагрівання та випаровування води, с				Відмінності між розрахунковими та експериментальними значеннями, %	
			в центрі		на краю		центр	край
			експ.	розр.	експ.	розр.		
1	5	5	135	133	188	175	1,6	6,8
2	8	8	212	228	230	244	-7,6	-6,2
3	10	10	305	295	273	287	3,3	-5,0
4	10	7	261	268	211	232	-2,8	-9,8
5	10	5	245	245	194	193	0,0	0,3
6	10	3	225	214	167	153	4,7	8,1
7	2	10	66	71	278	255	-7,5	8,3
8	3	10	95	102	270	261	-6,9	3,4
9	5	10	177	160	277	270	9,8	2,5
10	7	10	200	215	300	277	-7,5	7,5
11	6	2	128	122	126	117	4,3	6,9
12	6	4	153	147	144	159	3,8	-10,6
13	3	7	90	92	189	205	-2,7	-8,2
14	7	3	153	156	131	143	-2,2	-9,0

Примітка: $m_Ц$, $m_К$ – маса води в наважках, що розташовані в центрі та на краю обертового столу відповідно, г

Таблиця 3.7

Коефіцієнт F у формулі (3.12) для двох наважок води

Число наважок, що одночасно нагрівають	Розташування на обертовому столі	F
2	в центрі	$20{,}4 \cdot m_Ц^{0{,}885} \cdot m_К^{0{,}265}$
	на краю	$0{,}18 \cdot \left(m_Ц^{0{,}412} + 17{,}22 m_К^{0{,}824}\right)$

Виходячи з цього і використовуючи отримані формули, розрахували залежності тривалості нагрівання і випаровування наважок води, розташованих на краю і в центрі обертового столу від їх вихідної маси. Результати розрахунків наведено на рис. 3.14.

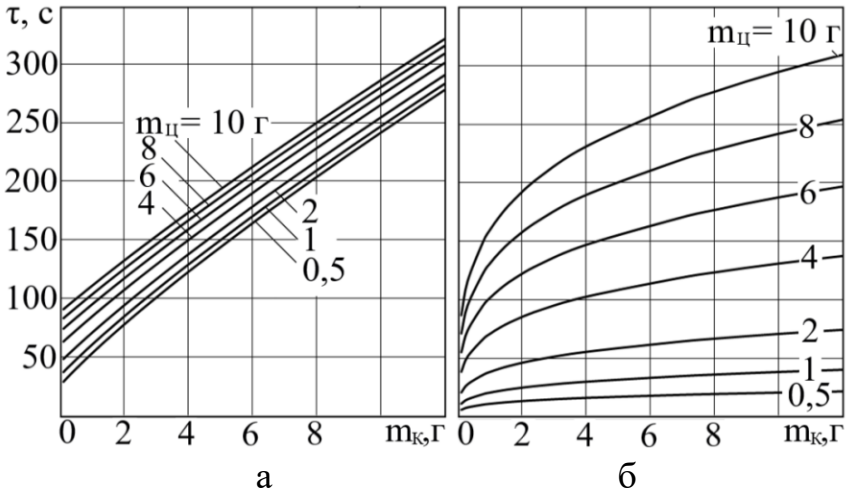


Рисунок 3.14 – Залежності тривалості нагрівання та випаровування наважок води, розташованих на краю (а) та в центрі (б) обертового столу від їх вихідної маси

Аналіз перебігу залежностей на рис. 3.14 показує, що тривалість нагрівання та випаровування води з парних наважок малої маси, розташованих як у центрі (радіус віддалення наважок від вісі обертання столу до 30 мм), так і на краю (радіус віддалення наважок від вісі обертового столу більше 30 мм), зростає зі збільшенням їх маси.

При цьому тривалість нагрівання та випаровування води з наважок на краю збільшується монотонно і в основному залежить від їх маси про що свідчить хід залежностей на рис. 3.14, а.

В той же час, підвищення маси наважки, що розташована в центрі обертового столу (див. рис. 3.14, б), і до ~3 г маси наважки, що розташована на краю, призводить до різкого зростання тривалості її нагрівання і випаровування. Подальше підвищення мас парних наважок (більше 4 г) призводить до монотонного збільшення тривалості цього часу.

При збільшенні маси води в наважці, яка розташована в центрі обертового столу, тривалість її випаровування мало залежить від маси наважки, розташованої на краю столу, про що свідчать залежність на рис. 3.15 а,б.

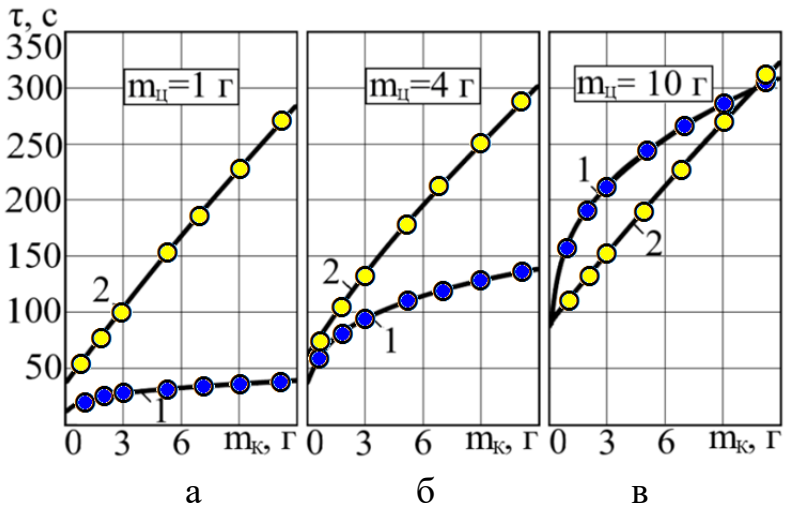


Рисунок 3.15 – Залежності тривалості нагрівання та випаровування наважок води, розташованих у центрі (1) і на краю (2) обертового столу мікрохвильової печі, від їх вихідної маси, що дорівнює 1 (а), 4 (б) та 10 г (в)

При масі наважки на краю 5 г тривалості нагрівання і випаровування з наважки в різних областях стають рівними. Збільшення маси наважки на краю до 11 г призводить до повторної інверсії у співвідношенні тривалості нагрівання та випаровування з парних наважок (див. рис. 3.15, в).

Причиною виникнення явища подвійної інверсії тривалості нагрівання та випаровування води з наважок, мабуть, є неадекватність взаємного впливу парних наважок малої маси.

Як результат – це призводить не тільки до відмінності в інтенсивності нагрівання та випаровування води з них, але й до розбіжностей напрямів векторів ходу даного процесу (див. рис. 3.15).

Таким чином, виходячи з викладеного, узагальнену формулу для розрахунку тривалості нагрівання та випаровування води з наважок при її обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання

запишемо у наступному вигляді:

$$\tau = F\frac{(c_A \cdot \Delta t_A + L_A)}{P_M} + \frac{\sum_0^n Q_n}{F_h \cdot P_M}, \tag{3.13}$$

$$Q_n = f_n \cdot m_n,$$

$$f_n = c_n \cdot (t_1 - t_n),$$

$$\begin{cases} F = 2{,}812 \cdot (m_B - 3m_B^2), & \text{n = 0; r} \le 0{,}03 \text{ м;} \\ F = 25{,}7946 \cdot (m_B - 25{,}3m_B^2), & \text{n = 0; r} > 0{,}03 \text{ м;} \\ F = 20{,}4 \cdot m_Ц^{0{,}885} \cdot m_K^{0{,}265}, & \text{n} \ge 0\text{; (r)} \le 0{,}03 \text{ м;} \\ F = 0{,}18 \cdot (m_Ц^{0{,}412} + 17{,}22m_K^{0{,}824}), & \text{n} \ge 1\text{; (r)} > 0{,}03 \text{ м,} \end{cases}$$

де n – число матеріалів крім води;

r, (r) – відповідно, радіус віддалення геометричного центру (у плані) одиночної та парної наважки від вісі обертання столу резонатору.

Виходячи з викладеного перспективою даної роботи є дослідження впливу на процес випаровування води з наважок масою до 100 г та до 10 г при наявності в резонаторі тіл різної маси та величини діелектричної проникності, що відповідає умовам сушіння піску та ФСС на основі РС при виготовлені ЛФС для виливків середньої маси.

3.5 Нагрівання та випаровування води з парних наважок масою до 100 г мікрохвильовим випромінюванням

Обробку наважок води масою від 10 до 100 г мікрохвильовим випромінюванням проводили у печі з потужністю магнетрону 900 Вт.

Для досліджень наважки води встановлювали як у центрі, так і на відстані 100 мм від центру обертового столу, що схематично надано на рис. 3.16 [334].

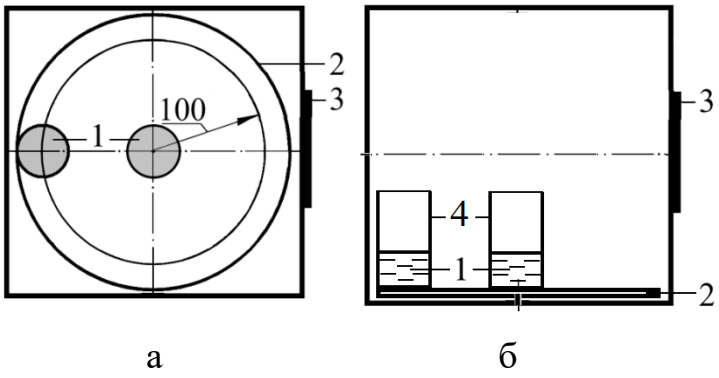


Рисунок 3.16 – Схема зверху (а) та збоку (б) розміщення парних наважок води у центрі та на краю обертового столу: 1 – наважка води; 2 – обертовий стіл; 3 – вихід хвилеводу в резонатор; 4 – стакан

Визначення впливу маси і місця положення наважок води на тривалість її випаровування проводили з використанням картонних стаканів, які мали різну кількість води. Після наповнення відповідною кількістю води стакани встановлювали на обертовий стіл відповідно до схеми на рис. 3.16 та обробляли мікрохвильовим випромінюванням. Зміну маси кожної з наважок визначали зважування через кожні 1...4 хв обробки випромінюванням [334]. Результати визначення часу нагрівання та випаровування води з досліджуваних наважок води наведено в табл. 3.8, 3.9 і на рис. 3.17, 3.18.

Аналіз даних табл. 3.8 та 3.9 і залежностей на рис. 3.17, ходу ізоліній та векторів руху градієнта часу в області малих мас води в наважках на рис. 3.18 свідчить про їх суттєвий взаємний вплив.

Тобто зі збільшенням маси однієї наважки зростає і тривалість нагрівання та випаровування води з іншої наважки. Однак характер та ступінь їх взаємного впливу на тривалість нагрівання та випаровування з них води різний.

При цьому слід зазначити, що в області малих мас наважок характер їх взаємного впливу змінюється, а саме, коли сумарне значення маси двох парних наважок не перевищує 140 г, їх час випаровування становиться практично однаковим.

Таблиця 3.8

Тривалість нагрівання та випаровування наважок води, розташованих на вісі обертового столу в умовах парного нагрівання

$m_Ц$, г	$m_К$, г									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	580	620	677	744	808	852	873	888	894	895
90	550	572	653	679	769	836	860	873	877	870
80	519	532	600	633	723	790	834	839	832	800
70	485	513	549	610	675	705	740	711	701	684
60	449	472	503	533	601	631	669	652	640	627
50	375	421	455	478	537	574	597	603	589	580
40	367	380	400	419	473	496	526	520	504	500
30	318	345	333	366	406	424	446	441	423	424
20	259	274	290	300	327	340	354	340	333	300
10	143	175	200	204	215	226	218	220	216	216

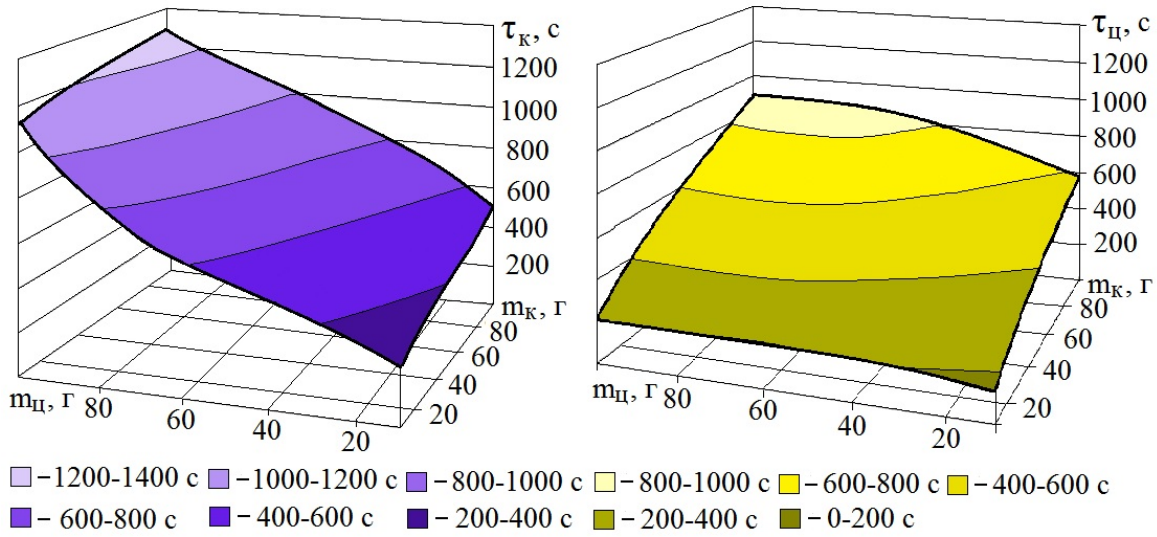
Примітка. $m_Ц$, $m_К$ – маса наважок води в центрі і на краю обертового столу мікрохвильової печі відповідно

Таблиця 3.9

Тривалість нагрівання та випаровування наважок води, розташованих на відстані 100 мм від вісі обертового столу в умовах парного нагрівання

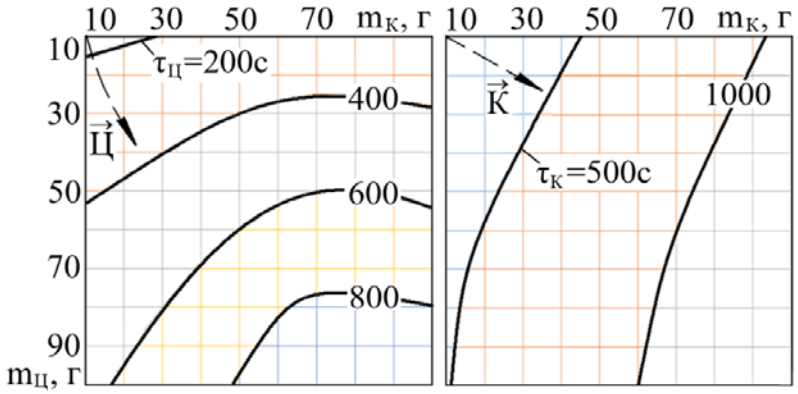
$m_Ц$, г	$m_К$, г									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	485	634	700	766	877	999	1083	1159	1286	1271
90	470	602	668	733	861	976	1078	1140	1266	1263
80	457	570	635	700	832	934	1074	1122	1223	1255
70	439	539	603	668	822	920	1032	1085	1188	1245
60	422	507	571	635	766	897	1000	1053	1144	1234
50	403	475	539	602	727	820	980	1027	1125	1221
40	380	443	506	570	682	800	975	1009	1086	1205
30	353	411	474	537	628	790	882	977	1060	1186
20	315	379	442	504	559	720	750	815	1033	1133
10	253	347	409	472	528	617	694	821	950	1111

Примітка. $m_Ц$, $m_К$ – маса наважок води в центрі і на краю обертового столу мікрохвильової печі відповідно



а б

Рисунок 3.17 – Залежністьтривалості нагрівання та випаровування наважок води, розташованих на краю (а) та в центрі (б) обертового столу в умовах парного нагрівання



а б

Рисунок 3.18 – Поверхні відгуку залежності тривалості нагрівання та випаровування наважок води, розташованих в центрі (а) та на краю (б) обертового столу в умовах парного нагрівання

3.6. Нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі у присутності матеріалів різної природи

В дослідженнях використали воду водопровідну (індекс – А), пісок

кварцовий (індекс – В), СН зневоднений (індекс – С), гіпс Г-22 зачинений водою та висушений (індекс – D). Віддалення всіх матеріалів від вісі обертання столу в експериментах становило r = 100 мм.

Для розглянутих умов постановки експерименту тривалість нагрівання та випаровування води в мікрохвильовій печі в присутності матеріалів різної природи розраховували за формулами:

$$\tau = \frac{Q_A + Q_A^* + Q_B + Q_C + Q_D}{F \cdot P_M}, \qquad (3.14)$$

де Q_A, Q^*_A, Q_B, Q_C, Q_D – кількість теплоти води, пару, кварцового піску, СН зневодненого, гіпсу відповідно, Дж;

F – поправочний коефіцієнт;

P_M – номінальна потужність магнетрона мікрохвильової печі, Вт;

$$Q_A = c_A \cdot m_A \cdot \Delta t_A, \quad Q_A^* = m_A \cdot L, \quad Q_B = c_B \cdot m_B \cdot \Delta t_B,$$
$$Q_C = c_C \cdot m_C \cdot \Delta t_C, \quad Q_D = c_D \cdot m_D \cdot \Delta t_D,$$

або:

$$Q_A = f_A \cdot m_A, \quad Q_A^* = m_A \cdot L, \quad Q_B = f_B \cdot m_B,$$
$$Q_C = f_C \cdot m_C, \quad Q_D = f_D \cdot m_D,$$
$$f_A = c_A \cdot \Delta t_A, \quad f_B = c_B \cdot \Delta t_B, \quad f_C = c_C \cdot \Delta t_C, \quad f_D = c_D \cdot \Delta t_D,$$

а також за формулою (3.13) з використанням залежності 3 на рис. 3.5.

Тривалість повного випаровування води визначали за такою методикою. У картонну склянку наливали мірну (за масою) кількість води та встановлювали склянку (склянки) на обертовий стіл, який при включенні печі починав обертатися з частотою 2,5 або 6 $хв^{-1}$. Розстановку на обертовому столі наважок з водою та випробуваними матеріалами здійснювали відповідно до схем, представлених на рис. 3.19.

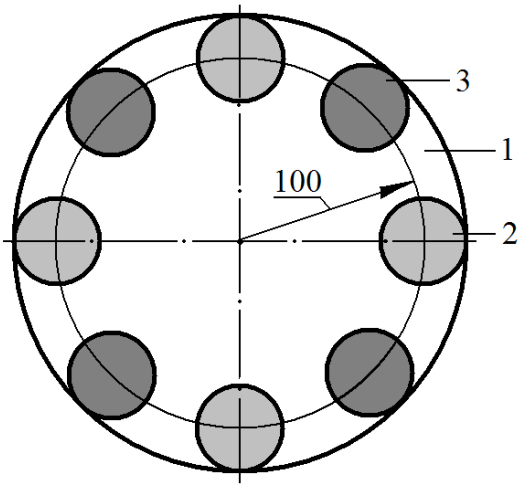


Рисунок 3.19 – Схема (у плані) розміщення матеріалів на обертовому столі: 1 – обертовий стіл; 2 – наважка води; 3 – наважка неорганічного матеріалу (кварцового піску, плакованого СН кварцового піску, зачиненого водою гіпс)

За результатами проведених експериментів, поданих у табл. 3.10, склали системи лінійних рівнянь цих матеріалів та випаровування води загальною масою від 200 до 600 г щодо коефіцієнтів *f* [335]. В результаті вирішення складених систем лінійних рівнянь методом Крамера отримали наступну залежність:

$$\tau = \frac{\left(2592880 \cdot m_A + 110000 \cdot m_B + 413800 \cdot m_C + 2000 \cdot m_D\right)}{F_h \cdot P_M}. \qquad (3.15)$$

Аналіз даних табл. 3.10 показує, що формулу (3.15) можна використовувати для розрахунку часу випаровування води загальною масою від 200 до 600 г з відхиленням між розрахунковими та експериментальними даними менше 4%.

Тривалість нагрівання та випаровування води з наважок масою до 10 г розраховували за наступною формулою з використання даних табл. 3.11:

$$\tau = \frac{25{,}795 \cdot \left(m_B - 25{,}3 m_B^2\right) \cdot \left(c_A \cdot \Delta t_A + L_A\right)}{P_M} + \frac{110000 \cdot m_B + 413800 \cdot m_c + 2000 \cdot m_D}{F_h \cdot P_M}. \qquad (3.16)$$

Таблиця 3.10

Експериментальні та розрахункові величини часу випаровування води

п/п	m_A, кг (H_2O)	m_B, кг (SiO_2)	m_C, кг ($Na_2O{\cdot}3SiO_2$)	m_D, кг ($CaSO_4$)	τ, с		$\Delta = 100\frac{\tau_E - \tau_P}{\tau_E}$, %
					розр. (τ_P)	експ. (τ_E)	
1	0,6	1			3331	3333	0,1
2	0,5	1			2812	2800	-0,4
3	0,5	0,5	0,03		2727	2782	2,0
4	0,5	0,2	0,01		2645	2677	1,2
5	0,5	0,1	0,005	1	2623	2600	-0,9
6	0,4	1			2294	2300	0,3
7	0,4	1	0,01		2302	2365	2,7
8	0,4	0,5	0,01		2192	2278	3,8
9	0,3	0,2			1599	1588	-0,7
10	0,3	1	0,01		1784	1800	0,9
11	0,24	0,4			1332	1330	-0,2
12	0,2			1	1041	1077	3,3
13	0,18	0,6			1065	1080	1,4
14	0,15	0,2			822	830	1,0
15	0,15	1	0,01		1006	1000	-0,6
16	0,12	0,8			798	775	-3,0
17	0,12	0,4			710	694	-2,3
18	0,1	2	0,02	1	979	920	-6,4
19	0,1	2	0,02	2	983	925	-6,3
20	0,09	0,6			599	585	-2,3

Аналіз даних табл. 3.11 показує задовільну збіжність розрахункових та експериментальних даних (розбіжність між даними менше 4,8%), що дозволяє рекомендувати цю формулу для проведення інженерних розрахунків.

Використовуючи формулу (3.16), розрахували залежність тривалості нагрівання та випаровування води з наважок від її маси (m_B) та маси стрижневої суміші (m_{CT}) на основі кварцового піску, плакованого 6% РС, яка знаходиться в гіпсовому стрижневому ящику, маса якого становить 1/3 маси стрижневої суміші у ньому. Результати розрахунків надано на рис. 3.20.

Таблиця 3.11

Тривалість нагріву та випаровування води з наважок масою до 10 г

п/п	m_A, кг (H_2O)	m_B, кг ($Na_2O{\cdot}3SiO_2$)	m_C, кг (SiO_2)	m_C, кг ($CaSO_4$)	τ, с		$\Delta = 100\frac{\tau_E - \tau_P}{\tau_E}$, %
					експ. (τ_E)	розр. (τ_P)	
1	0,0005				37	35	-4,8
2	0,001				72	75	3,4
3	0,002				141	140	-0,8
4	0,003				206	210	1,9
5	0,004				267	273	2,2
6	0,005				325	330	1,7
7	0,006				378	370	-2,2
8	0,007				428	440	2,7
9	0,008				474	478	0,8
10	0,009				516	520	0,7
11	0,01				555	545	-1,8
12	0,001	0,3			138	135	-2,5
13	0,002	0,3			207	210	1,4
14	0,003	0,3			272	270	-0,7
15	0,004	0,3			333	340	2,0
16	0,005	0,3			391	385	-1,4
17	0,001	0,3	0,003		141	152	7,3
18	0,002	0,3	0,003		210	220	4,7
19	0,003	0,3	0,003		274	270	-1,7
20	0,004	0,3	0,003		336	340	1,3
21	0,005	0,3	0,003		393	382	-2,9
22	0,001	0,3	0,003	1	145	145	0,1
23	0,002	0,3	0,003	1	214	218	2,0
24	0,003	0,3	0,003	1	278	270	-3,1
25	0,004	0,3	0,003	1	340	340	0,1
26	0,005	0,3	0,003	1	397	404	1,7
27	0,001	2	0,02	1	533	525	-1,5
28	0,002	2	0,02	1	602	600	-0,3

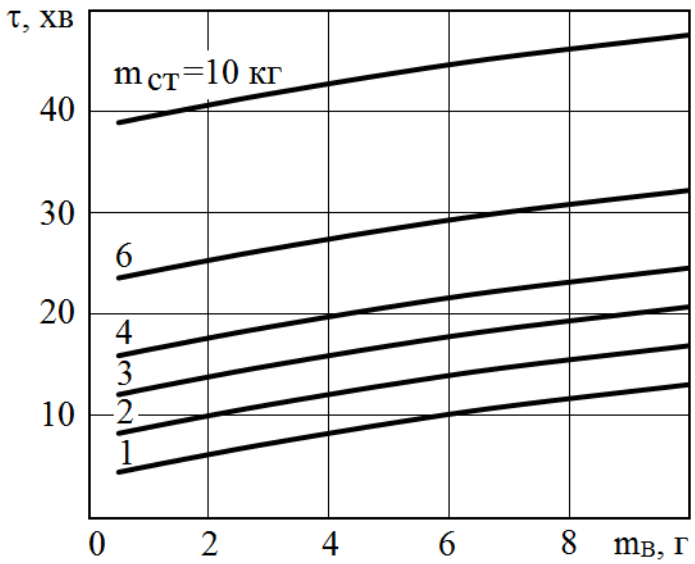


Рисунок 3.20 – Залежність тривалості нагрівання та випаровування води з наважок від її маси ($m_В$) і маси стрижневої суміші ($m_{СТ}$) на основі кварцового піску, плакованого 6% РС, що знаходиться в гіпсовому стрижневому ящику в центрі обертового столу

Аналіз залежностей на рис. 3.20 показує, що зі збільшенням маси наважок води, маси гіпсу, СН та маси стрижневої суміші тривалість нагрівання та випаровування води з наважок неухильно монотонно зростає.

При використанні мікрохвильового випромінювання, з метою зниження тривалості процесу, цю обставину потрібно враховувати як під час сушіння піску, так і структурування ПРС за ПМЗ-процесом.

3.7 Висновки

1. Реальна потужість мікрохвильового випромінювання від номінальної потужності магнетрону мікрохвильової печі на вісі обертового столу в резонаторі становить χ=0,40...0,72 та з віддаленням від неї знижується за статечним законом і на відстані більше ~60 мм становить χ=0,29...0,36.

2. Мікрохвильова обробка тіл в області стоячих хвиль з використанням резонатору з обертовим столом призводить до безперервного «дрейфу» зон

пучностей, характер якого залежить від маси, положення на обертовому столі, розмірів і діелектричної проникності тіла тощо.

3. На тривалість нагрівання і випаровування води з наважок впливає ряд факторів серед яких: початкове положення наважок на обертовому столі, розмір наважки в плані, напрям обертання обертового столу тощо. В той же час, збільшення номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі від 700 до 1200 Вт практично не впливає на середню тривалість нагрівання і випаровування води з наважок, але підвищує рівномірність їх нагрівання.

4. З числа досліджених матеріалів для виробництва ЛФС за ПМЗ-процесом є кварцовий пісок, для виготовлення оснащення, яке можливо використовувати в ПМЗ-процесі, є α-гіпс або суміші на його основі.

5. Величина відносної діелектричної проникності матеріалу (мінералу) залежить виключно від його хімічного складу і при $\varepsilon \leq 10$ з точністю, прийнятною для інженерних розрахунків, може бути визначена за правилом адитивності на основі масового вмісту в ньому елементарних речовин (оксидів) та величини їх діелектричної проникності.

6. Швидкість підвищення температури матеріалу з $\varepsilon \leq 10$, що нагрівають в області пучності мікрохвильового випромінювання з частотою 2,45 ГГц, прямо пропорційна величині його відносної діелектричної проникності.

7. Для структурування ПРС у мікрохвильовому випромінюванні за ПМЗ-процесом доцільно використовувати наважки води, в якості ВЗ точкового типу масою до 3 г.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРУКТУРУВАННЯ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ТА ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Суть способу ПМЗ полягає в тому (див. Додаток Н, Додаток О), що сухий пісок, плакований водорозчинним сполучним матеріалом, засипають і вібраційно ущільнюють в модельно-стрижневому оснащенні, в якому попередньо розміщують один або більше ВЗ і обробляють мікрохвильовим випромінюванням [157, 336…339]. При цьому ВЗ розміщують в робочому просторі модельно-стрижневого оснащення або у стрижневому ящику відповідно до однієї зі схем, що надані на рис. 4.1.

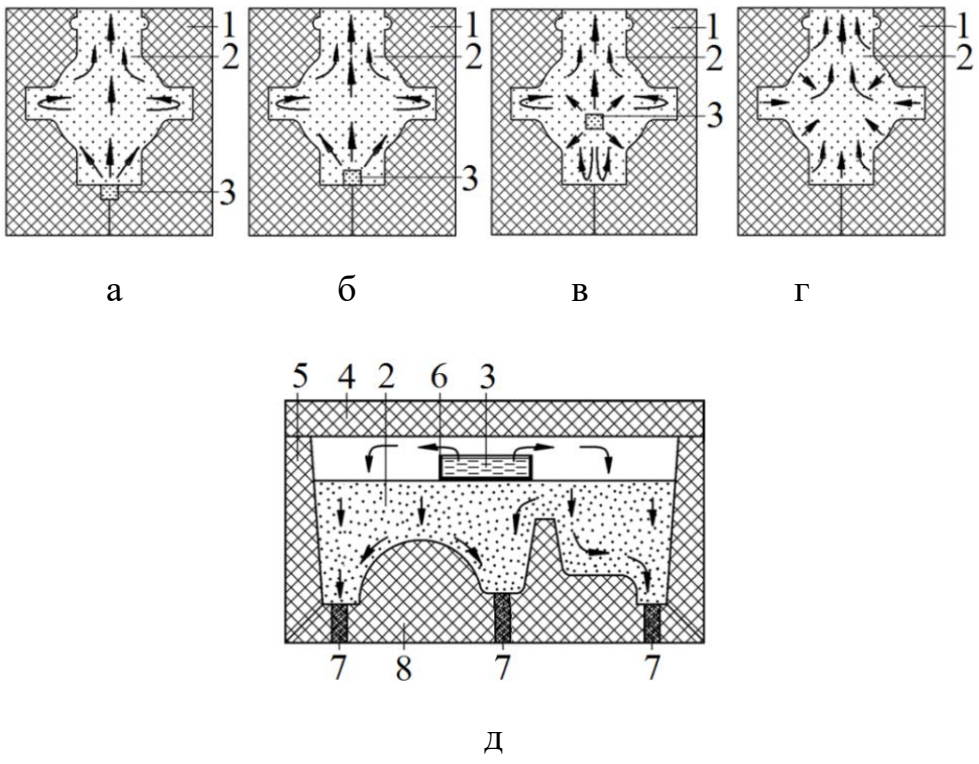


Рисунок 4.1 – Схема розміщення ВЗ поза межами робочої порожнини стрижневого ящика (а), в робочій порожнині стрижневого ящика (б), в ПРС (в), на поверхні робочої порожнини стрижневого ящика (г), на поверхні ПРС (д): 1 – стрижневий ящик; 2 – ПРС; 3 – ВЗ; 4 – кришка; 5 – опока; 6 – пластмасова, фарфорова або скляна ємність; 7 – вента; 8 – підмодельна плита

Структурування сипучої ПРС під дією мікрохвильового випромінювання, відповідно до ПМЗ-процесу, можливе за наявності в суміші ВЗ. При сушінні РС на повітрі до твердого стану (сипкого стану ПРС), масова частина води в РС зменшується до 18...20% [111]. Виходячи з цього, дослідили можливість структурування ПРС із зазначеним вмістом води в РС, де кожна плакована піщинка в суміші буде виконувати функцію ВЗ.

В дослідженнях використовували кварцові піски, плаковані 1,5% (№ 1,5) та 3,0% (№ 3,0) РС (за масою, понад 100% піску), де масовий вміст води в РС на плакованому піску, висушеному до сипучого стану на повітрі, становив 20% (пісок А) або 4% (пісок Б). Структурування проводили в стрижневих ящиках шляхом обробки ПРС протягом 4 хв мікрохвильовим випромінюванням в печі з потужністю магнетрону 900 Вт. Результати візуальної оцінки поверхні отриманих зразків структурованих ПРС наведено в табл. 4.1 [340].

Таблиця 4.1

Візуальна оцінка поверхні зразків структурованих ПРС в мікрохвильовому випромінюванні

Суміш	Масове співвідношення плакованих пісків в суміші, %	Структурування суміші в ящику після мікрохвильової обробки (за візуальною оцінкою)
А-№1,5	100	Відсутнє
А-№3,0	100	Повне
Б-№1,5	100	Відсутнє
Б-№3,0	100	Відсутнє
А-№1,5 + А-№3,0	50/50	Відсутнє
Б-№1,5 + Б-№3,0	50/50	Відсутнє
А-№3,0 + Б-№3,0	50/50	Часткове
А-№1,5 + Б-№3,0	50/50	Відсутній

З аналізу даних табл. 4.1 витікає, що в даних умовах структурувалася лише суміш А-№3,0, яка містила 3,0% РС (20% води у РС). Тобто дана кількість води в РС та самого РС виявилася достатньою для реалізації ПМЗ-процесу. Оскільки збільшення вмісту РС в ПРС призводить до підвищення

роботи її вибивання та утворення пригару на виливках, то, для виробництва ЛФС доцільно використовувати суміші типу А-№3,0 виключно для виготовлення ЛФС виливків малої маси та розмірів з низькотемпературних сплавів. Виходячи з отриманих результатів даний варіант реалізації ПМЗ-процесу в роботі не розглядали.

4.1 Взаємозв'язок між властивостями чистого та плакованого рідким склом кварцового піску і його фракційним складом

Інтенсивність тепловідведення від виливка, що формується в формі, залежить від теплофізичних властивостей матеріалу форми і, зокрема, від величини його уявної щільності або порозності, вологості. В свою чергу уявна щільність піску залежить від способу його ущільнення. В ПМЗ-процесі ущільнення піску проходить під час його вібрації, яка не тільки ущільнює пісок, але і забезпечує його рухливість по каналах оснащення та, відповідно, якість виготовлених ЛФС.

В дослідженнях використовували кварцовий пісок марок $2К_1О_3016$ та $1К_3О_302$ з коефіцієнтом кутоватості піщинок $К_У$=1,4. Встановлено, що в залежності від масового вмісту води контури гори вібраційно ущільненого піску на листі скла після його видалення з стакану можуть мати одну з трьох типових конфігурацій, контури яких надано на рис. 4.2 [341].

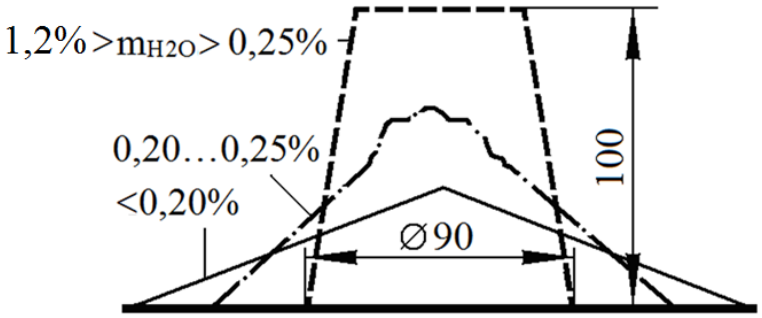


Рисунок 4.2 – Типові контури гори піску на горизонтально розташованому листі скла після видалення його з стакану

Виходячи з цього, за результатами випробувань відповідно до параметру «сухості» прийняли наступну класифікацію кварцових пісків:

- сухий пісок (масовий вміст води m_{H2O}<0,20%);

- вологий пісок (масовий вміст води m_{H2O}=0,20…0,25%);

- сирий пісок (масовий вміст води 1,2%>m_{H2O}>0,25%).

Така класифікація дещо не узгоджується з межами вологості, які наведені у класифікації за ГОСТ 2138-91, але, виходячи з особливостей задач, які вирішують в даній роботі, в подальших дослідженнях використали піски з вмістом води не більше 0,20% (за масою).

Результати визначення сипучості з вмістом води до 0,20% (за масою), показали, що їх сипкість не залежить від фракції (розмірів піщинок) і їх поєднань в суміші.

Дані про уявну щільності вібраційно ущільнених фракцій чистого і плакованого кварцового піску від середнього розміру його зерен (D) наведені в табл. 4.2, а залежність ρ*=f(D) представлена на рис. 4.3.

Таблиця 4.2

Уявна щільність (ρ*) вібраційно ущільнених чистих і плакованих до 5% (за масою) РС кварцових пісків, середній діаметр піщинок (D) та фракції пісків

Фракція піску	016-02	02-0315	0315-04	04-063	063-1
D, мм	0,18	0,26	0,36	0,51	0,81
ρ*, кг/м^3	1927±12	1724±8	1537±5	1345±6	1063±7

В результаті складання і вирішення системи лінійних рівнянь методом Крамера, де в якості змінних були прийняті величини D за номерами сит, що використовують для ситового аналізу пісків та даних про уявну щільність табл. 4.2, встановлено, що величини розрахованих коефіцієнтів, по суті, є значеннями уявної щільності кварцового піску, ущільненого вібрацією. Тобто, для розрахунку уявної щільності чистого або плакованого РС кварцового піску, ущільненого вібрацією, рекомендовано формулу, кг/м^3:

$$\rho^*=1927\cdot m_{016}+1724\cdot m_{02}+1537\cdot m_{0315}+1345\cdot m_{04}+1063\cdot m_{063}\pm 7, \qquad (4.1)$$

де m_{016}…m_{063} – відносна маса фракції піску в суміші, що залишилася після його розсіву на ситах, нормованих в приладі мод. 029, відповідно, як 016…063.

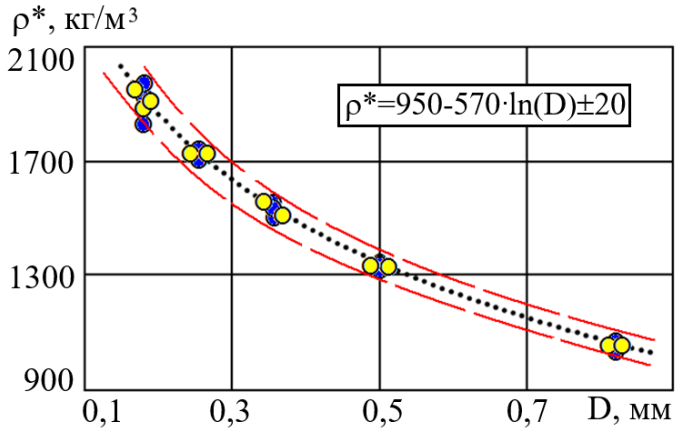


Рисунок 4.3 – Залежність уявної щільності вібраційно ущільненого чистого і плакованого кварцового піску від середнього розміру його зерен

В подальших випробуваннях використовували вібраційно ущільнені суміші, що були приготовлені з різних фракцій чистого і плакованого РС піску після його сушінні до вмісту вологи менше 0,20%.

Розподіл піску за фракціями проводили на приладі мод. 029 за відповідною методикою. Результати вимірювань уявної щільності таких сумішей та розрахунків за формулою (4.1) наведені в табл. 4.3.

З аналізу величини відносної розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними витікає, що формулу (4.1) можливо рекомендувати для інженерних розрахунків уявної щільності чистих та плакованих РС пісків з вмістом РС до 5% за масою.

Особливістю прийнятого в роботі способу плакування кварцового піску є те, що після його змішування з РС в суміші (плакованому піску) практично не залишається дрібних фракцій, про що свідчать дані наведені в табл. 4.4 і 4.5, а також гістограми на рис. 4.4 (вміст РС, яке пішло на плакування піску вказано на рис. 4.4).

Таблиця 4.3

Результати розрахунків за формулою (4.1) і експериментальні значення уявної щільності для кварцового піску (Δ – відносна розбіжність)

№ п/п	Масова частка фракції в суміші					ρ*, кг/м^3		$\Delta = 100\frac{\rho_E^* - \rho_P^*}{\rho_E^*}$, %
	016-02	02-0315	0315-04	04-063	063-1	експ.	розр. за (4.1)	
Частка РС, використаного для плакування – 0%								
1	0,7	0,3				1872	1870	0,11
2	0,3	0,5	0,2			1755	1749	0,34
3		0,4	0,2	0,4		1532	1532	0,00
4	0,2	0,6	0,1	0,1		1711	1707	0,23
5		0,2	0,5	0,15	0,15	1463	1473	-0,68
Частка РС, використаного для плакування – 1%								
6	0,4	0,6				1809	1806	0,17
7		0,2	0,3	0,5		1471	1475	-0,27
8		0,1	0,8	0,1		1540	1539	0,06
9	0,1		0,4	0,3	0,2	1424	1421	0,21
10	0,5	0,1	0,1		0,3	1604	1608	-0,25
Частка РС, використаного для плакування – 2%								
11		0,25	0,75			1645	1587	3,53
12		0,25	0,45	0,3		1490	1525	-2,35
13		0,25	0,60	0,15		1517	1556	-2,57
14	0,16	0,24	0,3	0,3		1564	1586	-1,41
15		0,22	0,528	0,132	0,12	1471	1495	-1,63
Частка РС, використаного для плакування – 3%								
16		0,75	0,25			1693	1676	1,00
17		0,25	0,45	0,3		1530	1525	0,33
18		0,25	0,60	0,15		1576	1556	1,27
19	0,12	0,22	0,528	0,132		1601	1601	0,00
20		0,215	0,516	0,129	0,14	1473	1485	-0,81
Частка РС, використаного для плакування – 4%								
21		0,25	0,75			1583	1587	-0,25
22			0,35	0,65		1410	1409	0,07
23		0,25	0,2	0,55		1437	1474	-2,57
Частка РС, використаного для плакування – 5%								
24		0,36	0,08	0,56		1511	1492	1,26
25	0,12	0,22	0,176	0,48		1516	1524	-0,53
26				0,5	0,5	1190	1194	-0,34
27			0,4	0,2	0,4	1300	1304	-0,31
28		0,15	0,8	0,05		1563	1559	0,26

Таблиця 4.4

Фракційний склад піску $1К_3О_302$ (%, за масою)

Вміст РС в піску, яке пішло на його плакування, % (за масою)	Розмір сторін осередків сита в світлі						
	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063
0		3,9	17,9	63,9	12,7	1,59	0,11
2	1,9	42,4	35,4	20,1	0,15	0,06	

Таблиця 4.5

Фракційний склад піску $2К_1О_3016$ (%, за масою)

Вміст РС в піску, яке пішло на його плакування, % (за масою)	Розмір сторін осередків сита в світлі								
	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,005	тазик
0		0,2	5,1	21,4	57,0	14,8	1,1	0,4	0,01
1		30,3	14,9	49,0	3,1	2,0	0,7		
2		36,9	39,1	21,7	2,0	0,3			
3	1,4	37,9	33,5	25,4	1,8				
4	4,3	39,1	28,0	23,5	5,1				
5	17,7	44,4	25,5	12,7					

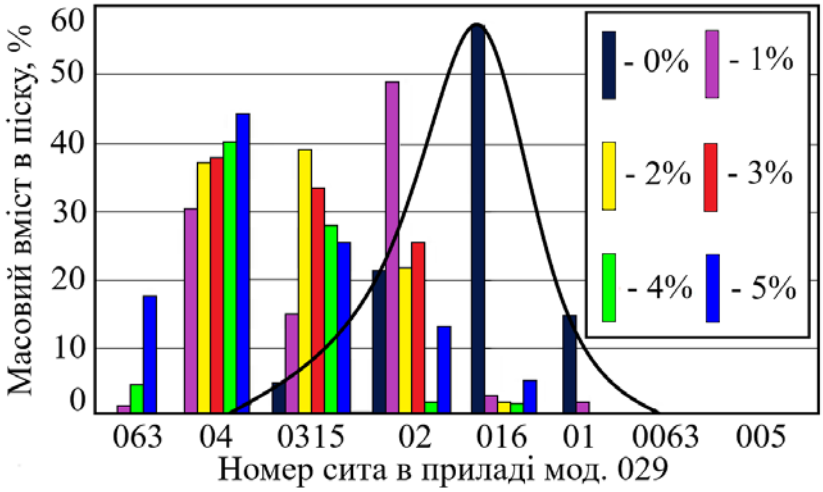


Рисунок 4.4 – Фракційний склад чистого і плакованого пісків з різним масовим вмістом РС, витраченого на їх плакування

З аналізу рис. 4.4 витікає, що після плакування піску в його гранулометричному складі зникають дрібні фракції, що є наслідком виникнення в сумішах піщано-рідкоскляних конгломератів.

Модуль дрібноти (M_m) пісків, що використовували в дослідженнях, розрахували за ГОСТ 23409.24-78, за даними табл. 4.6 і за результатами визначення гранулометричного складу кварцового піску:

$$M_m = \sum_1^i a_i \cdot m_i, \qquad (4.2)$$

де a_i – постійна величина для і-того нормованого сита (див. табл. 4.6);

m_i – масова частка залишку піску на і-тому ситі приладу мод. 029.

Таблиця 4.6

Значення a_i для розрахунку модуля дрібноти за ГОСТ 23409.24.

Номер сита	2,5	1,6	1	063	04	0315
a_i	-	5	9	20	30	40
Номер сита	02	016	01	0063	005	тазик
a_i	53	65	105	165	210	300

Результати розрахунків за формулою (4.2) та експериментальні дані у вигляді залежності уявної щільності чистого та плакованого піску після ущільнення вібрацією від його модуля дрібноти представлені на рис. 4.5.

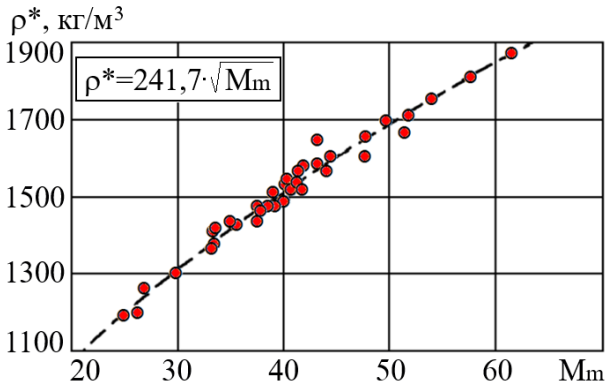


Рисунок 4.5 – Залежність уявної щільності чистого та плакованого кварцового піску після ущільнення вібрацією від його модуля дрібноти

З аналізу залежності на рис. 4.5 витікає, що зі збільшенням модулю дрібності, уявна щільність чистого та плакованого піску, який попередньо ущільнений вібрацією, підвищується.

Таким чином, за результатом виконаних досліджень встановлено, що:

- сипучість дослідженого чистого та плакованого РС кварцового піску не залежить від його фракційного складу;

- найбільшою сипучістю характеризуються піски з вмістом вільної води (вологи) до 0,20% за масою;

- уявна щільність вібраційно ущільненого піску (чистого, плакованого) адитивна пайовому масовому вмісту в ньому нормованих фракцій піщинок і зростає зі зменшенням середнього розміру його зерен і зі збільшенням модуля їх дрібноти.

4.2. Вплив маси та характеру розміщення водяних зарядів в робочому просторі оснащення на міцність піщано-рідкоскляної суміші, що структурована в паро-мікрохвильовому середовищі

Відповідно до способу ПМЗ [157, 342] вода або ВЗ в робочому просторі модельно-стрижневого оснащення для виготовлення ЛФС може перебувати в окремій порожнини, в складі суміші з піском, в замороженій суміші з піском, в пінополіуретановому вкладиші і т.п. При цьому, різноманітність виконання та розташування ВЗ в робочій порожнині оснащення позначається насамперед на тривалості (швидкості) випаровування води з ВЗ.

З метою встановлення тривалості випаровування води з ВЗ різної маси (m_{H2O}) в мікрохвильовому випромінюванні використали наважки з води, з суміші води і кварцового піску марки $1К_3О_302$, замороженої суміші кварцового піску марки $1К_3О_302$ і води, поліуретанової губки з водою.

Результати досліджень тривалості випаровування води з різних видів ВЗ в мікрохвильовому випромінюванні від її маси представлені у вигляді залежностей на рис. 4.6 [343].

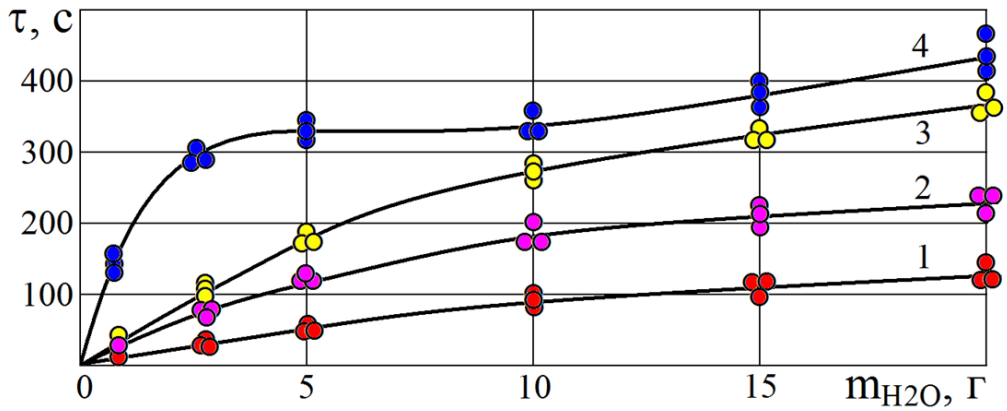


Рисунок 4.6 – Залежності тривалості випаровування води в мікрохвильовому випромінюванні від її маси: 1 – вода з початковою температурою +17°С; 2 – вода в 100 г кварцового піску з початковою температурою +17 °С; 3 – замерзла вода в 100 г кварцового піску з початковою температурою -17°С; 4 – вода з початковою температурою +17 °С в поліуретановій губці

З аналізу ходу залежностей на рис. 4.6 випливає, що тривалість випаровування води зі збільшенням її маси у ВЗ зростає. При цьому, з числа досліджених варіантів виконання ВЗ, тривалість випаровування води з попередньо замороженої суміші води і піску порівняння з аналогічним показником для води в поліуретановій губці.

Дослідження впливу маси ВЗ та його розташування на міцність на стиск ПРС проводили на зразках з кварцового піску плакованого 0,5%, 1,5% та 2,5% РС та ВЗ з пінополіуретанової губки [339]. Структурування сумішей проводили в картонних стаканах відповідно до схем на рис. 4.7, а...д, де напрямок виходу пари з ВЗ та суміші у навколишнє середовище вказано стрілками, а на рис. 4.7,е показана схема вирізання зразків для випробувань.

Залежності міцності на стиск структурованих ПРС від розташування ВЗ (див. рис. 4.7,а,б) та маси води у ньому представлені на рис. 4.8.

З аналізу ходу кривих на рис. 4.8 випливає, що незалежно від положення ВЗ в стакані зі збільшенням маси ВЗ, а так само і зі збільшенням маси РС в кварцовому піску, міцність структурованої суміші збільшується. При цьому у

зразках, суміш яких була структурована з розташуванням ВЗ на дні стакана, міцність дещо вища, ніж у зразків із суміші структурованої при верхньому розташуванні ВЗ в стакані.

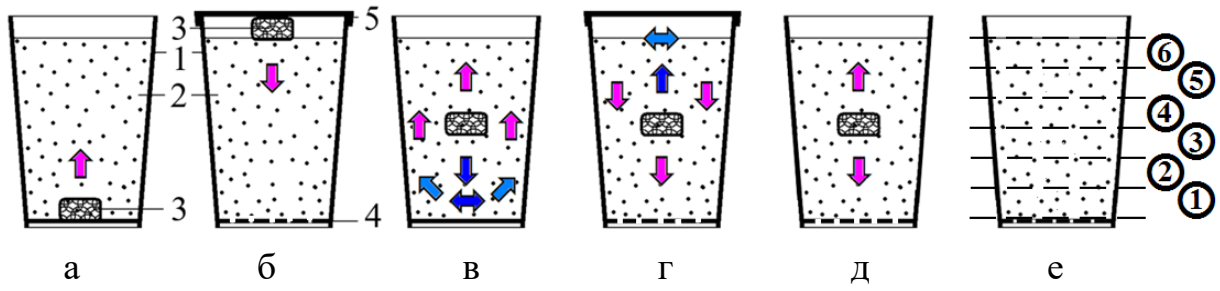


Рисунок 4.7 – Схема розміщення в стакані ВЗ на дні (а), з верху (б), посередені – вихід пари з відкритої поверхні (в), посередені – вихід пари з вент (г), посередені – вихід пари у двох напрямках (д), пошарова нумерація зразків для їх дослідів на стиск (е): 1 – картонний стакан; 2 – ПРС; 3 – ВЗ; 4 – венти; 5 – герметична кришка

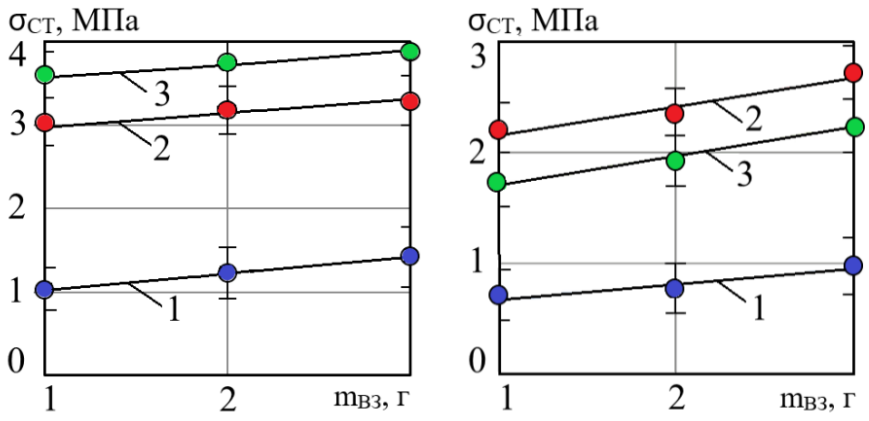


Рисунок 4.8 – Вплив маси ВЗ розташованого на дні (а) та у верхній частині (б) стакана на міцність на стиск зразків, структурованих за ПМЗ-процесом: 1 – суміш з 0,5% РС; 2 – суміш з 1,5% РС; 3 – суміш з 2,5% РС

Дана закономірність обумовлена тим, що при нижньому розташуванні ВЗ рух водяної пари з ВЗ знаходиться в протиході з гравітаційним

мікропереміщенням частинок піску до фронту структурування, що, в свою чергу, сприяє не тільки ущільненню структурованої суміші, а й, відповідно, збільшенню її міцності.

Вплив напрямків виходу водяної пари при розташуванні ВЗ з масою води 2 г в середині стакана на міцність на стиск структурованої суміші з 2,5% РС (по шарах зразка відповідно до рис. 4.7,в,г,д,е), представлено на рис. 4.9.

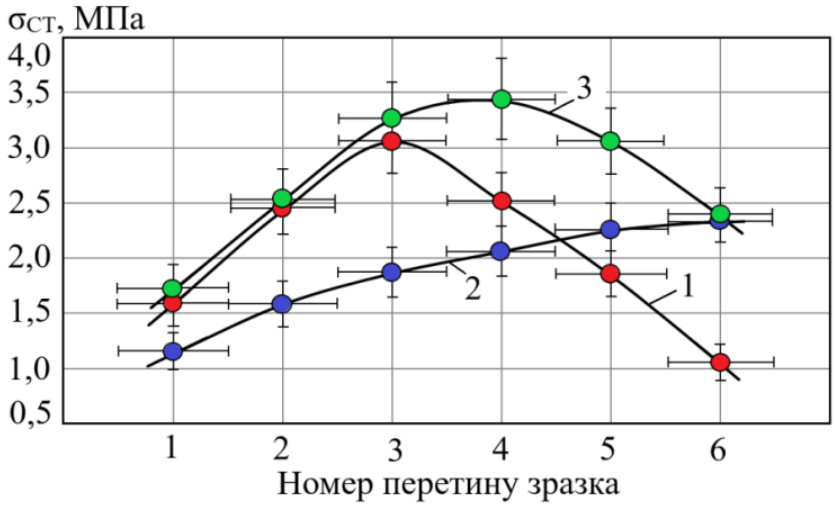


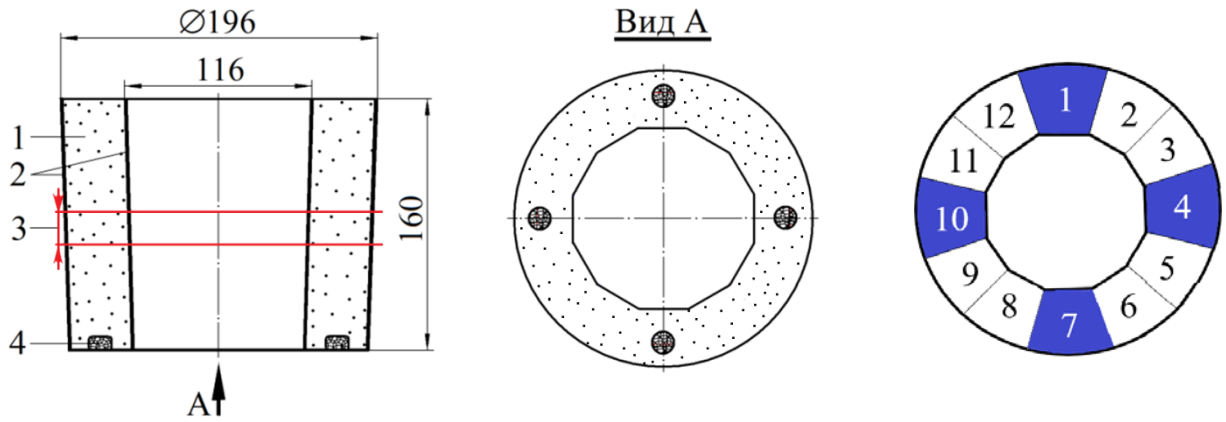
Рисунок 4.9 – Вплив ВЗ, розташованого посередині стакана, з виходом пари у верхній частині стакана (1), з нижньої частини стакана (2) і в обох напрямках (3) на міцність зразків по перетинам шарів

З аналізу ходу кривих 1 і 3 на рис. 4.9 випливає, що при виході водяної пари через вільну поверхню суміші, а також через вільну поверхню і венти в днищі стакану найбільшу міцністю набувають центральні шари суміші, тобто шари, які найближче розташовані до ВЗ.

В той же час, вихід пари тільки через венти в днищі стакану призводить до монотонного збільшення міцності суміші від верхніх до нижніх шарів. Така закономірність пояснюється особливостями газодинаміки потоків водяної пари в різних шарах суміші, напрямах її руху до відкритої поверхні, процесів її конденсації і випаровування в досліджуваних закритих просторах,

що, тим не менш, потребує відповідного дослідження та врахування при розробці технології виробництва ЛФС за ПМЗ-процесом.

Вплив положення декількох ВЗ в стрижневом ящику на міцність на стиск структурованої ПРС визначали на зразках, виготовлених механічною обробкою зі структурованої ПРС, відібраною з центральної частини стрижня масою 4 кг відповідно до схеми на рис. 4.10, де також представлена схема нумерації секторів вирізки зразків для випробувань.



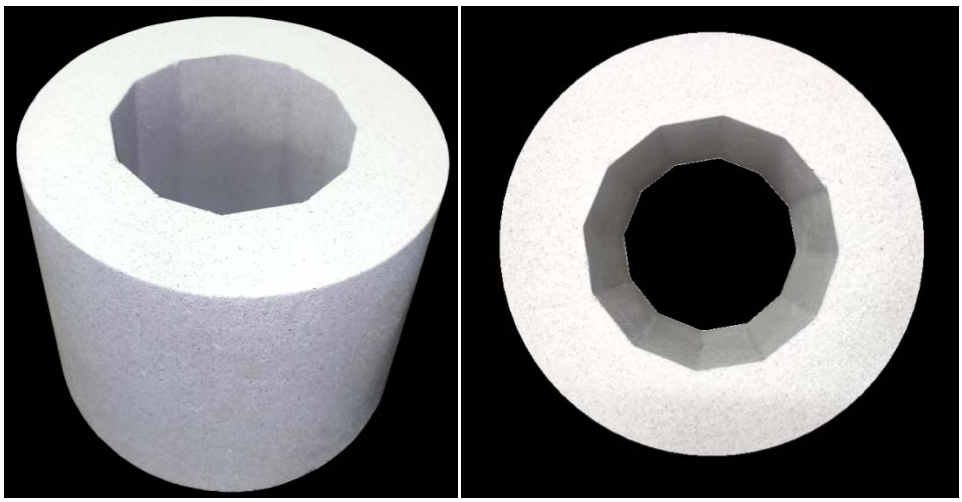
а б

Рисунок 4.10 – Схема розташування ВЗ в стрижневом ящику (а), нумерація секторів (б) для виміру міцності суміші на стиск (під зафарбованими секторами розташовані ВЗ): 1 – ПРС; 2 – поліуретановий стрижневий ящик; 3 – шар стрижня для вирізки зразків; 4 – ВЗ

Для виготовлення стрижня на дно поліурітанового стрижневого ящика 2 (див. рис. 4.10) укладали ВЗ 4 з масою води в кожному по 1 г. Після цього стрижневий ящик доверху наповнювали ПРС 1 (кварцовий пісок плакований 1% РС, висушений на повітрі до сипучого стану і додатково просушеним протягом 3 хв в мікрохвильовій печі).

Після ущільнення ПРС на вібростолі впродовж 1 хв стрижневий ящик поміщали в центр обертового столу резонатора і обробляли мікрохвильовим випромінюванням протягом 20 хв.

Після охолодження на повітрі до нормальної температури з центральної частини стрижня, який представлено на рис. 4.11, вирізали шар суміші (див. рис. 4.10,а) і виготовляли з нього зразки кубічної форми для визначення їх міцності на стиск.



а б

Рисунок 4.11 – Загальний вигляд (а) і вигляд зверху (б) полого стрижня масою 4 кг, структурованого за ПМЗ-процесом

Результати досліджень міцності на стиск виготовлених зразків за секторами виміру представлені у вигляді гістограми на рис. 4.12.

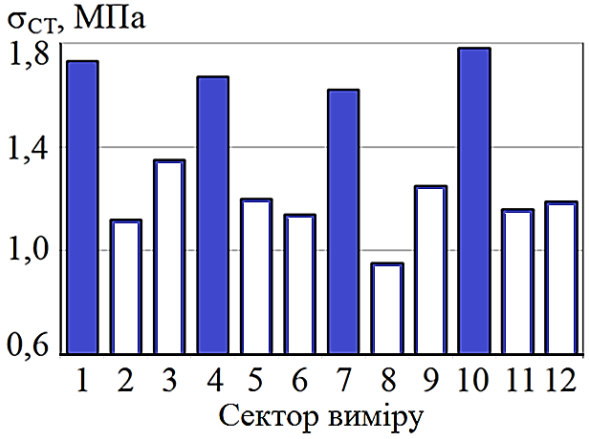


Рисунок 4.12 – Гістограма міцності на стиск за секторами виміру

З аналізу рис. 4.12 витікає, що міцність ПРС із сегментів розташованих безпосередньо над ВЗ, вище, ніж в суміжних і становить 1,6...1,8 МПа. Найменшу міцність має суміш в найбільш віддалені від зазначених вище сегментів. При цьому, різниця у величинах міцності досягає ~1,8 рази. Мабуть, така різниця в величинах міцності пов'язана з напрямком руху водяної пари в напрямку до вільної поверхні суміші в стрижневому ящику.

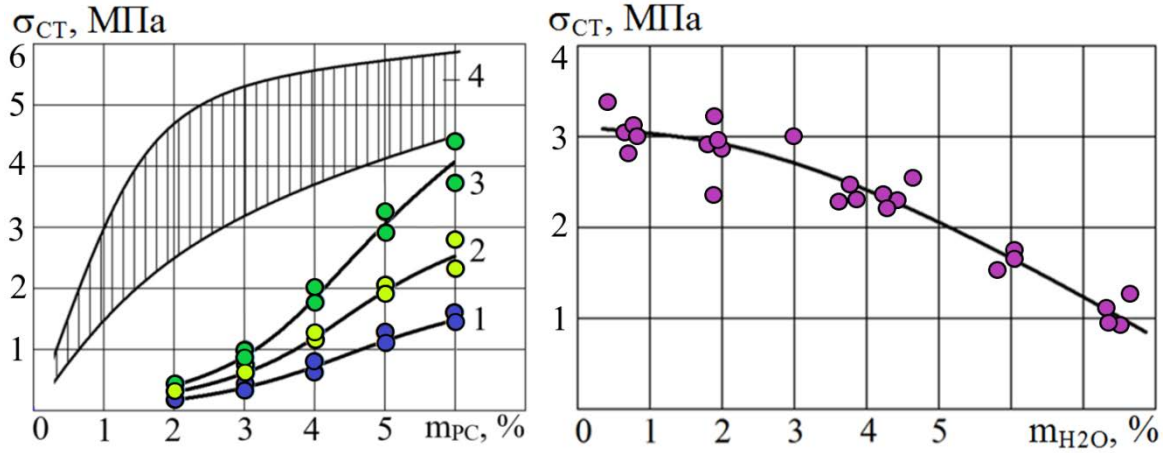
Тобто, в мікрохвильовому випромінюванні вода в ВЗ перетворюється на водяну пару, яка по капілярах прагне до відкритої поверхні, як по найкоротшому шляху з найменшим опором. Вірогідно, що ця особливість процесу масопереносу призводить до явно вираженої спрямованості руху водяної пари від ВЗ до вільної поверхні суміші та, відповідно, до нерівномірності міцності суміші в перерізі порожнього стрижня. Це означає, що для забезпечення однорідності міцності ПРС для стрижнів подібної конфігурації слід передбачити більшу кількість рівновіддалених ВЗ в оснащенні.

Слід зазначити, що на відміну від об'ємно-структурованих ПРС дегідратування РС за ПМЗ-процесом йде послідовно в напрямку від джерела надходження в суміш водяної пари – ВЗ. Ця обставина позначається не тільки на характері розподілу остаточної вологи в ЛФС [344], тривалості процесу структурування, на величині міцності структурованих сумішей, але і на характері зміни їх міцності від маси використаного в суміші РС.

Про це, зокрема, свідчать залежності на рис. 4.13, на якому представлено залежності міцності на стиск ПРС від способу їх структурування та маси РС в суміші і залишкової (гідратної) води в ПРС з 1,5% РС.

З аналізу ходу залежностей на рис. 4.13,а витікає, що вже при використанні 0,5% РС у ПРС, які структуровані за ПМЗ-процесом, суміш має міцність на стиск аналогічну, як і ПРС з 3% РС, що структуровані іншими, найбільш поширеними в ливарних цехах, способами структурування ПРС.

Така закономірність пояснюється як адресним розташуванням РС в суміші, що структурована за ПМЗ-процесом, так і низьким вмістом в ній гідратної води, про що свідчить залежність на рис. 4.13,б [426].



а б

Рисунок 4.13 – Залежність міцності на стиск ПРС від способу їх структурування та маси РС в суміші (а) та гідратної води в РС при ПМЗ-процесі (б) [345]: 1 – продування вуглекислим газом (CO_2-процес, через 1 годину після продування); 2 – затверджувач – пилоподібний ФХШ (через 24 години з моменту закінчення ущільнення суміші); 3 – сушка при 210...230 °С протягом 2 годин; 4 – ПМЗ-процес (через 5-10 хв після закінчення структурування)

Таким чином, особливістю ЛФС, що виготовляють за ПМЗ-процесом, є залежність їх міцності як від місця розташування ВЗ, так і від напрямку руху водяної пари в ПРС під час її обробки мікрохвильовим випромінюванням. При цьому, найбільшою міцністю і її рівномірністю за об'ємом характеризуються ПРС, структурування яких відбувалося при розташуванні ВЗ в нижніх частинах оснащення, тобто при забезпеченні руху водяної пари, що генерується з ВЗ, знизу вгору до відкритої поверхні.

Виникнення такої закономірності пояснюється двома факторами:

- послідовним характером затвердіння ПРС за ПМЗ-процесом за рахунок просування в ній фронту структурування в напрямку від використаного (використаних) ВЗ до відкритої поверхні;

- різноспрямованістю дії гравітації на незв'язані між собою частинки

суміші в оснащенні і напрямком переміщення фронту структурування суміші під час паро-мікрохвильового впливу на неї.

Тобто, підвищенню міцності ЛФС, що виготовляють за ПМЗ-процесом, сприяє: збільшення маси РС, використаного для плакування кварцового піску; рівномірності розподілу ВЗ в оснащенні; тривалості обробки ПРС в мікрохвильовому випромінюванні.

З метою забезпечення рівномірності міцності по тілу ЛФС, ВЗ слід розташовувати переважно в нижніх і тупикових частинах оснащення з урахуванням напрямку руху водяної пари по відношенню до місць її виходу з суміші при її структуруванні.

4.3 Вплив мікрохвильового випромінювання на залишковій вміст води в силікаті натрію та в піщано-рідкоскляній суміші

На відміну від конвекційної, радіаційної або конвекційно-радіаційної сушки, сушка мікрохвильовим випромінюванням проходить по всьому об'єму ЛФС одночасно і є важливим елементом процесу структурування ПРС за способом ПМЗ. Виходячи з цього залишковий вміст води у РС визначали як після його сушіння при 103±3 °С та 203±3 °С в печі опору, так і після сушіння в мікрохвильовій печі.

Рідке скло для випробувань в дослідженнях на залишковий вміст в ньому води після сушки готували з силікат-брили з M_{SIO2} від 2,8 до 3,0 шляхом її подрібнення до стану пилу та розчинення в дистильованій воді при 95...100 °С. Після приготування РС охолоджували до 20±1 °С та за допомогою ареометру вимірювали його щільність.

Приготоване РС висушували в зазначених вище умовах до постійної маси сухого залишку і зважували з точністю 0,01 г. Згодом розраховували приріст маси дегідратованого РС відносно силікат-брили і, відповідно, залишковий вміст води в висушеному РС.

За результатами обробки експериментальних даних для РС технічної

чистоти з M_{SiO2} = 2,8...3,0 встановлено, що при 20±1 °С масова частка води (φ_{H2O}) практично не залежить від величини M_{SiO2} в досліджених межах його зміни. При цьому масову частку води в водному розчині та твердому СН (φ_{H2O}) в межах від 0 до 1 з точністю прийнятною для інженерних розрахунків, можна розраховувати за емпіричною формулою [341]:

$$\varphi_{H2O} = 1 - \varphi = 1 - 0{,}002968 \cdot (\rho - 1000)^{0,8}, \qquad (4.3)$$

де φ – масова частка СН в РС;

ρ – питома щільність РС при температурі 20±1 °С, кг/м^3.

Як відомо, твердіння РС при сушінні відбувається в результаті випаровування з нього води. Нагрівання РС (теплова сушка) прискорює процес випаровування води з РС і, відповідно, скорочує час його твердіння.

Проте в затверділому при тепловому сушінні РС (при 103±3 °С) вода залишається, про що свідчить залежність на рис. 4.14.

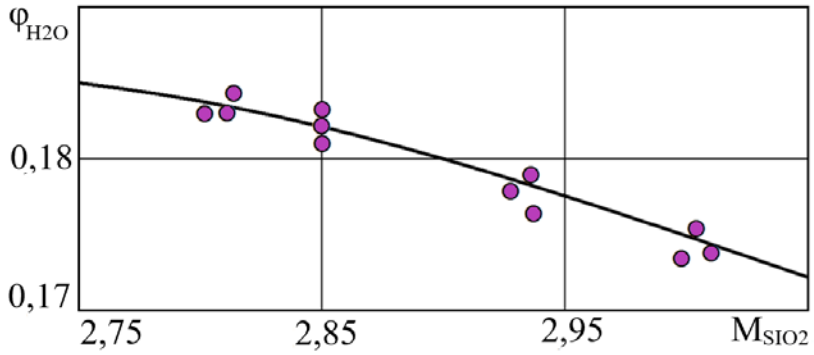


Рисунок 4.14 – Залежність масової частки води в РС після сушіння на повітрі при 103±3 °С до постійної маси від силікатного модуля РС

Тобто, масова частка води в РС після його сушіння на повітрі при 103±3°С до постійної маси складає 17,2...18,5% (за масою). У той же час сушка РС в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 700 Вт до постійної маси (впродовж 15...20 хв) призводить практично до повного видалення води з його структури, про що свідчать дані наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Вміст води у висушеному РС

ρ_{20}, кг/м^3	M_{SiO2}	$\varphi_{H2O,\ \%}$ (вихідні)	φ_{H2O} після сушки до постійної маси, %		
			при 103±3 °С	при 203±3 °С	в мікрохвильовій печі
1400	3	63,6	17,4±0,3	7,6±0,3	<0,1
1440		60,7	17,5±0,5		
1400	2,93	63,6	17,9±0,6	7,1±0,3	
1440		60,7	17,8±0,4		
1400	2,81	63,6	18,4±0,3	7,2±0,4	
1440		60,7	18,1±0,7		

З даних табл. 4.7 випливає, що мікрохвильова сушка суміші ефективніше за зовнішню теплову сушку.

Для визначення характеру розподілу залишкової вологи в висушених мікрохвильовим випромінюванням стрижнях використовували свіжоприготовлену суміш кварцового піску з 5% (за масою) РС, якою наповнювали стрижневий ящик, що схематично представлено на рис. 4.15.

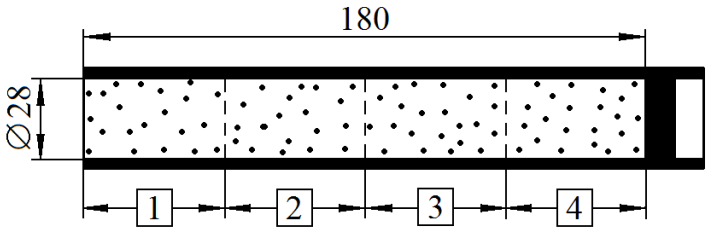


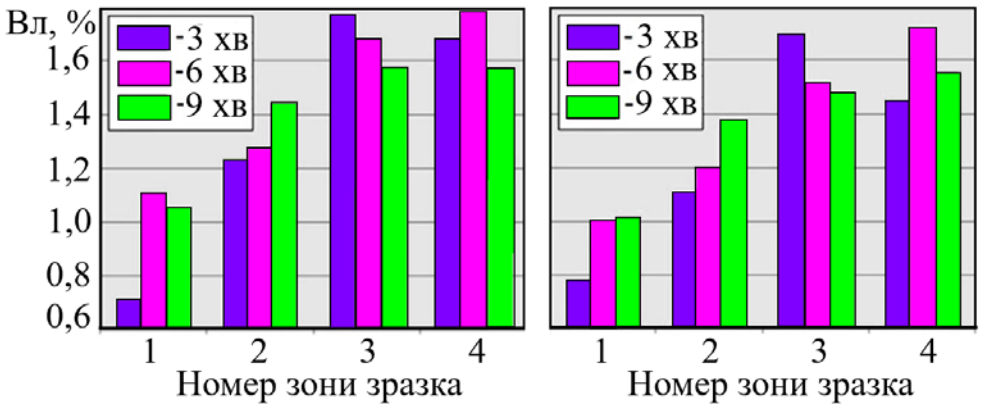
Рисунок 4.15 – Схема зон стрижня (1...4) з ПРС в стрижневому ящику

Після ручного ущільнення суміші стрижневий ящик укладали на обертовий стіл резонатору таким чином, щоб в початковий момент часу сушки його положення (відносно його вісі) було перпендикулярно по відношенню до напрямку руху мікрохвильового випромінювання. Сушіння ПРС мікрохвильовим випромінюванням проводили впродовж 3, 6 та 9 хв при частоті обертання обертового столу 2,5....6 хв$^{-1}$.

Після сушіння стрижень видаляли зі стрижневого ящика, розрізали за

схемою на рис. 4.15 та визначали залишкову вологість в його зонах.

Гістограми залишкової вологості в зонах піщано-рідкоскляних стрижнів зі вмістом 5% РС висушених в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 700 і 900 Вт представлені на рис. 4.16 [327].



а б

Рисунок 4.16 – Гістограми розподілу залишкової вологи в зонах піщано-рідкоскляних стрижнів після сушіння в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 700 (а) і 900 (б) Вт

З аналізу гістограм на рис. 4.16 випливає, що обробка ПРС з 5% РС мікрохвильовим випромінюванням протягом 3...9 хв знижує вміст в ній вологи лише до ~1,18...1,22%, характер розподілу залишкової вологи уздовж стрижня не залежить від тривалості його обробки мікрохвильовим випромінюванням і його потужності, частоти обертання столу рівень залишкової вологи знижується з наближенням до відкритої поверхні ПРС, високий рівень вологи в 3 та 4 зонах стрижнів свідчить про те, що в цих зонах твердіння РС в зазначені проміжки часу практично відсутнє.

Причиною істотного вмісту вологи в стрижні з ПРС, мабуть, є пінна структура РС, що виникає під час сушіння, та недостатній час сушіння. Тому, стрижні зі свіжоприготовленої ПРС треба сушити мікрохвильовим випромінюванням тільки в драйєрах або в одній з частин стрижневого ящика, що робить даний процес нетехнологічним.

4.4 Дослідження переносу рідкого скла в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання

Варіативність реалізації ПМЗ-процесу передбачає можливість використання РС, яким може бути просочена вже структурована ПРС. Тому, з метою встановлення механізму переносу СН в капілярах під дією мікрохвильового випромінювання дослідили цей процес в пласкому капілярі щілинного типу, утвореному між двома паралельно розташованими скляними пластинами.

За результатами візуальної оцінки структури РС, затверділого в пласкому капілярі щілинного типу при його товщині h=30 мкм, встановлено, що в початковий період обробки мікрохвильовим випромінюванням на вільній поверхні РС за рахунок випаровування води з його поверхневого шару (з відкритої поверхні), утворюється суцільна еластична оболонка з частково дегідратованого РС (піропластичного СН), що витікає з аналізу структури краплі РС, представленої на рис. 4.17 [346].

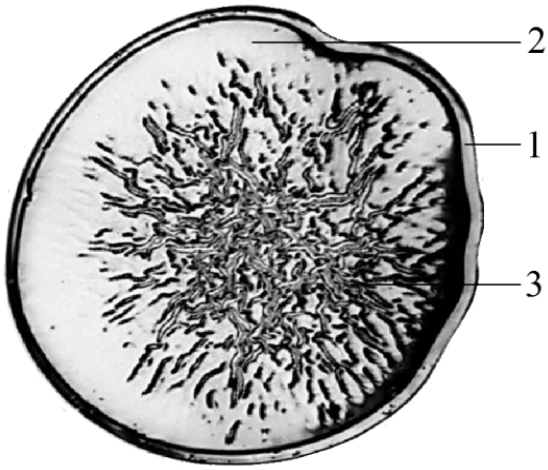


Рисунок 4.17 – Вигляд внутрішньої поверхні (×25) краплі РС в пласкому капілярі на початку обробки мікрохвильовим випромінюванням:
1 – плівка (зовнішня оболонка) з частково дегідратованого РС;
2 – водний розчин СН (РС); 3 – колонія твердих силікатних утворень

В середині оболонки РС (див. рис. 4.17) розташовано незатверділе РС 2, в центрі якого, спостерігається колонія полісилікатних утворень 3. Очевидно, що полісилікатні утворення, відповідно до результатів досліджень [215, 347] і ряду інших дослідників, представлені полімерними структурами кремній кисневих аніонів, з яких при нагріванні до температури 157 °С виділяється молекулярна вода, оскільки вона сильно пов'язана водневими зв'язками з поліаніонами.

При відносно великих розмірах крапель вихідного РС, не до кінця затверділе РС в пласких капілярах товщиною h від 50 до 350 мкм являє собою двовимірну пінну структуру з пласкими газовими бульбашками відкритого типу. Така структура по площі в плані перевершує площу вихідної краплі РС більш ніж в 40 разів і складається з пустот, що чергуються, і обсягів з термопластичного СН, що схематично представлено на рис. 4.18.

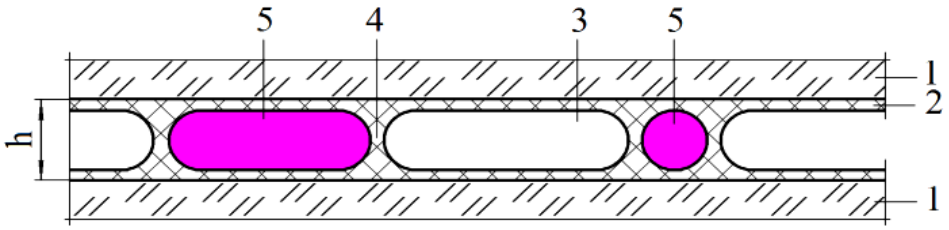
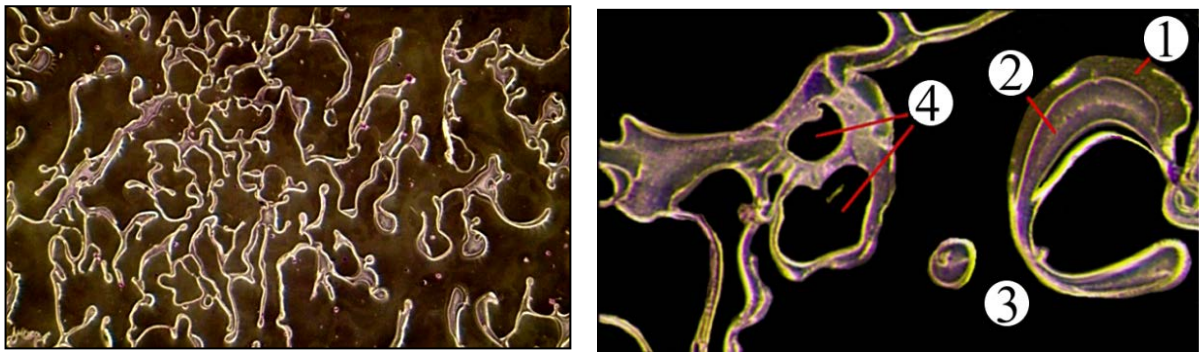


Рисунок 4.18 – Схема частково затверділого РС в пласкому капілярі на вигляді збоку: 1 – скляна пластина; 2 – горизонтальний шар затверділого РС; 3 – паровий канал (бульбашка); 4 – вертикальні перемички з термопластичного СН; 5 – незатверділе РС

Відповідно до рис. 4.18, в капілярі (на поверхні скляних пластин 1) затверділе РС утворює суцільні шари 2 і поперечні перемички 4 між ними. Перемички і шари не тільки відокремлюють один від одного парові канали 3, але і утримують мікрооб'єми 5 незатверділого РС, що залишилося.

Аналіз виду структури в плані, що наведена на рис. 4.19, після роз’єднання скляних пластин показує, що перемички (позиція 4 на рис. 4.18) – це протяжні ланцюги вертикальних стінок кінцевої довжини.



а б

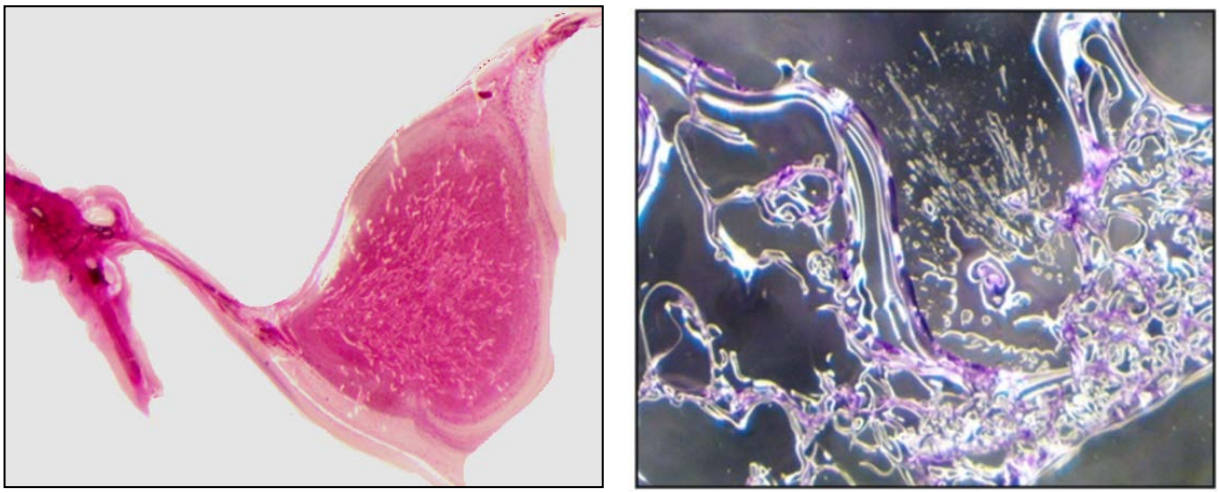
Рисунок 4.19 – Вид на темному полі (тлі) затверділого в пласкому капілярі щілинного типу РС (вид в плані) при збільшенні × 14 (а) і × 100 (б):
1 – зневоднений СН; 2 – незатверділе РС; 3 – паровий канал;
4 – парова бульбашка

Ймовірно, що перемички виникли одночасно з появою в капілярі парових каналів і є частиною капсул, в яких певний час при обробці мікрохвильовим випромінюванням утримується частина ще неповністю дегідратованого, м'якого за консистенцією РС.

На рис. 4.19 видно прозорі стінки 1 (перемички), що виникли одна з одної, капсул з частково зневодненого РС, всередині яких розташовуються залишки м'якого РС 2.

Безперервний ланцюг по-різному орієнтованих у напрямку і витягнутості капсул м'якого РС дозволяє припустити, що при обробці мікрохвильовим випромінюванням підвищення температури води в капсульованому РС призводить до появи в капсулі парової бульбашки або бульбашок 4 і, відповідно, збільшення в капсулі газового тиску, що спричиняє деформації і руйнування її оболонки [348].

Результат цього процесу – примусовий струменево-поступовий викид залишків РС з капсули або «вибуховий» викид залишків незатверділого РС за межі капсули, про що свідчать вигляди ділянок затверділого РС в капілярі щілинного типу на рис. 4.20,а та рис. 4.20,б відповідно.



а б

Рисунок 4.20 – Вигляд ділянок затверділого РС в капілярі щілинного типу, сформованих при струменево-поступальному (а) і «вибуховому» (б) характеру виходу м'якого РС з капсул, × 100

У будь-якому випадку рух РС за межами вихідної капсули супроводжується його інтенсивним поверхневим зневодненням. В результаті цього на вільній поверхні потоку РС, формується безперервна еластична оболонка з частково зневодненого РС (піропластичного СН). Згодом зростання парової бульбашки у вихідній капсулі припиняється через підвищення міцності оболонки СН. Разом з цим припиняється і видавлювання РС з капсули. Таким чином, видавлені за межі колишньої капсули в паровий канал РС перетворюється в нову капсулу, а від вихідної капсули в структурі залишаються тільки її поперечні стінки з СН.

Цей процес циклічно повторюється і триває до тих пір, поки в капілярі буде існувати хоч скільки-небудь вільної води, що забезпечує рідкоплинність РС і його здатність до самокапсулювання. При цьому кожна наступна капсула м'якого РС, що утворюється, за обсягом буде менше своєї попередньої капсули [348].

З цього випливає, що кожна наступна парова бульбашка даної структури матиме менший обсяг, ніж попередньо виникла. Це означає, що спінювання

під дією мікрохвильового випромінювання в капілярі РС завжди буде характеризуватися певною газопроникністю і нерівномірністю розмірів своїх бульбашок. Подальший нагрів мікрохвильовим випромінюванням характеризується досягненням системою температури 100...103 °С і повним видаленням з неї вільної води.

При подальшому нагріванні, про що опосередковано свідчить зображення на рис. 4.21, вода, що залишилася в стінках капсул (гідратна вода), дифундує всередину піропластичних перемичок 1, переходить там в стан пари і, руйнуючи, а в ряді випадків і змінюючи конфігурацію піропластичної перемички, виходить по утвореним в ній тріщинам 3 в парові бульбашки 2 або парові канали 5, змінюючи їх конфігурацію.

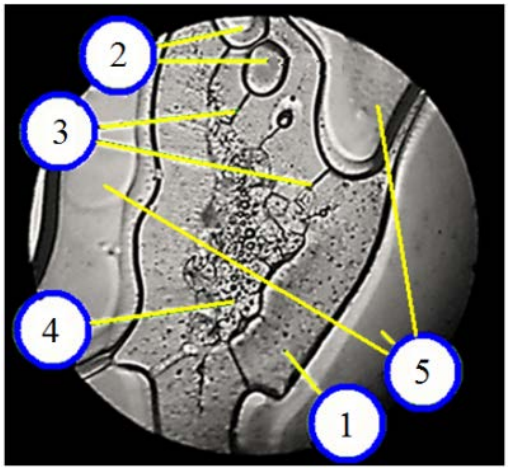
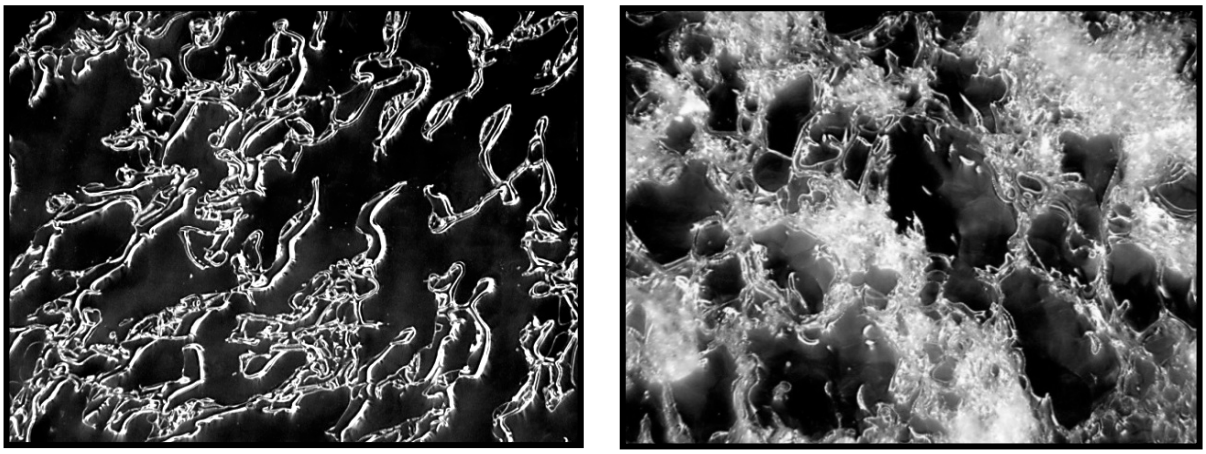


Рисунок 4.21 – Будова частково затверділого РС в пласкому капілярі:
1 – «перемичка» з піропластичного СН; 2 – парова бульбашка; 3 – тріщина;
4 – незатверділе РС; 5 – паровий канал, (× 200)

Подальша обробка РС мікрохвильовим випромінюванням не змінює його просторової структури, що раніше сформувалася, яка, за даними [347], є каркасним полімером $Na_2Si_3O_7$. Тобто, в результаті проходження цього багатоетапного процесу висушене РС в пласкому капілярі набуває вигляду, представленому на рис. 4.22,а.



а б

Рисунок 4.22 – Вигляд зневодненого РС в пласкому капілярі при h=40 (а) і h=900 мкм (б) після обробки мікрохвильовим випромінюванням протягом 90 с (× 75)

У разі висушування РС мікрохвильовим випромінюванням в капілярі більшої товщини (h=400...900 мкм) РС формує просторові (тривимірні) пінні структури (див. рис. 4.22,б).

Виходячи з особливостей отриманих структур, можна констатувати, що масоперенос РС в пласкому капілярі щілинного типу і, відповідно, в капілярно-пористому середовищі під дією мікрохвильового випромінювання подібний впливу на РС швидкого нагріву (теплового «удару») і обумовлений спінюванням РС. Однак механізм спінювання, як і властивості рідкоскляної піни, що утворюється, при зовнішньому тепловому «ударі» і під дією мікрохвильового випромінювання різні.

Зокрема, механізм масопереносу РС і під дією мікрохвильового випромінювання характеризується багатоетапністю і проходить за принципом ланцюгової реакції. Така закономірність, мабуть, обумовлена селективністю швидкості нагріву мікрохвильовим випромінюванням складових РС [346] і в загальному вигляді може бути представлена за схемою на рис. 4.23.

Відповідно до рис. 4.23,а, на першому етапі нагрівання на вільній поверхні краплі РС 1 в результаті випаровування вільної води з'являється

тонка в'язко-пластична суцільна плівка (оболонка) з частково дегідратованого РС (піропластичного СН) 2 (див. рис. 4.23,б). При цьому залишок в краплі м'якого РС виявляється замкнутим (капсульованим) всередині цієї оболонки.

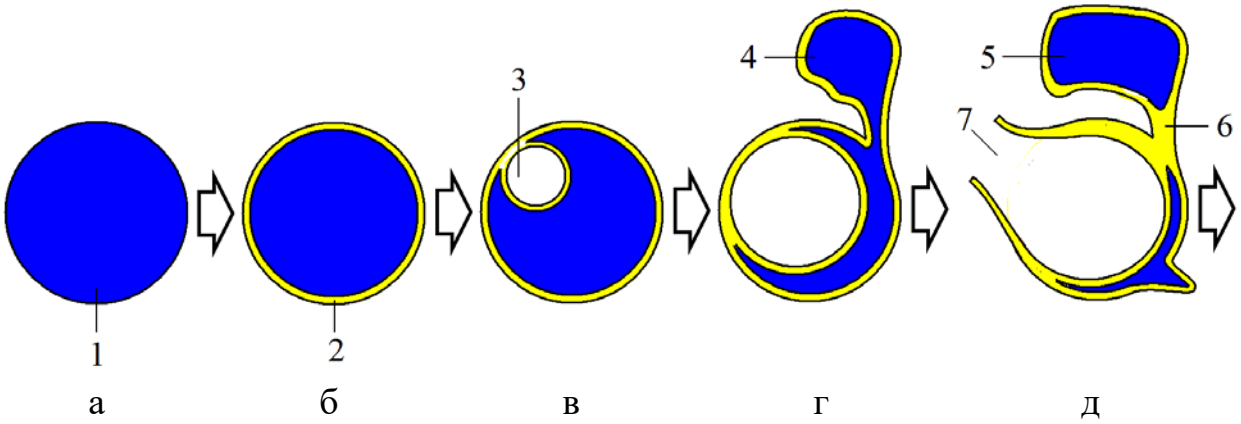


Рисунок 4.23 – Форма краплі РС в пласкому капілярі щілинного типу до впливу на неї мікрохвильового випромінювання (а), в початковий момент впливу мікрохвильового випромінювання (б), в момент виникнення у краплі парової бульбашки (в), в момент виникнення новоутворення з РС (г), в момент завершення формування вторинної капсули РС (д): 1 – крапля РС; 2 – оболонка з піропластичного СН (первинна капсула РС); 3 – парова бульбашка; 4 – новоутворення з РС; 5 – вторинна капсула РС; 6 – міжкапсульний канал; 7 – паровий канал

На другому етапі нагріву (див. рис. 4.23,в) після досягнення температури кипіння води в краплі м'якого РС виникає газова бульбашка 3.

На третьому етапі (див. рис. 4.23,г) нагрівання призводить до збільшення маси води, що випарувалася в первинній капсулі РС, і, відповідно, підвищення тиску як в паровій бульбашці, так і в капсулі. У момент часу, коли швидкість підвищення парового тиску в капсулі перевищить граничну деформаційну можливість її оболонки, відбувається розрив оболонки і витіснення за її межі м'якого РС. В результаті такого викиду з'являється новоутворення РС 4. Процес витіснення РС з первинної

капсули буде тривати до тих пір, поки в ній буде зберігатися підвищений тиск (до прориву піропластичної оболонки СН і виходу пари з капсули через паровий канал 6) або не вичерпається запас м'якого РС.

На четвертому етапі нагріву (див. рис. 4.23,д) поверхня витиснутого із первинної капсули струменя РС покривається аналогічною оболонкою, формується вторинна капсула, а міжкапсульний канал 6 між старою і новою капсулою 5 твердне, закінчуючи процес нового капсулювання витісненого РС. Згодом в новій капсулі, як і в попередній, виникає парова бульбашка 3, підвищується паровий тиск в капсулі і м'яке РС струменями викидається за межі капсули, формуючи нові капсули і міжкапсульні 6 і парові 7 канали (див. рис. 4.23,д).

Таким чином, в капілярі під дією мікрохвильового випромінювання, перенесення РС проходить за схемою багаторазового повторення процесів капсулювання РС, підвищення парового тиску в капсулі і викид за межі капсули м'якого РС, зупинки руху потоку викинутого з капсули РС, його капсулювання і т.п. до повного видалення води з оброблюваного РС, що не відповідає раніше запропонованим загально прийнятим механізмам спінювання РС при підвищені його температури (див. підрозділ 1.5.4).

4.5 Кінетика сушіння кварцового піску та його сумішей мікрохвильовим випромінюванням

Як відомо, основною відмінністю нагріву мікрохвильовим випромінюванням від інших способів є збіг векторів переносу вологи і тепла в капілярно-пористих тілах, селективність нагріву і її залежність від величин діелектричної проникності кожного з компонентів суміші. Ці особливості призводять до того, що швидкість сушіння мікрохвильовим випромінюванням значно вище, ніж сушка конвекцією або радіацією.

Для опису процесів, що проходять при сушінні піску і його сумішей з РС, виходячи з результатів досліджень А.В. Думанського, П.А. Ребиндера,

М.Ф. Казанцева, А.В. Ликова, В.І. Корнєєва, В.В. Данілова і ряду інших вчених і дослідників, взяли наступні компоненти, їх вихідний стан та зміни стану під дією мікрохвильового випромінювання [349].

Насичена водяна пара (НВП) – газоподібна речовина, яка за умовами проведення в даній роботі експериментів генерується з 1 г води (ВЗ) в полі мікрохвильового випромінювання. Оскільки діелектрична проникність НВП $\varepsilon \approx 1$ і НВП має вільний вихід із суміші в атмосферу, то вона не нагрівається мікрохвильовим випромінюванням і під час проведення ПМЗ-процесу зберігає постійну температуру 100 °С.

Вода – рідина, яка при використанні ВЗ в капілярах суміші утворюється в результаті конденсації НВП на стінках капілярів (конденсат). Процес конденсації йде до тих пір, поки температура суміші не досягне 100 °С. Конденсат в капілярно-пористому тілі є гігроскопічною вологою, яка на поверхнях капілярів осідає (адсорбується) у вигляді суцільного шару (плівки).

Особливістю конденсату є те, що за даними [350] незалежно від температури адсорбційного шару води його діелектрична проникність при товщині шару конденсату до 20 шарів молекул води менше діелектричної проникності води в великому обсязі і становить $\varepsilon \approx 5$.

Мабуть, ця обставина різко знижує теплову активність конденсату в процесі нагрівання суміші (піску), але дозволяє брати участь йому в процесах гідратації і створення розчинів СН на поверхні піщинок. Тобто, якщо поверхня піщинок плакована СН, то конденсат може частково або повністю поглинатися їм. Вбудовуючись в молекулярні структури СН, поглинена вода стає його частиною – гідратною (хімічно пов'язаною) водою. При надмірній кількості конденсат з СН утворює водні розчини, тобто РС різної питомої щільності.

За інших рівних умов випаровування вільної води з ВЗ, натрієвого РС і СН починається в момент, коли парціальний тиск парів води в повітрі стає менше, ніж парціальний тиск вологи в суміші. При зменшенні різниці між цими парціальними тисками швидкість випаровування вологи з суміші зменшується і зовсім припиняється, коли ця різниця парціальних тисків стає рівною нулю.

Кварцовий пісок – тверде зернисте тіло, яке відносно повільно нагрівається в мікрохвильовому випромінюванні і практично не поглинає воду.

Поява на піщинках суцільного шару конденсату і наявність точок контакту між сусідніми зернами піску призводить до виникнення в даній системі тіл капілярних сил. Капілярні сили приводять в плівковий рух шарів конденсату по поверхні піщинок до точок контакту зерен піску. Наслідком такого переміщення води та водних розчинів СН до місць контактів сусідніх зерен є виникнення водяних манжет між піщинками.

Натрієве рідке скло (РС) – водний розчин СН. За хімічним складом РС являє собою суміш колоїдних гідратованих агрегатів СН β-$Na_2O \times nSiO_2$ і γ-$Na_2O \times nSiO_2$ у воді. У початковому стані РС – рідина, яка зі зменшенням вмісту в ній води переходить у в'язкий стан. При вмісті води 20...30% (за масою) натрієве РС твердне і при подальшому зменшенні вмісту води перетворюється на гідратований, а потім в дегідратований СН.

Силікат натрію (СН) – тверда речовина, яка розчиняється у воді. В залежності від умов сушіння СН в плакуючому шарі може бути гідратованою або повністю зневодненою речовиною.

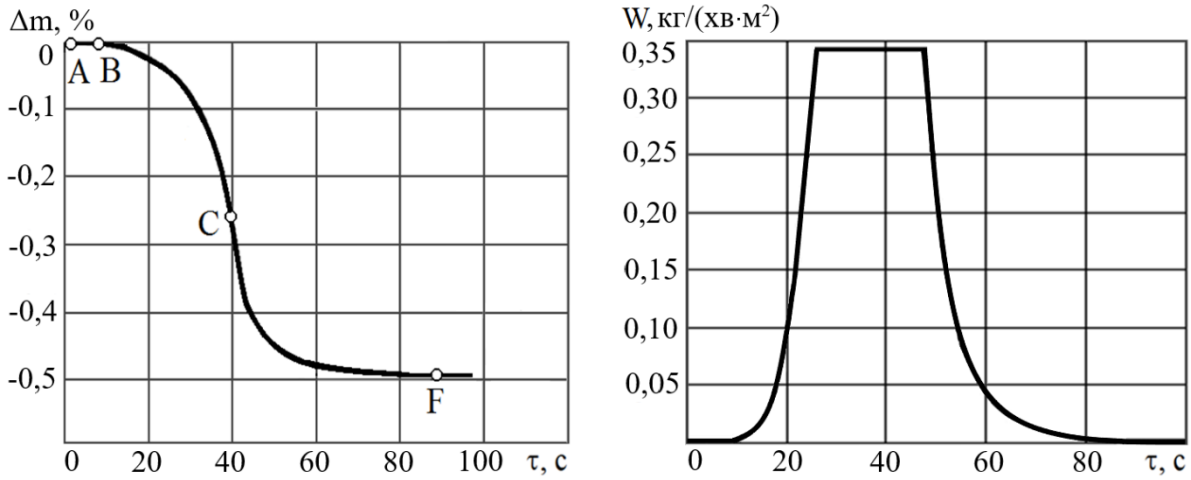
Силікат натрію утворюється в результаті дегідратації натрієвого РС. Якщо при плакуванні пісок змішати з РС і висушити на повітрі при 22...32 °С до сипучого стану, то СН буде містити близько 20...30% (за масою) гідратної води, а після додаткового сушіння мікрохвильовим випромінюванням впродовж тривалого часу вміст води в СН становить менш ніж 0,1%.

При контакті з водою СН частково або повністю гідратує. Після насичення гідратований СН при надлишку води переходить в розчин і перетворюється на рідкорухливе РС.

4.5.1 Кінетика сушіння кварцового піску з водою

Кінетика сушіння наважки №1 – суміші кварцового піску з 0,5% води (за масою, понад 100% піску), у вигляді залежності зміни відносної маси та

масової швидкості випаровування води з наважки від тривалості її обробки мікрохвильовим випромінюванням представлені на рис. 4.24 [349].



а б

Рисунок 4.24 – Залежність зміни відносної маси суміші 200 г чистого піску з 1 г води (а) та масової швидкості випаровування з наважки води (б) від часу її обробки мікрохвильовим випромінюванням

Аналіз ходу залежності на рис. 4.24,а показує, що процес сушіння суміші чистого піску з водою під дією мікрохвильового випромінювання неухильно зменшує масу в часі. При цьому, кінетика зміни маси наважок і швидкості її сушіння подібна відомим кінетичним кривим, притаманним для конвективного або радіаційного сушіння капілярно-пористих тіл, де виділяють три основні періоди (див. рис. 4.24,а).

Період А-В. Період А-В характеризується незмінністю початкової маси наважки в часі, тобто вода в наважці нагрівається, переходе в пару, але ще не випаровується з її відкритої поверхні. Оскільки при мікрохвильовому випромінюванні нагрів наважок починається з середини, то виникла НВП по капілярних каналах в піску рухається від місць свого виникнення до відкритої поверхні наважки.

У міру просування по капілярних каналах НВП частково конденсується на їх стінках. Згодом, конденсат знову нагрівається, випаровується і пара

продовжує рух до відкритої поверхні наважки.

Період B-C. Період B-C характеризується початком зниження маси наважки (точка B на залежності 1 рис. 4.24,а), що пов'язано з досягненням НВП її відкритої поверхні і відходом пари в навколишнє середовище. При цьому в точці C швидкість випаровування води з наважки досягає свого максимального значення.

Період C-F. Залежність зміни маси наважки в період C-F являє собою плавно спадну криву, що змінюється, від точки C – час максимальної швидкості випаровування вологи з відкритої поверхні наважки до точки F – часу завершення випаровування вологи з наважки. Тобто, в момент часу, що відповідає точці C, починається зниження різниці парціальних тисків пари в піску і навколишньому повітрі.

В момент часу, що відповідає точці F (F – точка рівноважної вологості), різниця парціальних тисків вологи в капілярах наважки і навколишньому повітрі стає рівною нулю. Відповідно, в цей момент часу випаровування води з наважки припиняється. При цьому частина пари (менше 0,1% за масою) до закінчення проведення випробувань залишається в капілярних каналах піску.

Відповідно до рис. 4.24,б швидкість випаровування води з наважки №1 починається з 10 с і на 26 с по 51 с стає найбільшою та постійною, після чого знижується до нуля.

З аналізу ходу кривих на рис. 4.24 випливає, що кінетика сушіння суміші кварцового піску з водою під дією мікрохвильового випромінювання практично аналогічна кінетиці сушіння вологого піску іншими способами, які описані в роботах М.Ф. Казанцева, А.В. Ликова, В.І. Муштаєва і ряду інших авторів.

Тобто, сушка мікрохвильовим випромінюванням піску з рівномірно розподіленою в ньому вологою не супроводжується тими чи іншими раніше не відомими явищами і процесами, які не характерні для сушіння вологого піску іншими способами передачі тепла з його зовнішньої поверхні, які у практиці реалізують конвекцією, випромінюванням (радіацією) або теплопровідністю.

4.5.2 Кінетика сушіння кварцового піску при наявності в ньому водяного заряду

Кінетика сушіння наважки №2 – сухого кварцового піску з ВЗ масою 0,5% (за масою, понад 100% піску), описується залежністю зміни відносної маси наважки та масової швидкості випаровування з неї води від часу обробки мікрохвильовим випромінюванням, які представлено на рис. 4.25 [349].

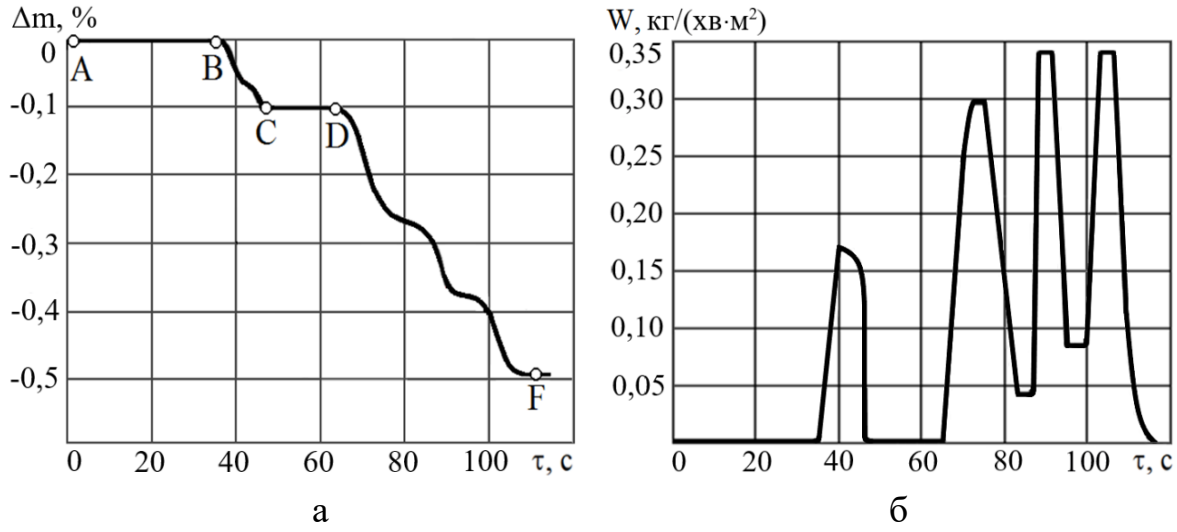


Рисунок 4.25 – Залежність зміни відносної маси суміші 200 г чистого піску з 1 г ВЗ (наважка №2), розміщеного в донній частині наважки (а), та масової швидкості випаровування з неї води (б) від часу обробки наважки мікрохвильовим випромінюванням

Період А-В. В період А-В у наважці №2 (див. рис. 4.25,а) йдуть процеси, подібні процесам періоду А-В наважки №1 на рис. 4.24,а. Істотною відмінністю процесів випаровування води з ВЗ від випаровування води рівномірно розподіленою по всьому об'єму піску є тривалість часу досягнення НВП відкритої поверхні наважки піску.

У разі використання ВЗ даний період трохи більший, ніж у попередній наважці. Це пояснюється тим, що при впливі мікрохвильового випромінювання вологий пісок починає грітися з високою швидкістю

практично одночасно у всьому об'ємі. У той же час, при використанні ВЗ сухий пісок наважки в мікрохвильовому випромінюванні, володіючи діелектричною проникністю в 10...17 разів меншою, ніж вода, нагрівається зі значно меншою швидкістю, ніж вологий пісок. Це призводить до того, що НВП, контактуючи з відносно холодними піщинками, інтенсивно, але лише частково, конденсується на них з подальшим випаровуванням конденсату, через деякий час τ_{AD}.

Конденсація НВП на відносно холодних піщинках прискорює процес їх нагрівання і охолоджує конденсат до більш низьких температур. Як результат випаровування НВП з відкритої поверхні вологого кварцового піску починається через 6...7 с (див. рис. 4.24,а) з моменту початку впливу на нього мікрохвильового випромінювання, а в разі використання ВЗ – тільки через ~37 с (див. рис. 4.25,а).

Період B-C. Це період різкого зниження маси наважки. Характер такого зниження маси пояснюється тим, що маса води у ВЗ перевищує масу конденсату, який може утворитися в капілярних каналах піску за даний час. Тобто, відповідно до ходу залежності на рис. 4.25,а, якби маса ВЗ становила 0,4% від маси піску, то в початковий період нагрівання мікрохвильовим випромінюванням вся пара, що утворилася з ВЗ, осіла б на піщинках у вигляді конденсату. З цього випливає, що зниження маси наважки на 0,1% в період B-C – це пара, яка не встигла конденсуватися на піщинках під час її руху по капілярних каналах і якби наважка ВЗ була 0,4% від маси піску, то період B-C на кінетичної кривій, вірогідно, був би відсутній.

Період C-D. Даний період, по суті, є продовженням періоду A-B і характеризується відсутністю виділення «зайвої» пари в повітря і нагріванням конденсату до ~100 °C. З моменту часу, позначеної на залежності точкою D, поновлюється процес випаровування конденсату і вихід НВП через відкриту поверхню наважки піску в навколишнє середовище. З цього випливає, що при відсутності періоду B-C період A-B повинен був би мати реальну тривалість [349]:

$$\tau_{AD} = \tau_{AB} - \tau_{BC} + \tau_{CD}, \quad (4.4)$$

де τ_{AD}, τ_{AB}, τ_{BC}, τ_{CD} – тривалість періодів A-D, A-B, B-C і C-D відповідно.

Період D-F. Період D-F на залежності – це час випаровування конденсату з піску, який характеризується непостійністю швидкості зменшення маси. Це пояснюється збігом в даний час ряду факторів, в числі яких циклічність виникнення і випаровування конденсату в капілярах наважки, спрямованість руху НВП по капілярах від ВЗ до відкритої поверхні наважки, неоднорідність температурного поля наважки по всьому її об'єму. У точці F, через зазначеної вище причині, випаровування води з наважки завершується.

Відповідно до рис. 4.25,б швидкість випаровування води з наважки №2 має численний змінний характер, що свідчить про порційний характер видалення водяної пари з наважки.

4.5.3 Кінетика сушіння суміші кварцового піску з рідким склом

Залежність зміни відносної маси суміші кварцового піску з 4,5% РС (наважка №3), а також масової швидкості випаровування води з наважки представлені на рис. 4.26 [349].

Відмінністю даної суміші від описаних вище є наявність в ній рівномірно розподіленого за об’ємом наважки водного розчину СН – натрієвого РС. При цьому, одна частина натрієвого РС тонкою плівкою покриває поверхню піщинок, а інша частина, переміщаючись під дією капілярних сил, навколо точок контакту сусідніх піщинок утворює манжети.

Складний характер зміни маси і масової швидкості сушіння даної наважки свідчить про неодноразові зміни механізму переміщення в ній вологи. Як відомо, при швидкому нагріванні РС спінюється і, висихаючи, може формувати пінні структури з різним ступенем стійкості, що привносить певні зміни в кінетиці сушіння подібних сумішей.

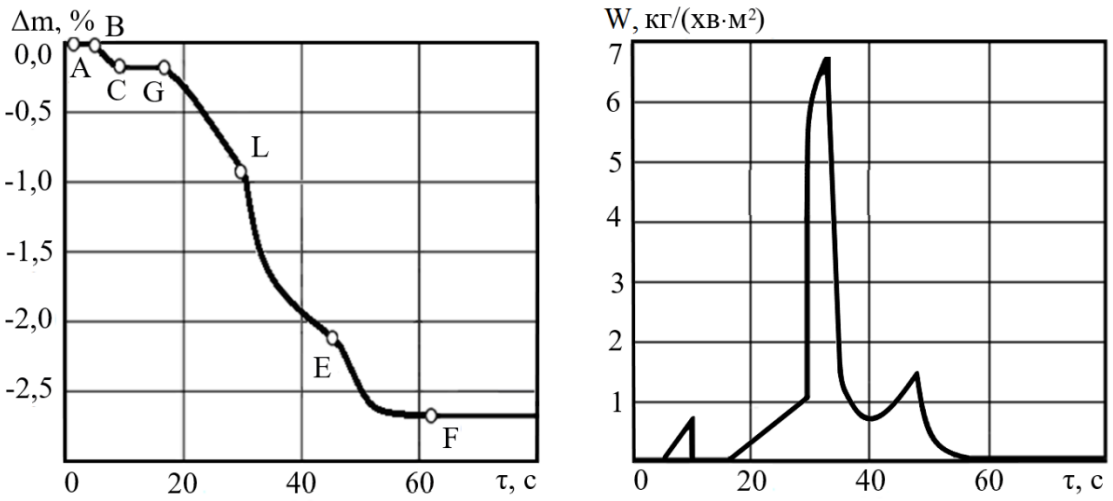


Рисунок 4.26 – Залежність зміни відносної маси суміші кварцового піску з 4,5% РС – наважки №3 (а) та зміна масової швидкості випаровування з неї води (б) від часу обробки наважки мікрохвильовим випромінюванням

З аналізу ходу залежності на рис. 4.26 випливає, що тривалість випаровування води з даної суміші аналогічна тривалості випаровування води з її суміші з чистим піском (див. залежність на рис. 4.24,а), а кінетика випаровування подібна випаровуванню ВЗ з чистого піску (див. залежність на рис. 4.25,а).

Період А-В. Даний період триває перші 6...7 с з початку нагріву мікрохвильовим випромінюванням. За цей час суміш нагрівається до 100 °С, водяна пара, що утворюється з вільної води з РС, рухається до відкритої поверхні наважки, конденсуючись на поверхні капілярів.

Період В-С. Період В-С характеризується тим, що в точці С завершується процес випаровування вільної води, а неконденсована частина НВП, досягнувши відкритої поверхні наважок, виходить за її межі, знижуючи її масу.

Період С-G. У період С-G, мабуть, проходить повторна гідратація частково зневодненого РС конденсатом, підвищення температури розчину, що утворився до 103...108 °С і його спінювання. Однак пара, що утворюється при цьому, залишається в бульбашках СН. З цієї причини маса наважки в цей період часу не зменшується.

Період G-L. Лінійний характер зменшення маси наважки, очевидно, на даний час нагрівання, обумовлений подальшим підвищенням температури наважок, появою нових бульбашок піни, зростанням об'єму і руйнуванням бульбашок піни, що раніше виникли.

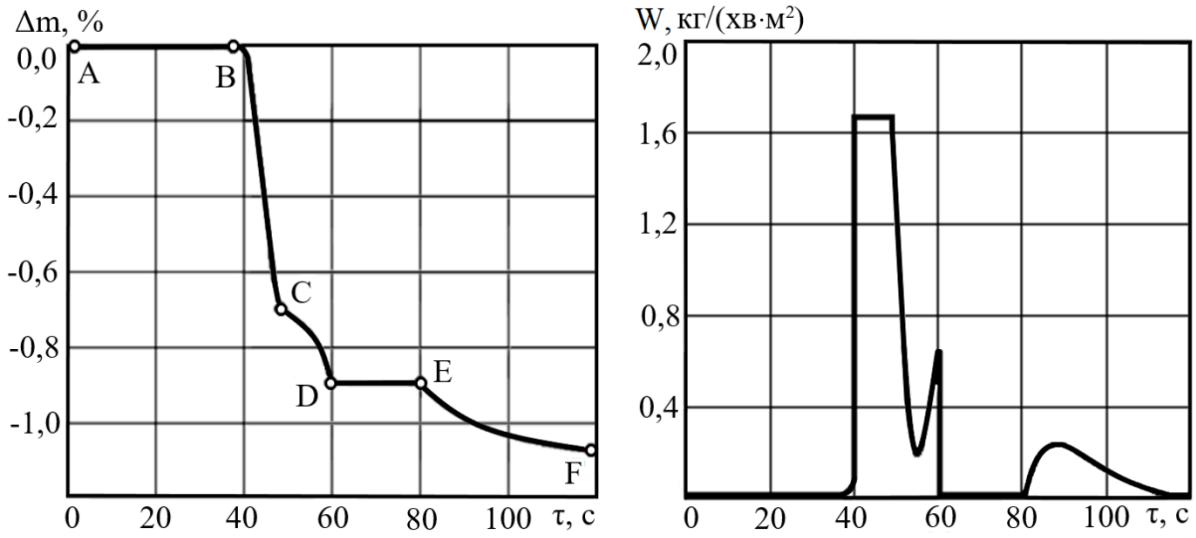
Період L-E. Неухильне монотонне збільшення розмірів пухирців піни під дією зростаючого в них тиску пара в умовах обмеженого простору капіляра призводить до їх руйнування, що переводить початкову ділянку відрізка L-E в практично перпендикулярне положення по відношенню до вісі часу нагріву на рис. 4.26,а. Тобто, цей період характеризується вибухоподібним виділенням (викидом) з наважки пари і, відповідно, практично миттєвим зниженням її маси.

Період E-F. Період E-F характеризується монотонним зниженням маси наважки аж до 64 с. Певне, в цей період часу нагріву спінені структури натрієвого РС повністю руйнуються під дією підвищеного тиску пари в їх бульбашках, в результаті втрати еластичності СН. До закінчення цього періоду, СН стає твердим і зневодненим, а залишки НВП, що утворилися, йдуть за межі наважки.

Відповідно до рис. 4.26,б швидкість випаровування води з наважки №3 відбувається циклічно, що зумовлює появи на графіку трьох максимумів, один з яких найбільший і відповідає, вірогідно, періоду руйнуванню піноподібних структур РС, що призводить до звільнення хімічно зв'язаної води і практично миттєвому збільшенню швидкості її випаровування.

4.5.4 Кінетика структурування кварцового піску, плакованого рідким склом з ~20% гідратної води, з водяним зарядом в мікрохвильовому випромінюванні

На рис. 4.27 представлена зміна відносної маси та масової швидкості випаровування води для кварцового піску, плакованого 3% РС з ~20% гідратної води та ВЗ, розташованим в донній частині (наважка №4) від часу його обробки в паро-мікрохвильовому середовищі [349].



а б

Рисунок 4.27 – Залежність зміни відносної маси (а) та масової швидкості випаровування води з наважки №4 (б) від часу її обробки в паро-мікрохвильовому середовищі

Період A-B. В цей період часу НВП масою 1 г протягом 38 с безперервно і рівномірно надходить в суміш і до закінчення цього періоду досягає її відкритої поверхні. У процесі руху НВП частково конденсується на поверхні капілярів суміші, утворюючи між сусідніми піщинками манжети.

Вода з конденсату частково поглинається СН, утворюючи при цьому водний розчин СН, і, вторинно нагріваючись мікрохвильовим випромінюванням, частково повертається в стан НВП, також бере участь в початку процесу спінювання гідратованого СН.

Період B-C. Цей період характеризується рівномірною швидкістю виділення пари з наважки. Зниження маси наважки в період B-C, ймовірно, обумовлено виникненням і руйнуванням бульбашок піни в обмеженому просторі капілярів суміші і відходом частини НВП за межі наважки.

Період C-D. У цей період відбувається завершення руйнування пінної структури в складі наважки, виникнення між сусідніми піщинками манжетів з гідратованого СН і вибухового видалення з них хімічно слабо зв'язаної

гідратної води, яка перетворюється в НВП і частково залишає наважку.

Період D-E. Цей період характеризується припиненням виділення пари з наважки і підвищенням її температури до 125...127 °С.

Період E-F. У період E-F відбувається монотонне зниження маси наважки (з 80 до 110 с), коли залишки гідратної води з сильним хімічним зв'язком з СН видаляються з нього. При цьому СН вже переважно знаходиться в манжетах і видалення з них води призводить до деякого спінювання СН і подальшого руйнування цих пінних структур. Перейшовши в пароподібний стан, вода у вигляді НВП залишає межі наважки.

Відповідно до рис. 4.27,б швидкість випаровування води з наважки №4 має циклічний характер, що зумовлює появі на графіку трьох максимумів, як і в попередньому випадку, зумовлений руйнуванням піноподібних структур РС, що призводить до звільнення гідратної води (20%) та випаровуванню НВП з ВЗ та виходом їх з відкритої поверхні у атмосферу.

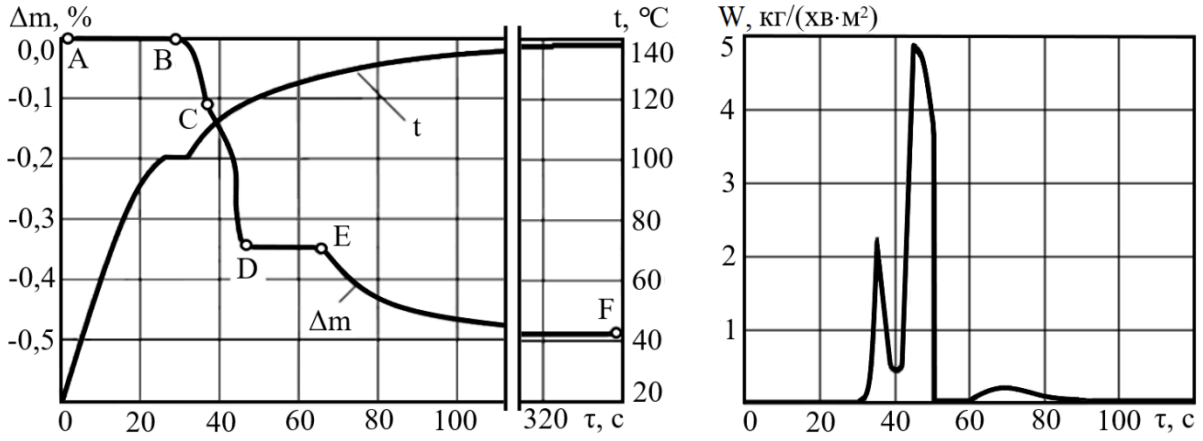
4.5.5 Кінетика структурування плакованого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі

На рис. 4.28 представлена залежність відносної зміни маси кварцового піску (наважка №5), плакованого 3% натрієвого РС, що містить після сушіння мікрохвильовим випромінюванням менше 0,1% гідратної води, з 0,5% ВЗ, а також зміни швидкості випаровування води з наважки №5 від часу її обробки мікрохвильовим випромінюванням [349].

Виходячи з ходу залежностей на рис. 4.28,а в процесі сушіння і структурування плакованого кварцового піску можна виділити характерні періоди часу, сингулярні точки яких на залежності $\Delta m=f(\tau)$ позначені відповідними літерами.

Період A-B. В цей період часу НВП масою 1 г протягом 28 с безперервно і рівномірно надходить в суміш і до закінчення цього періоду досягає її від-критої поверхні. У процесі руху НВП частково конденсується на поверхні

капілярів суміші, утворюючи між сусідніми піщинками манжети. Вода з конденсату частково поглинається СН, утворюючи при цьому водний розчин СН, і, повторно нагріваючись від мікрохвильового випромінювання, частково повертається в стан НВП, а частково бере участь у спінюванні гідратованого СН.



а б

Рисунок 4.28 – Залежність зміни відносної маси і абсолютної температури наважки №5 (а) та відносної швидкості випаровування з неї води (б) від часу її обробки мікрохвильовим випромінюванням

Період B-C, за винятком надходження НВП в суміш з зовні, характеризується продовженням процесів періоду A-B і появою манжетів з гідратованого СН між піщинками. Крім цього в період B-C межі суміші залишає частина пари, що не встигла сконденсуватися в капілярах, а температура наважки досягає 100 °C. По завершенню періоду B-C в наважці практично не залишається вільної води. Крім цього, виходячи з того, що маса СН у плакованому шарі близька до маси НВП і мала в порівнянні з масою кварцового піску, можна припустити, що час гідратації СН значно менше тривалості конденсації пари на його поверхні. Тобто утворюється конденсат, який практично повністю поглинається СН суміші.

Період C-D. Цей період характеризується підвищенням температури наважки від 100 до 108 °C, спінюванням гідратованого СН, і, відповідно,

вибухоподібним зниження маси наважки під завершення цього періоду. Це, ймовірно, обумовлено тим, що водні розчини СН з величиною силікатного модуля 2,8...3,0 являють собою суміш колоїдних гідратованих агрегатів Na_2SiO_3, що структурно і хімічно відрізняються між собою, в яких присутня хімічно слабо пов'язана гідратна вода, видалення якої і відбувається в інтервалі даних температур через формування і руйнування пінних структур в капілярних каналах наважки.

Період D-E. Даний період характеризується незмінністю маси наважки, незважаючи на збільшення її температури з 108 °С до 125...127 °С.

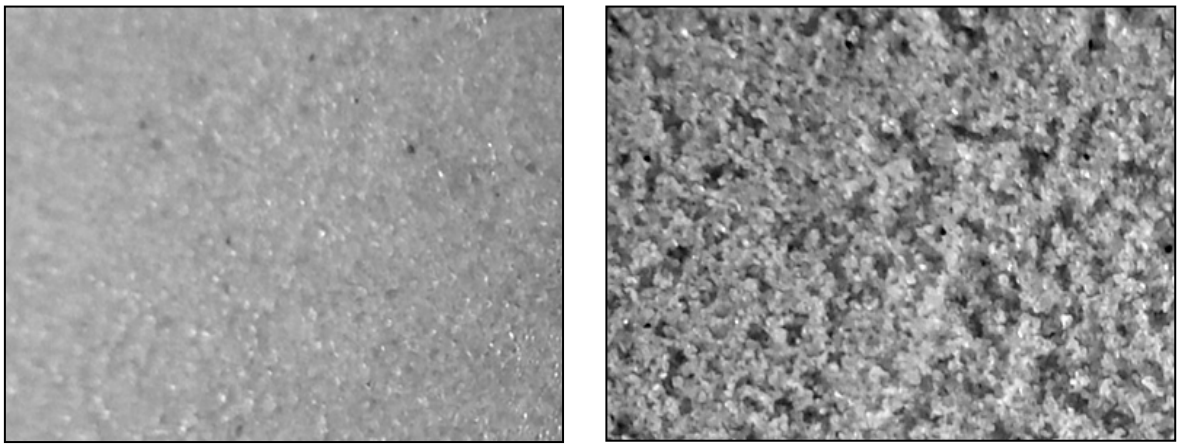
Період E-F. Тривалість даного періоду в процесі сушіння розглянутої наважки – найбільша і досягає ~272 с (з 67 по 339 с). Температура наважки в період E-F (див. рис. 4.28,а) монотонно збільшується від 125...127 °С до 138 °С після чого швидкість нагріву наважки різко підвищується. Такий характер зміни маси наважки свідчить про завершення процесу дегідратації СН в ній. Відносно висока температура і велика тривалість періоду E-F свідчать про те, що в цей період з наважки видаляється гідратна вода, яка має сильний хімічний зв'язок з СН.

За даними [351…355 і ін.] мікрохвильовий вплив електромагнітного поля на воду та водні розчини змінює ряд їх фізичних і хімічних властивостей, в числі яких в'язкість, діелектрична проникність, ступінь гідратації іонів, теплота гідратації і т.п. Виявлені закономірності після дій мікрохвильового випромінювання автори зазначених вище досліджень пов'язують з підвищенням ступеня впорядкованості в розташуванні молекул води в з'єднаннях. Оскільки теплота дегідратації дорівнює за величиною і протилежна за знаком теплоті розведення розчину, то можна припустити, що тривалість періоду E-F, обумовлена послідовністю проходження етапів розвитку процесу дезінтеграції гідратованих молекул СН, а також повнотою проходження даного процесу. Певна розбіжність початку і закінчення зазначених періодів з сингулярними точками на залежності зміни температури в часі пояснюється тепловою інерційністю процесів, що

проходять в наважках, обумовленою масою наважок і місцем розташування гарячого спаю контролюючої термопари в тілі наважки.

Виходячи з кінетики зміни швидкості випаровування води з наважки (див. рис. 4.28,б) і температури завершення структурування ПРС, а також з того, що при мікрохвильовій обробці теплота і волога переміщується з найбільш нагрітих глибинних областей до більш холодних поверхневих шарів суміші, можна констатувати, що для отримання ЛФС в процесі структурування їх сумішей за ПМЗ-процесом не слід допускати підвищення температури в суміші, що структурується, більше 125 °С.

В іншому випадку (з перевищенням сумішшю 125 °С) водяна пара, що виділяється з суміші, буде конденсуватися на більш холодних поверхнях модельно-стрижневого оснащення і розчиняти зневоднений СН в поверхневому шарі структурованої суміші виробу, погіршуючи його якість, що випливає з аналізу зображень на рис. 4.29.



а б

Рисунок 4.29 – Поверхня стрижня масою 400 г, виготовленого за ПМЗ-процесом з кварцового піску, плакованого 0,5% РС і обробленого ВЗ масою 1 г в мікрохвильовому випромінюванні протягом 150 с (а) і 400 с (б), ×2

Для визначення мінімальної тривалості попередньої мікрохвильової обробки сумішей для їх подальшого структурування за ПМЗ-процесом

визначили середню швидкість нагріву 200 г кварцового піску протягом перших 2 хв при його обробці мікрохвильовим випромінюванням з частотою 2,45 ГГц і потужністю магнетрона 900 Вт. Результати визначення середніх швидкостей нагріву представлені у вигляді гістограми на рис. 4.30.

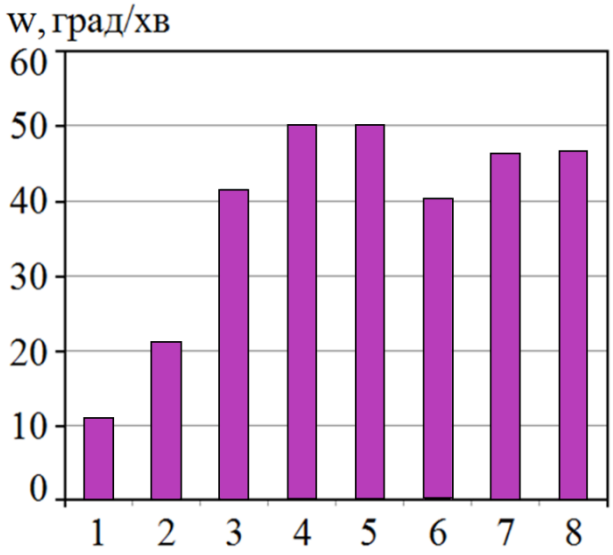


Рисунок 4.30 – Гістограма середньої швидкості нагріву 200 г кварцового піску протягом 2 хв при його обробці мікрохвильовим випромінюванням: 1 – сухий пісок; 2 – сухий пісок і НВП; 3 – пісок плакований 0,5% РС (вміст води в СН – 20%); 4 – пісок плакований 1,5% РС (вміст води в СН – 20 %); 5 – пісок плакований 2,5% РС (вміст води в СН – 20%); 6 – пісок плакований 0,5% РС (вміст води в СН – 0%); 7 – пісок плакований 1,5% РС (вміст води в СН – 0%); 8 – пісок плакований 2,5% РС (вміст води в СН – 0%)

З аналізу даних на рис. 4.30 випливає, що до початку структурування за ПМЗ-процесом плакований РС кварцовий пісок доцільно просушити в полі мікрохвильового випромінювання протягом не менше 3 хв. Така технологічна операція плакування кварцового піску дозволить проводити обробку сумішей способом ПМЗ протягом 2...4 хв без ризику погіршення якості поверхні структурованого виробу за рахунок пересруктурізації суміші. Як показує практика виробництва ЛФС, така попередня сушка дозволить

виготовляти вироби з структурованих ПРС зі стабільним і передбачуваним рівнем їх механічних і технологічних властивостей.

Якщо процеси сушки, досліджених в даних варіантах сумішей представити у вигляді орграфів, то вони будуть мати вигляд, представлений на рис. 4.31, де лінії, що з'єднують вершини орграфу, є періодами, які були виділені на кінетичних кривих, що наведені в описах, а вершини графів (A, B, C, D, G, L, E, F) – сингулярні точки на рис. 4.24...4.28.

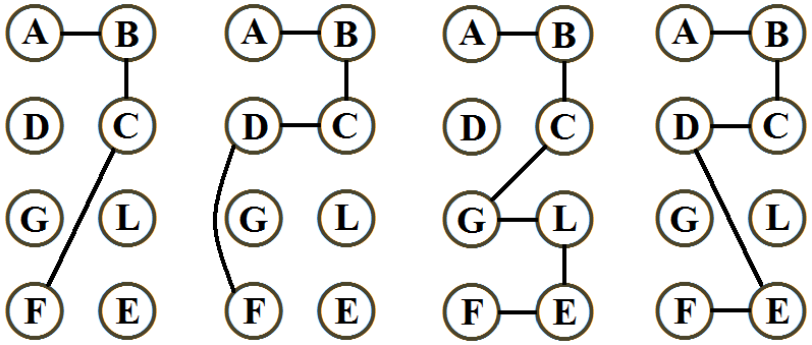


Рисунок 4.31 – Орграфи кінетичних кривих сушіння сумішей: а – пісок з водою; б – пісок з ВЗ; в – пісок з РС; г – плакований РС пісок з ВЗ

З аналізу рис. 4.31 виходить, що незважаючи на певну схожість складів досліджуваних сумішей, різноманітна не тільки кінетика їх сушки, але і тривалість цього процесу. Зокрема тривалість сушіння наважки №1, що містить 0,5% (за масою) води рівномірно розподіленим за обсягом наважки, склала ~118 с, для наважки №2 при тій же кількості води, але НВП, що надходить в наважку з ВЗ, тривалість сушки склала ~140 с. Тривалість сушіння наважки №3 (вміст води в наважці – 2,8%) склала ~77 с, тривалість сушіння наважки №4 (вміст води в наважці – 1,1%) ~120 с, а у наважки №5 (вміст води в наважці – 0,5%) ~340 с.

Тобто, сушка піску мікрохвильовим випромінюванням для кожної конкретної суміші вимагає свого індивідуального вивчення для виявлення її

особливостей і закономірностей.

Таким чином, вперше досліджено кінетику структурування ПРС за ПМЗ-процесом і розроблено опис цього процесу. Встановлено, що при використанні ПМЗ-процесу виділення води з структурованої суміші проходить в три етапи. Перший етап реалізується при температурі суміші ~100 °С, другий етап – при 100...108 °С, третій етап – при 125...138 °С. У зв'язку з цим максимально допустимою температурою нагріву ПРС, що структурована за ПМЗ-процесом, слід вважати 125 °С.

Перевищення зазначеної температури призводить до виділення гідратної води в суміші у вигляді пари, яка може конденсуватися на робочій поверхні модельно-стрижневого оснащення і приводити до погіршення якості поверхні виготовлених ЛФС. Тобто, для стабілізації якості ЛФС, що виготовляються за ПМЗ-процесом, до початку структурування плакований натрієвим РС кварцовий пісок слід просушити в полі мікрохвильового випромінювання протягом не менше 3 хв.

Для визначення енергії активації процесу масопереносу РС ($E_П$) в кварцовому піску, плакованому 3% натрієвого РС, що містить після сушіння мікрохвильовим випромінюванням менше 0,1% (за масою) гідратної води, від часу його обробки мікрохвильовим випромінюванням з 0,5% ВЗ використали залежності, що представлені на рис. 4.32 з роботи [12, 29].

З аналізу залежностей на рис. 4.32 витікає, що під час структурування ПРС за ПМЗ-процесом існує три етапи виділення води. На етапі А-В проходить нагрівання та випаровування вільної води з ВЗ без значних змін в структурі РС суміші. На етапі С-К з РС виділяється гідратна вода, що слабо хімічно пов'язана з СН, а на етапі D-E – вода, що має сильний хімічний зв'язок з СН.

Оскільки для визначення величин $E_П$ замість графічної залежності за рівнянням [223, 225]:

$$\ln(1-a_{\Pi}) = f(\ln\tau), \tag{4.5}$$

де $a_П$ – ступінь перебудови структури РС, використовували кінетичні залежності Δm=f(τ) та t=f(τ), що приведені на рис. 4.32, розрахунок $E_П$ проводили за формулою [223, 226, 356]:

$$E_{П} = -\frac{R \cdot (\ln \tau_1 - \ln \tau_2)}{T_1^{-1} - T_2^{-2}} . \qquad (4.6)$$

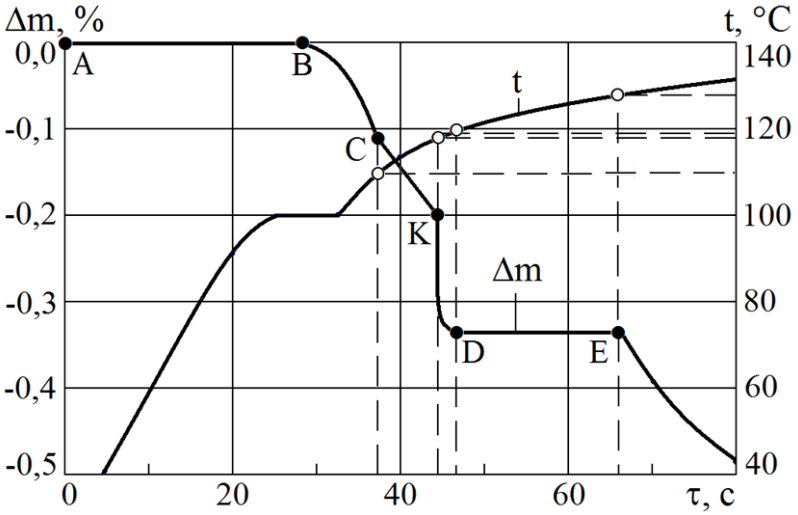


Рисунок 4.32 – Відносна зміна маси і температури наважки кварцового піску, плакованого 3% РС, та 0,5% ВЗ від часу його обробки мікрохвильовим випромінюванням

Виходячи з викладеного, а також з даних на рис. 4.32 розрахували величини $E_П$ за формулою (4.6) для етапів С-К та D-E, які приведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Вихідні дані та результати розрахунків $E_П$

Етап	τ_1, с	τ_2, с	T_1, К	T_2,К	$E_П$, кДж/моль
С-К	37	44	382	391	23,9
D-E	47	66	392	401	49,3

Як витікає з даних табл. 4.8 поризація та, відповідно, перенос РС в складі ПРС, що структурують за ПМЗ-процесом, проходе за двома механізмами. Відповідно до рис. 4.32 на етапі С-К (при 109...118 °С) перенос

РС в капілярних каналах рідкоскляної суміші проходить шляхом його спінювання (див. Додаток Л) [426], яке виникає за рахунок інтенсивного випаровування з нього води. На етапі D-E (при 119...128 °С) перенос РС проходить шляхом його в'язкої течії, що, мабуть, і забезпечує адресне перенесення РС в області міжзеренних контактів під час структурування суміші за ПМЗ-процесом.

4.6. Матеріальний баланс системи «водяна пара – пористе тіло» при атмосферному тиску

Матеріальний баланс системи «водяна пара – пористе тіло» з нерозчинним або обмежено розчинним у воді матеріалом розробляли для визначення мінімальної маси води ($m_{ВЗ}$), яка при атмосферному тиску може міститися у вигляді пари в капілярах такого тіла [357]. При цьому вважали, що ця система є ізольованою з незмінною температурою Т=373 К. Для вирішення задачі використали рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$m_{ВЗ} = \frac{M \cdot P}{R \cdot T} \cdot V, \tag{4.7}$$

де М – молярна маса води (18 кг/(кмоль·К));

V – об'єм капілярів пористого тіла, м^3;

Р – тиск пара в капілярах піску (101325 Па);

Т – температура пара, К;

R – універсальна газова постійна (8310 Дж/(кмоль·К)), з якого знаходимо:

$$V = \frac{m_{СП}}{\rho_{П}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{П}}{\rho_{ПП}}\right), \tag{4.8}$$

де $m_{СП}$ – маса пористого тіла, кг;

$\rho_П$ – уявна питома щільність пористого тіла, кг/м^3;

$\rho_{ПП}$ – питома щільність матеріалу пористого тіла, кг/м^3.

Підставивши формулу (4.8) в (4.7), знаходимо, що:

$$\frac{m_{ВЗ}}{m_{СП}} = \frac{0{,}5884}{\rho_П} \cdot \left(1 - \frac{\rho_П}{\rho_{ПП}}\right) \tag{4.9}$$

або

$$m_{СП} = \frac{m_{ВЗ} \cdot \rho_П}{0{,}5884 - 0{,}000222\rho_П}. \tag{4.10}$$

Зниження питомої щільності матеріалу пористого тіла досягають не тільки за рахунок його заміни на інший матеріал, але і за рахунок введення в нього іншого матеріалу з іншою питомою щільністю. У таких випадках величину $\rho_{ПП}$ слід розраховувати за правилом адитивності:

$$\rho_{ПП} = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i \cdot \rho_\upsilon,$$

де φ_i – масова частка і-го матеріалу у складі пористого тіла;

ρ_i – питома щільність і-го матеріалу, кг/м^3.

Якщо до складу твердого тіла спочатку вводять не тверду, а рідку речовину, з якої під час сушки твердого тіла випаровується рідина, то при розрахунку $\rho_{ПП}$ слід брати питому щільність і масову частку сухого залишку введеної речовини. Зокрема, за результатами обробки експериментальних даних для РС технічної чистоти з M_{SiO2} від 2,8 до 3,0 встановлено, що при 20±1°С та його незмінній питомій щільності масова частка води (φ_{H2O}) практично не залежить від величини M_{SiO2}. При цьому дольову масову частку води в водному розчині та твердому СН (φ_{H2O}) в межах від 0 до 1 з точністю прийнятною для інженерних розрахунків, можна розраховувати за емпіричною формулою (4.3).

Тобто, якщо пористим тілом є структурована зневоднена ПРС, то в розрахунках питому щільність для кварцового піску слід прийняти рівною 2650 кг/м^3, а для зневодненого СН (φ_{H2O}=0) відповідно до розрахунку по (4.5) – 2440 кг/м^3, яка відповідає питомій щільності силікат-брилі.

Залежність $m_{ВЗ}/m_{СП}=f(\rho_П)$, що побудована за формулою (4.9), представлена на рис. 4.33,а, а залежність $m_{СП}=f(\rho_П)$ при $m_{ВЗ}$=1 г для кварцового піску, що побудована за формулою (4.10) – на рис. 4.33,б.

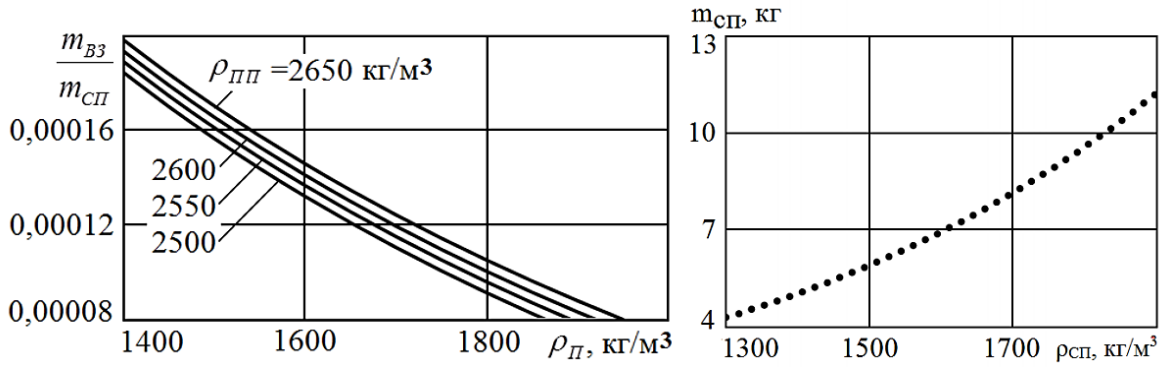


Рисунок 4.33 – Залежність $m_{ВЗ}/m_{СП}=f(\rho_П)$ (а) та $m_{СП}=f(\rho_П)$ при $m_{ВЗ}$ = 1 г (б)

З рис. 4.33 випливає, що з підвищенням уявної та зменьшенням питомої щільності пористого тіла маса води, яка може знаходитися в ньому при атмосферному тиску та температурі 373 К у вигляді водяної пари, знижується. При цьому, різниця в масах водяної пари і пористого тіла свідчить про те, що у таких випадках пористі тіла для умов виготовлення з них ЛФС не вимагають додаткового теплового сушіння, оскільки вміст вологи в них відповідає їх сухому стану.

Якщо один з компонентів суміші розчинний у воді, то формулу (4.10) слід записати в наступному вигляді:

$$m_{СП} = \frac{(m_{ВЗ} - \phi_П \cdot m_Ж) \cdot \rho_П}{0,5884 - 0,000222\rho_П}, \qquad (4.11)$$

де $m_{ВЗ}$ – маса використаної води в ВЗ, кг.

$\varphi_П$ – масова частка води в структурі розчинної у воді матеріалу суміші;

$m_Ж$ – маса в суміші розчинного в воді матеріалу, кг.

$\rho_П$ – уявна питома щільність кварцового піску, кг/м^3.

4.7 Матеріальний баланс системи «водяна пара – кварцовий пісок – рідке скло» при структуруванні в паро-мікрохвильовому середовищі

Максимальну масу ПРС, яку можливо структурувати 1 г ВЗ за ПМЗ-процесом, розраховували на основі матеріального балансу в якому, на відміну від матеріального балансу в п.п. 4.6, враховано ще і вплив РС.

Оскільки в РС присутні дві форми СН β-$Na_2O{\times}nSiO_2$ і γ-$Na_2O{\times}nSiO_2$ [358], то, мабуть, це і є причиною того, що вода з наважок РС виділяється не тільки при підвищенні їх температури до 100 °С, але і при більших значеннях температури. Як було зазначено вище, в залежності від умов плакування до моменту початку паро-мікрохвильової обробки піску, що плакували, на його піщинках знаходиться частково або повністю зневоднений СН, оскільки в результаті сушіння на повітрі (при 100 °С) з натрієвого РС видаляється тільки вільна вода [349]:

$$Na_2O{\cdot}nSiO_2{\cdot}mH_2O \leftrightarrows Na_2O{\cdot}nSiO_2{\cdot}\varphi H_2O + (m\text{-}\varphi)H_2O\uparrow, \qquad (4.12)$$

де φ – масова частка гідратаційної води в СН,

а при сушінні в мікрохвильовому випромінюванні видаляється практично вся вода:

$$Na_2O{\cdot}nSiO_2{\cdot}mH_2O \leftrightarrows Na_2O{\cdot}nSiO_2 + mH_2O\uparrow.$$

Тобто, величина φ може приймати значення від 0 до значення, розрахованого за формулою, отриманої за результатами обробки даних роботи [341]:

$$\varphi = -0{,}0556 \cdot M_{SiO2}^2 + 0{,}2806 \cdot M_{SiO2} - 0{,}1661, \qquad (4.13)$$

де M_{SiO2} – силікатний модуль натрієвого РС в плакованому шарі.

У той же час масова частка СН у вихідному РС з величиною силікатного модуля M_{SiO2} = 2,8...3,0 становить [349]:

$$\psi_{PC} = 0{,}01 + 1{,}075 \cdot ln\,(\rho_{PC}), \qquad (4.14)$$

де ρ_{PC} – питома щільність натрієвого РС, г/см^3.

В цьому випадку, використання в ПМЗ-процесі 1 г водяної пари дозволяє гідратувати СН в плакованому шарі кварцового піску масою m_{CH}, г:

$$m_{CH} = \frac{1}{\varphi} - 1. \qquad (4.15)$$

Виходячи з викладеного, матеріальний баланс ПМЗ-процесу можна представити наступною формулою [349]:

$$M_{ПКП} + M_{П} = M_{С} + M_{ПУ}, \qquad (4.16)$$

$$M_{ПКП} = M_{КП} + M_{СН} + M_{ГВ},\ M_{С} = M_{КП} + M_{ГСН},$$

де $M_{ПКП}$, $M_{С}$, $M_{КП}$, $M_{СН}$, $M_{ГВ}$, $M_{П}$, $M_{ГСН}$, $M_{ПУ}$ – маса плакованого кварцового піску, маса структурованого кварцового піску, маса чистого кварцового піску, маса СН в плакованих шарах, маса гідратної води в СН, маса НВП, використаного для структурування піску, маса гідратованого СН в плакованому шарі піщинок, маса НВП не витраченого на гідратування СН відповідно.

З рівняння матеріального балансу витікає, що, наприклад, при $M_{ГВ}$=$M_{ПУ}$=0 з урахуванням (4.13)...(4.15) масу плакованого кварцового піску, структурованого за ПМЗ-процесом ($M_{С}$, г), можна розрахувати за формулою:

$$M_C = \frac{m_{CH}}{\psi_{PC}} \cdot \frac{1}{m_{PC}}, \qquad (4.17)$$

або:

$$M_C = \frac{\left(\frac{1}{-0{,}0556 \cdot M_{SiO2}^2 + 0{,}2806 \cdot M_{SiO2} - 0{,}1661} - 1 \right)}{\left[0{,}01 + 1{,}075 \cdot \ln(\rho_{HC})\right] \cdot m_{PC}},$$

де m_{PC} – масова частка РС, витраченого на плакування кварцового піску.

Використовуючи формулу (4.17) побудували залежності $M_C=f(m_{PC},M_{SiO2},\rho_{PC})$. Вихідні дані, прийняті для розрахунків за формулою (4.17) і побудови відповідних залежностей наведені в табл. 4.9, результати розрахунків представлені на рис. 4.34.

Таблиця 4.9

Вихідні дані, прийняті для розрахунків за формулою (4.17) і побудови залежностей на рис. 4.34

№ залежності на рис. 4.34	M_{SiO2}	ρ_{PC}, г/см^3	m_{PC}, % (за масою)	Залежність
1	2,9	1,44	0...6	експериментальна
2	2,9	1,44	0...6	розрахункова
3	2,8...3,0	1,44	1,0	розрахункова
4	2,8...3,0	1,44	0,5	розрахункова
5	2,9	1,40...1,52	0,5	розрахункова

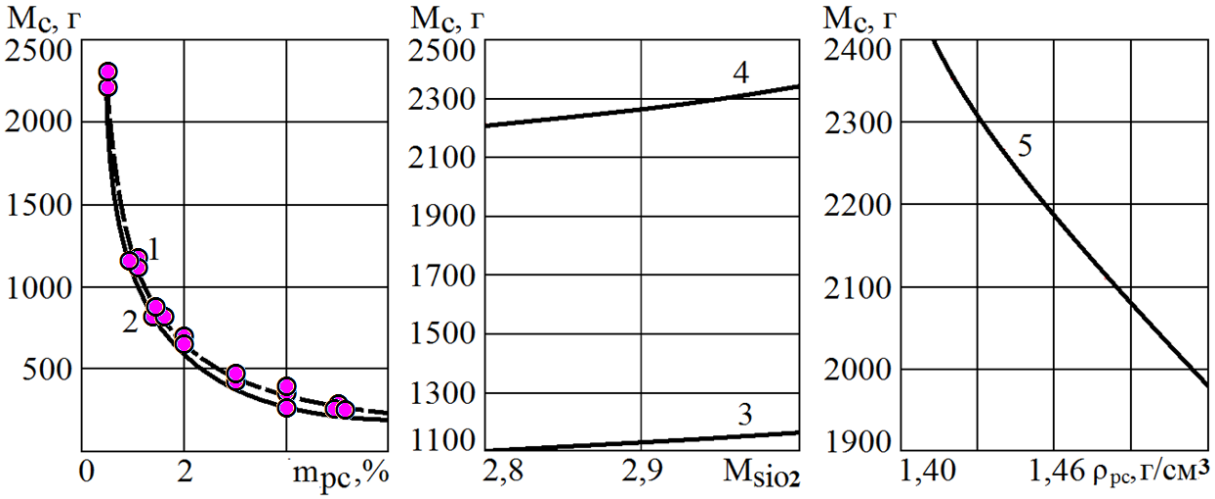
Примітка. Залежність 1 отримана при тривалості паро-мікрохвильової обробки зразків протягом 8 хв.

Виходячи з того, що за результатами експериментальних досліджень зміна маси структурованої суміші мікрохвильовим випромінюванням в часі можна описати законом квадратного кореня, формулу (4.17) доцільно записати у вигляді:

$$M_C = 6 \cdot \frac{\left(\frac{1}{-0{,}0556 \cdot M_{SiO2}^2 + 0{,}2806 \cdot M_{SiO2} - 0{,}1661} - 1 \right)}{0{,}01 + 1{,}075 \cdot \ln(\rho_{HC})} \times \frac{\sqrt{\tau}}{m_{PC} + 0{,}125}, \qquad (4.18)$$

де τ – тривалість паро-мікрохвильового впливу на плакований пісок, с;

m_{PC} – вміст натрієвого РС в кварцовому піску при його плакуванні, % (за масою).



а б в

Рисунок 4.34 – Залежність Mc=f(m_{pc}) (а), Mc=f(M_{SiO2}) (б), Mc=f(ρ_{pc}) (в):

1 – M_{SiO2}=2,9; ρ_{pc}= 1,44 г/см^3; m_{pc}=0...6 % (експеримент); 2 – M_{SiO2}=2,9;

ρ_{pc}= 1,44 г/см^3; m_{pc}=0...6 %; 3 – M_{SiO2}=2,8...3,0; ρ_{pc}= 1,44 г/см^3; m_{pc}=1,0 %;

4 – M_{SiO2}=2,8...3,0; ρ_{pc}= 1,44 г/см^3; m_{pc}=0,5 %; 5 – M_{SiO2}=2,9;

ρ_{pc}= 1,40...1,52 г/см^3; m_{pc}=0,5 %

З аналізу формули (4.17) і залежностей на рис. 4.34,а витікає, що для виготовлення ЛФС за ПМЗ-процесом доцільно використовувати кварцовий пісок, плакований 0,5...2,5% РС, що при масі ВЗ 1 г дозволить, відповідно, структурувати від 2400 до 500 г суміші протягом 8...4 хв.

4.8 Опис механізму структурування плакованого рідким склом сипучого кварцового піску в паро-мікрохвильовому випромінюванні

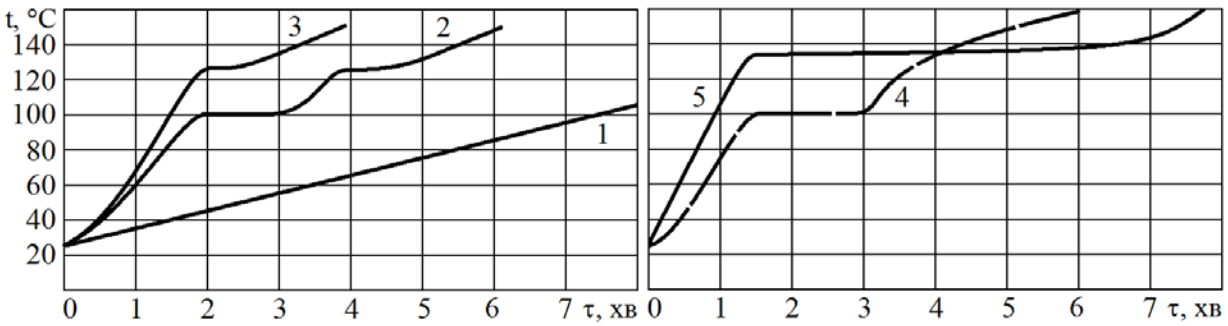
Дослідження впливу схеми підготовки і обробки кварцового піску перед нагріванням в мікрохвильовому випромінюванні проводили на наважках кварцового піску масою 200 г. Умови підготовки та обробки наважок кварцового піску наведені в табл. 4.10 [358].

Таблиця 4.10

Умови підготовки та обробки наважок кварцового піску перед нагріванням мікрохвильовим випромінюванням

Зразок	Вміст РС в плакованому піску,%	Попередня сушка		Обробка при сушінні НВП масою 1 г
		на повітрі	в мікрохвильовому випромінюванні	
1	0	немає	немає	немає
2	5	є	немає	немає
3	5	є	є	немає
4	0	немає	немає	є
5	5	є	є	є

Наважки нагрівали в картонних стаканах з подвійною стінкою, та виміром їх температури через кожні 30 с. Результати вимірювань температури наважок у вигляді їх термограм представлені на рис. 4.35.



а б

Рисунок 4.35 – Термограми нагріву чистого і плакованого РС кварцового піску мікрохвильовим випромінюванням без обробки (а) і з обробкою (б) НВП (номера термограм див. за номерами зразків у табл. 4.10)

Аналіз термограм на рис. 4.35,а показує, що температура чистого піску (див. 1 на рис. 4.35,а) при нагріванні мікрохвильовим випромінюванням змінюється в часі прямо пропорційно в усьому дослідженому часовому інтервалі зі швидкістю ~10 °С/хв, що свідчить про незмінність величини діелектричної проникності кварцового піску в інтервалі від 24 до 104 °С.

Нагрівання плакованого піску (див. 2 на рис. 4.35,а), попередньо вису-

шеного на повітрі, проходить найбільш інтенсивно в перші 2 хв нагрівання (швидкість ~38 °С/хв). На 2-й хв нагріву температура зразка досягає 100 °С і не змінюється до 3-ї хв. З 3-ї до 4-ї хв температура зразка підвищується зі 100 °С до ~127 °С і залишається постійною протягом наступних ~30 с.

Підвищена (у порівнянні з чистим піском) швидкість нагрівання плакованого піску до 100 °С пояснюється наявністю на поверхні піщинок шару гідратованого СН, в якому вода знаходиться як у вільному, так і в зв'язаному стані. Величина діелектричної проникності вільної води значно більше, ніж у зв'язаної [265, 359…360] і ще вище, ніж у кварцового піску. Відповідно, швидкість нагріву наважки в цілому буде визначатися швидкістю нагріву води, що міститься в плакованому шарі. Після досягнення 100 °С проходить процес випаровування гравітаційної (вільної, молекулярної) води, а при ~127 °С проходить часткове випаровування гідратаційної (зв'язаної) води з плакованого шару кварцового піску, що і призводить до тимчасової сталості температури на термограмі, відповідно, при 100 °С і 127 °С.

На відміну від зразка №2, зразок №3 після сушіння на повітрі був короткочасно (протягом 2-х хв) оброблений мікрохвильовим випромінюванням. В результаті цього вільна вода з плакованого шару випарувалася і на термограмі нагріву цього зразка присутня тільки одна ділянка тимчасово постійної температури, яка обумовлена випаровуванням з СН гідратаційної води при 127 °С.

Термограма 4 на рис. 4.35,б – результат нагрівання чистого піску мікрохвильовим випромінюванням з одночасним пропусканням через пісок НВП масою 1 г при атмосферному тиску. Порівняння ходу термограм 1 і 4 показує, що при проходженні пари через пісок швидкість його нагрівання мікрохвильовим випромінюванням різко підвищується і становить близько 50 °С/хв. Таке значне збільшення інтенсивності нагріву чистого піску пояснюється тим, що при проходженні по капілярах пара починає конденсуватися на піщинах і в міру збільшення товщини шару конденсату зростає його діелектрична проникність, в результаті чого конденсат починає

інтенсивно грітися під дією мікрохвильового випромінювання, одночасно підвищуючи і температуру піску. Після досягнення 100 °С конденсат переходить в пару, яка знову конденсується на піщинках. Процес цієї динамічної рівноваги триває до тих пір, поки температура піску не досягне 100 °С. Після досягнення піском 100 °С, відбувається випаровування залишків конденсату у всьому об’ємі піску і на термограмі з'являється ділянка тимчасового припинення зміни температури зразка.

Термограма 5 на рис. 4.35,б відповідає зміні температури плакованого кварцового піску під дією пари і мікрохвильового випромінювання (ПМЗ-процес). Основною відмінністю даної термограми від розглянутих вище є характер зміни температури зразка. Відповідно до ходу термограми 5, зразок перші 1,5 хв нагрівається з середньою швидкістю ~69 °С/хв після чого, досягши температури 137...140 °С, протягом ~5 хв не змінює своєї температури.

Дані особливості, мабуть, пов'язані не тільки з процесами конденсації і випаровування в перші 1,5 хв, а й поглинанням пари і конденсованої води плакованим шаром СН. При цьому слід зазначити, що спосіб і тривалість сушіння гідратованого СН не змінюють його структуру, про що свідчать рентгенодифракційні спектри РС, представлені на рис. 4.36.

З рис. 4.36 витікає, що у висушених різними способами і за різний час зразках чистого РС відсутні будь-які кристалічні фази, тобто всі зразки мають аморфну структуру, основними складовими якої є β-$Na_2O{\cdot}3SiO_2$ і γ-$Na_2O{\cdot}3SiO_2$.

Тобто ні дегідратація, ні тривала (до 180 діб) витримка, ні вплив мікрохвильового випромінювання на частково дегідратоване РС не змінює його аморфну (склоподібну) структуру.

З цього витікає, що кварцовий пісок з ПРС, структурований мікрохвильовим випромінюванням, може бути очищений (регенерований) від плакованого його СН шляхом занурення ПРС у воду. Крім того таку ПРС за відсутністю в ній неприпустимої кількості ТД можливо використовувати і в якості сировини для виробництва натрієвої силікат-брили.

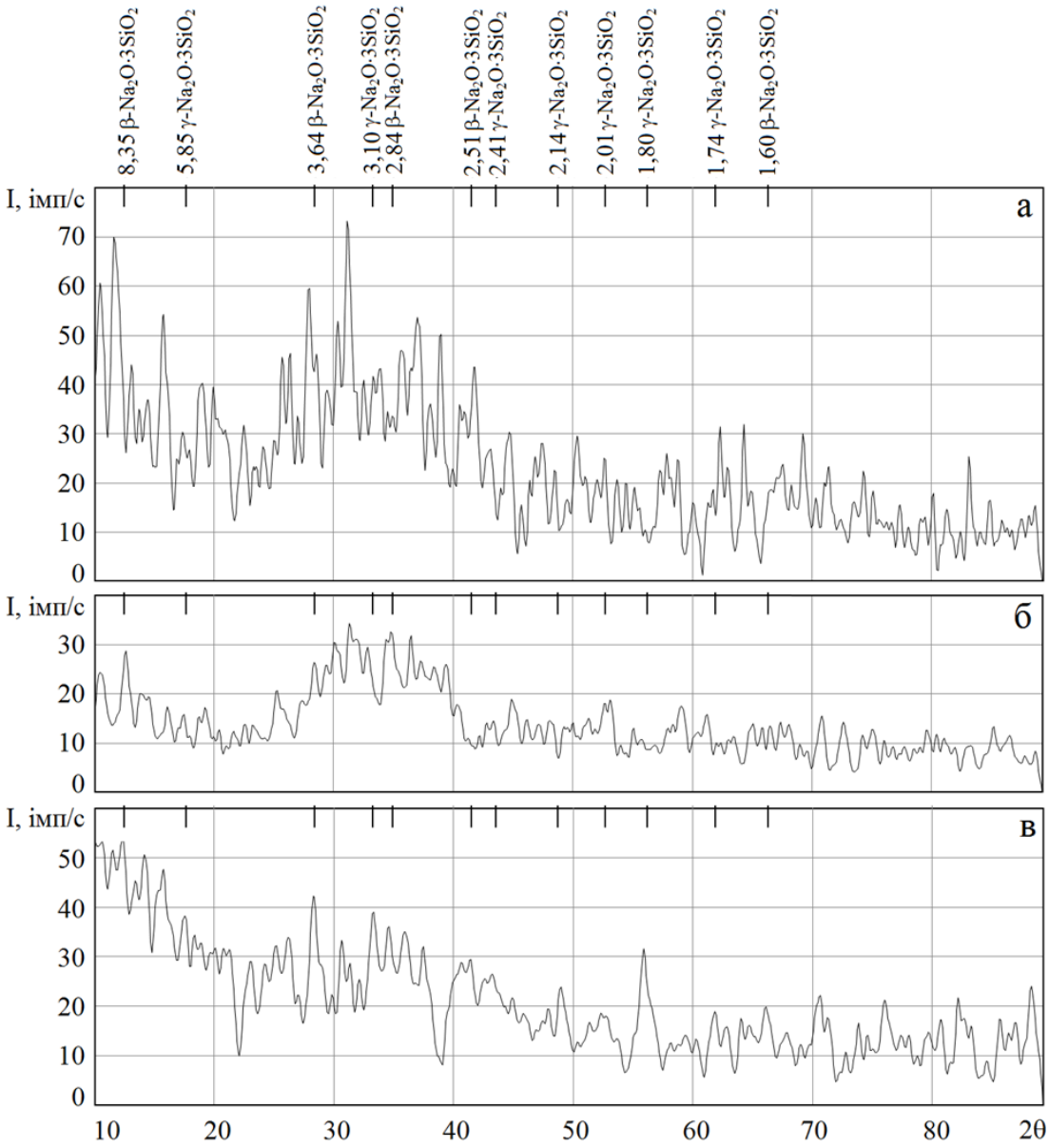


Рисунок 4.36 – Рентгенодифракційні спектри РС, висушеного протягом 7 діб до вмісту води 24% (а), висушеного на повітрі протягом 7 діб до вмісту води 24% і обробленого мікрохвильовим випромінюванням протягом 4 хв при потужності магнетрона 700 Вт (б), висушеного протягом 180 діб до вмісту води 16% (в)

Автори роботи [362] відзначають, що видалення з $Na_2O{\cdot}3SiO_2{\cdot}nH_2O$ води відбувається при температурі вище температури склування (t_g) і супроводжується піноутворенням. У свою чергу, температура склування і спінювання залежать від вмісту в СН води і знижується з її збільшенням.

Розраховуючи величину t_g від вмісту води в СН за рівнянням, де

враховано пайовий вплив гідроксильних іонів і молекулярної води, автори [362] приходять до висновку, що вирішальний вплив на t_g надають гідроксильні іони, а молекулярна вода в СН є здебільшого його розчинником.

Використовуючи відцифровані графічні дані роботи [363] і розглядаючи вплив гідроксильних іонів і молекулярної води в СН ($Na_2O{\cdot}3SiO_2{\cdot}nH_2O$) на величину його діелектричної постійної, як єдине ціле, отримали наступну формулу для розрахунку температури склування [358]:

$$t_g = \frac{450}{\sqrt{1+0{,}9\cdot m_{H_2O}}}, \tag{4.19}$$

де m_{H2O} – масова частка води в СН,%, з якої випливає, що зі збільшенням вмісту гідратаційної води величина t_g зменшується по експоненційній залежності, про що свідчить залежність на рис. 4.37, яка побудована за формулою (4.19). Тобто, в даному випадку, спінювання РС за ПМЗ-процесом відбувається при 100...108 °С (див. п.п. 4.5.5), що відповідає вмісту 16...19% води (див. рис. 4.37) в РС. Виходячи з викладеного вище можна припустити, що як і у чистого піску на початковому етапі нагріву мікрохвильовим випромінюванням водяна пара, що конденсується на поверхні плакованого шару, утворює шар води (конденсату), який має вкрай низьку діелектричну проникність і, отже, повільно нагрівається мікрохвильовим випромінюванням.

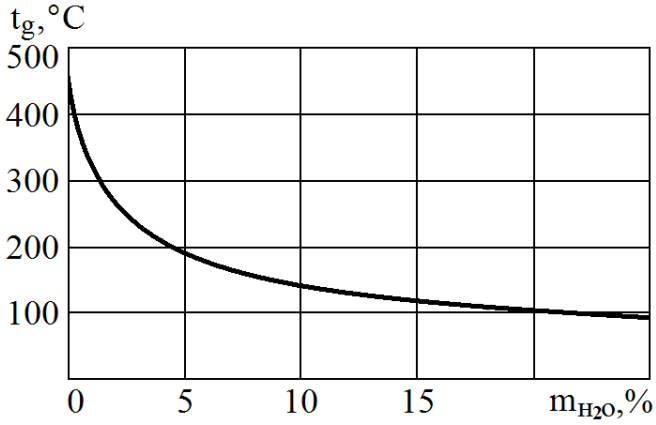


Рисунок 4.37 – Залежність температури склування $Na_2O{\cdot}3SiO_2{\cdot}nH_2O$ від масового вмісту в ньому води

Протягом часу контакту пари з піщинками, а в наслідок – пари і конденсату, товщина шару конденсату збільшується, а його діелектрична проникність зростає. Під дією мікрохвильового випромінювання конденсат нагрівається і випаровується, але за час нагрівання частину конденсату поглинає СН, який стає його гідратаційною водою.

Цей процес безперервний і триває до моменту підвищення температури піску (до 100 °С), при якій пара, що залишилася, по відношенню до зразка перестане бути насиченою, тобто в момент припинення конденсації пари на піщинках.

Виходячи з того, що в початковий період нагрівання вся вільна вода в порах зразка була поглинена СН, а швидкість нагріву гідратаційної води мікрохвильовим випромінюванням нижче, ніж швидкість нагріву вільної води, то в характері ходу термограми 5 в часі на рис. 4.35,б і спостерігається період тривалої (в порівнянні зі зразком 4) відсутності нагрівання зразка.

Описані процеси, відповідно до підрозділу 4.5.5 і наданому вище опису, супроводжує спінювання РС (при 109...118 °С) та плівковий перенос гідратованого розчину СН (при 119...128 °С) в межах кожної піщинки.

Ці процеси більш детально розглянемо з використанням схеми, які представлені на рис. 4.38.

На рис. 4.38,а...г представлені схеми елементарних подій (мікрорівень, де переважний напрямок переміщення молекул пари і води, а на рис. 4.38,в і рух водного розчину СН, зазначено стрілками), що проходять на поверхні плакованого шару. Під схемою кожного етапу надано вигляд поверхні контактуючих між собою піщинок сферичної форми (макрорівень, де поверхня піщинок без плакованого їх шару зафарбована синім кольором) для кожного з чотирьох етапів структурування суміші за ПМЗ-процесом.

Виникнення явища плівкового масопереносу обумовлено тим, що насичення СН на поверхні плакованого піску (див. рис. 4.38,а) конденсованою водою в певний момент часу перетворює його в водний розчин (див. рис. 4.38,б), який є рухливою рідиною, що добре змочує поверхню піщинок.

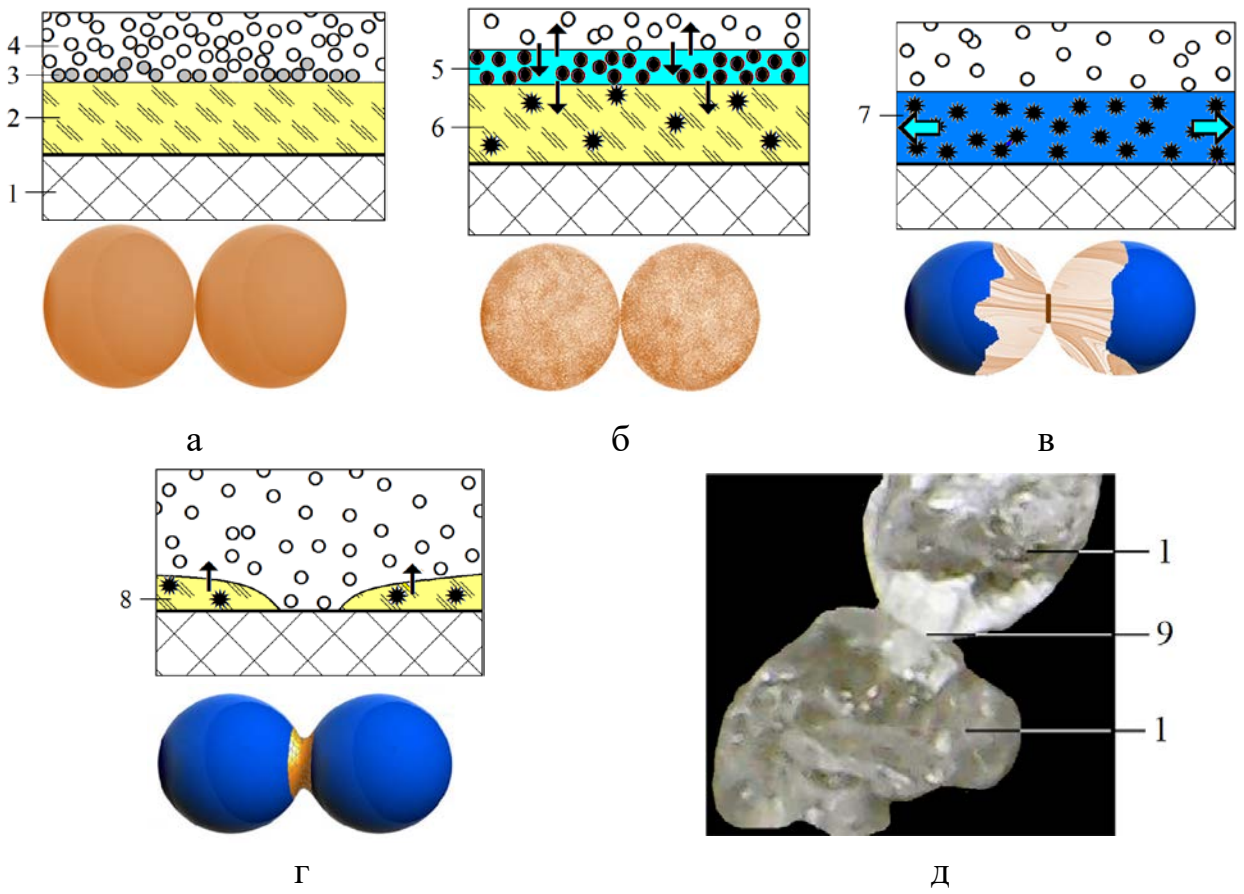


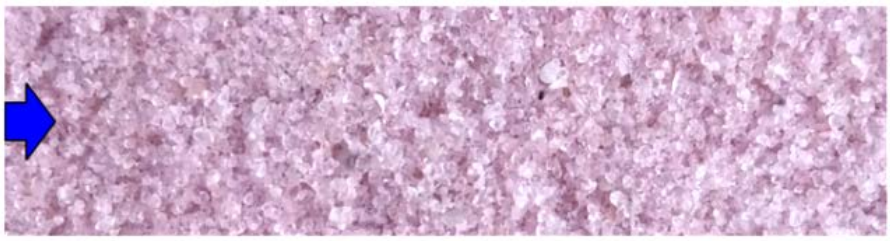
Рисунок 4.38 – Схеми етапів формування манжети СН між піщинками (а...г) і вигляд манжети з СН між піщинками кварцового піску, ×25 (д):
1 – піщинка; 2 – шар СН; 3 – моношар адсорбованих молекул пари;
4 – НВП; 5 – конденсат (вода); 6 – гідратований СН; 7 – водний розчин СН;
8 – дегідратований СН; 9 – манжета з СН між піщинками кварцового піску; ○ – водяна пара; ● – вода в рідкому стані; ✹– гідратаційна вода

Наявність точок контакту між сусідніми піщинками в суміші природним чином сприяє утворенню великої кількості капілярів, що сходяться навколо них. Наявність таких капілярів, за рахунок виникнення капілярних сил, призводить до плівкового руху розчину СН і його переміщенню та накопиченню в областях точок контакту сусідніх зерен (див. рис. 4.38,в).

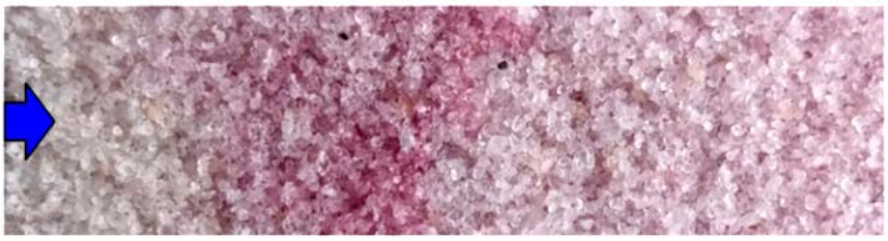
Накопичення цього розчину навколо точок контакту призводить до природного формуванню міжзеренної манжети (див. рис. 4.38,г), яка після часткового або повного видалення з неї гідратної води перетворюється в

твердий СН, що скріплює між собою сусідні зерна піску (див. рис. 4.38,д). Тобто, дегідратацією СН в міжзеренних манжетах ПРС завершується процес її структурування за ПМЗ-процесом.

Необхідно відзначити, що для успішної реалізації ПМЗ-процесу кількість пари та масова швидкість її випаровування з ВЗ (див. рис. 4.6), яка проходить через плакований РС пісок, повинно бути регламентовано. Це обмеження обумовлено тим, що при надмірній кількості та швидкості пари на піщинках виникає і надмірна кількість води. Як результат, СН в таких місцях повністю розчиняється в конденсаті, а пара, яка безперервно надходить у суміш, – частину цієї води витісняє в прилеглі частини суміші. Це перенесення розчину СН призводить до різкого зниження міцності структурованої суміші в місцях скупчення конденсату. Даний ефект ілюструється видами структур стрижнів на рис. 4.39, у яких в РС, що використане для плакування піску, був введено барвник червоного кольору.



а



б

Рисунок 4.39 – Структура плакованого кварцового піску (×8), структурованого раціональною (а) і надлишковою (б) масою водяної пари при обробці мікрохвильовим випромінюванням (стрілки на зображеннях– напрямок руху пари під час обробки мікрохвильовим випромінюванням)

З аналізу рис. 4.39,а витікає, що при малій кількості пари, пропущеної через ПРС під час її структурування, колір поверхні циліндричного стрижня, розрізаного вздовж його вісі, рожевий та рівномірний по всій довжині. У разі використання надлишкової кількості пари колір суміші з боку торця стрижня, через який подавали пару (див. рис. 4.39,б), практично, білий.

На деякій відстані від цього торця колір стає рожевим і далі переходить в насичений рожевий. На великих відстанях інтенсивність забарвлення піску знижується, переходячи в рожевий колір вихідного тону. Така зміна в інтенсивності забарвлення структурованої суміші свідчить про надлишкову кількість використаної для структурування водяної пари.

Для визначення кінетики структурування плакованого РС кварцового піску в оснащенні за ПМЗ-процесом в оснащенні використовували наступну методику. Кварцовий пісок плакували різною кількістю РС. Приготовані наважки плакованого піску масою 2,4 кг поміщали в поліпропіленову склянку і протягом різного часу обробляли мікрохвильовим випромінюванням з потужністю магнетрона 700 і 900 Вт, перепускаючи при цьому через наважку 1 г водяної пари. Після закінчення обробки зі склянки видаляли непов'язаний пісок і зважували структуровану частину піску.

Результати цих досліджень у вигляді кінетичних кривих (кінетики структурування за ПМЗ-процесом) представлені на рис. 4.40.

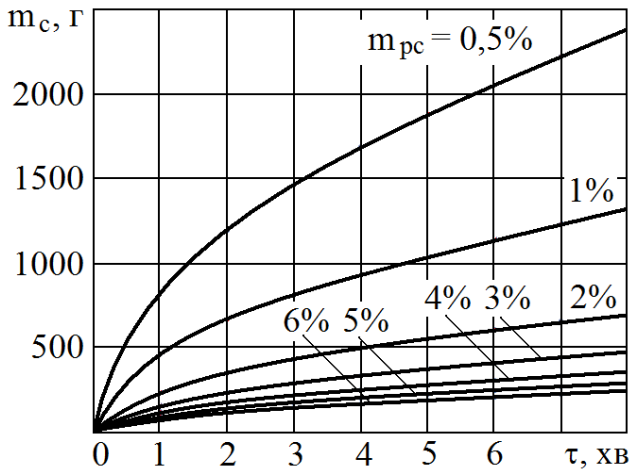


Рисунок 4.40 – Кінетика структурування плакованого РС кварцового піску від тривалості його обробки мікрохвильовим випромінюванням і маси РС, яке пішло на плакування піску (при 1 г водяної пари)

За результатами обробки експериментальних даних, представлених на рис. 4.40, отримали наступну формулу, г:

$$m_C = \frac{530}{m_{PC} + 0{,}125} \cdot \sqrt{\tau}\,, \qquad (4.20)$$

де m_{PC} – маса РС, що використано для плакування піску, % (понад 100% піску);
τ – час обробки мікрохвильовим випромінюванням, хв.

З аналізу ходу залежностей на рис. 4.40 витікає, що маса плакованого РС кварцового піску, структурованого за ПМЗ-процесом, зростає зі зменшенням маси РС, яке використали для плакування кварцового піску, і зі збільшенням тривалості паро-мікрохвильової обробки суміші.

За результатами обробки даних роботи [105], вміст зневодненого СН в РС можна розрахувати за формулою, % (за масою):

$$m_{CH} = 107{,}5 \cdot \ln(\rho_{PC}) + 1, \qquad (4.21)$$

де ρ_{PC} – питома щільність натрієвого РС при 20...25 °С з величиною силікатного модуля від 2,8 до 3,0 г/см^3.

З урахуванням (4.21), перераховуючи за повністю дегідратованим СН з РС, формула (4.20) набуває вигляду:

$$m_C = \frac{200}{\left\{0{,}01 \cdot \left[107{,}5 \cdot \ln(\rho_{PC}) + 1\right] \cdot m_{PC}\right\}^{0{,}9}} \cdot \sqrt{\tau}\,. \qquad (4.22)$$

Об’єм структурованого піску розраховували наступним чином. Оскільки:

$$m_C = \rho_K \cdot V\,, \qquad (4.23)$$

де V – об'єм структурованого піску (стрижня, форми), см^3;

$\rho_К$ – уявна щільність піску, ущільненого вібрацією, г/см^3,

то, прирівнюючи (4.22) і (4.23) і вирішуючи тотожність щодо V, отримуємо, см^3:

$$V = \frac{200}{\rho_К \cdot \{0{,}01 \cdot [107{,}5 \cdot \ln(\rho_{РС}) + 1] \cdot m_{РС}\}^{0{,}9}} \cdot \sqrt{\tau}\,, \qquad (4.24)$$

де $\rho_К$ – уявна щільність кварцового піску, г/см^3;

$\rho_{РС}$ – питома щільність РС, використаного для плакування кварцового піску, г/см^3.

Використовуючи формулу (4.24), для визначення величини V побудували номограму, представлену на рис. 4.41.

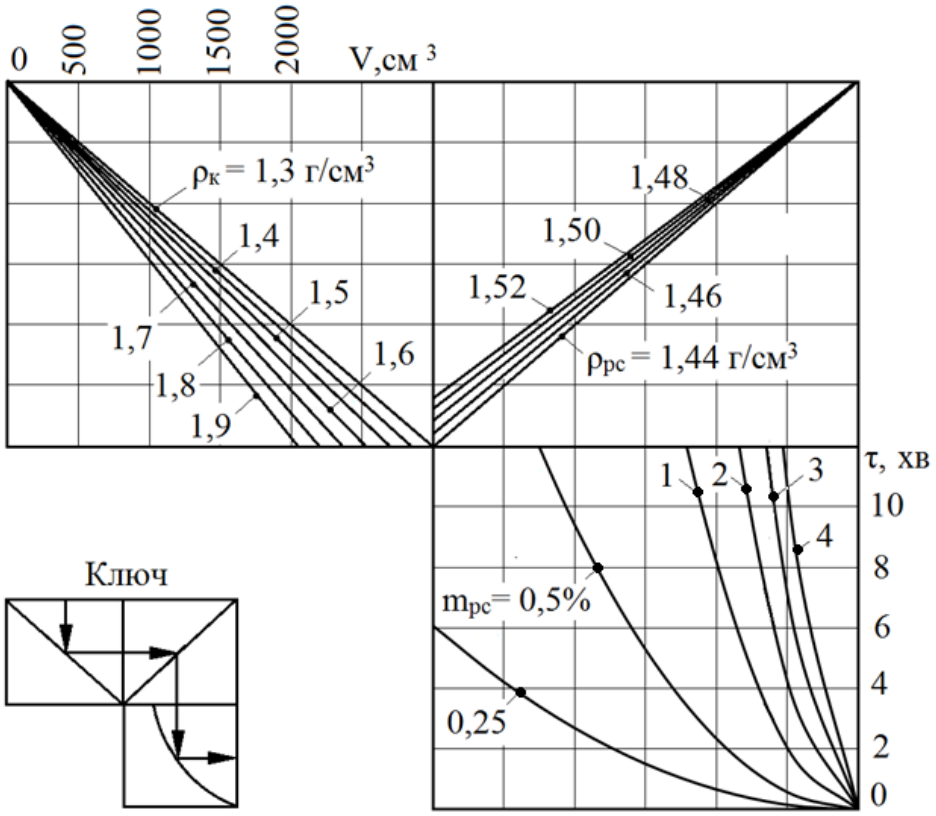


Рисунок 4.41 – Номограма для визначення тривалості обробки плакованого РС кварцового піску мікрохвильовим випромінюванням з потужністю магнетрона 700...900 Вт і частотою випромінювання 2,45 ГГц при масі водяної пари 1 г

Аналіз формули (4.24) і номограми на рис. 4.41 показує, що за інших рівних умов, тривалість мікрохвильової обробки ПРС за ПМЗ-процесом тим довша, чим більше об'єм і уявна щільність ПРС, більший масовий вміст і питома щільність РС, використаного для плакування кварцового піску в ПРС. При цьому найменш помітний вплив на тривалість мікрохвильової обробки надає питома щільність РС в межах від 1,42 до 1,52 г/см^3.

Тобто, об'єм ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом, тим більший, чим менше в суміші РС, менше уявна щільність ПРС і триваліший час впливу на суміш мікрохвильового випромінювання.

4.9 Висновки

1. Уявна щільність вібраційно ущільненого піску (чистого, плакованого) адитивна пайовому масовому вмісту в ньому нормованих фракцій піщинок і зростає від 1100 до 1900 кг/м^3 зі зменшенням середнього розміру його зерен від 0,82 до 0,16 мм і зі збільшенням модуля їх дрібноти від 20 до 60.

2. Підвищенню міцності ЛФС, що виготовляють за ПМЗ-процесом, сприяє як збільшення маси РС, використаного для плакування кварцового піску, так і маси води в ВЗ.

3. Для забезпечення рівномірності міцності по тілу ЛФС, суміші які структуровані за ПМЗ-процесом, ВЗ слід розташовувати переважно в нижніх і тупикових частинах оснащення, яке використовують, з урахуванням напрямку руху водяної пари по відношенню до місць її виходу з суміші під час її структурування.

4. Розроблено опис механізму масопереносу РС в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання, згідно з яким перенесення маси РС в капілярі проходить в результаті багаторазового повторення етапів руйнування капсул РС за схемою подібною ланцюговій реакції.

5. Вперше досліджено кінетику сушіння, виявлено особливості процесу сушіння та структурування кварцового піску плакованого натрієвим РС та

структурованого за ПМЗ-процесом.

6. Встановлено, що при використанні ПМЗ-процесу виділення води з структурованої суміші проходить в три етапи. Перший етап реалізується при ~100 °С, другий – при 109...118 °С, третій – при 119...128 °С. При цьому перенос РС в ПРС, яку структурують за ПМЗ-процесом, проходе за двома механізмами:

- при 109...118 °С перенос РС в капілярних каналах ПРС відбувається шляхом його спінювання, яке виникає за рахунок інтенсивного випаровування з нього води з величиною енергії активації $E_П$ = 23,9 кДж/моль;

- при 119...128 °С перенос РС відбувається шляхом його в'язкої течії з величиною енергії активації $E_П$ = 49,3 кДж/моль.

7. Максимально допустимою температурою нагріву ПРС під час її структурування за ПМЗ-процесом слід вважати 125 °С оскільки перевищення зазначеної температури призводить до виділення гідратної води в суміші у вигляді пари, яка може конденсуватися на робочій поверхні модельно-стрижневого оснащення і приводити до погіршення якості поверхні виготовлених ЛФС.

8. Для ЛФС, що виготовляються за ПМЗ-процесом, рекомендовано плакований натрієвим РС кварцовий пісок після сушіння на повітрі до сипучого стану додатково просушити мікрохвильовим випромінюванням протягом не менше 3 хв.

9. Отримано аналітичні залежності та побудована номограма для визначення тривалості обробки плакованого РС кварцового піску мікрохвильовим випромінюванням з потужністю магнетрона 700...900 Вт і частотою випромінювання 2,45 ГГц при масі водяної пари 1 г.

10. За результатами складання матеріального балансу встановлено, що наявність РС в кварцовому піску та його низька уявна щільність суттєво знижують масу ПРС, яку можливо обробити фіксованою кількістю насиченої водяної пари, по відношенню до чистого кварцового піску, що пов'язано з процесами гідратації-дегідратації РС, його кількістю, відносною пористістю суміші та часом її нагрівання мікрохвильовим випромінюванням .

11. Для структурування ПРС за ПМЗ-процесом доцільно використовувати кварцовий пісок, плакований 0,5...2,5% РС, що при масі ВЗ 1 г дозволить, відповідно, структурувати від 2400 до 500 г суміші протягом 8...4 хв.

12. Маса структурованої ПРС за ПМЗ-процесом збільшується зі зменшенням маси РС, що використали на плакування піску, та за законом квадратного кореня зі збільшенням часу структурування.

РОЗДІЛ 5. ВЛАСТИВОСТІ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ, ЩО СТРУКТУРОВАНІ ЗА СПОСОБОМ ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО ЗАТВЕРДІННЯ, ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЇХ СТРУКТУРУВАННЯ

5.1 Газотвірна здатність піщано-рідкоскляних сумішей після сушки мікрохвильовим випромінюванням та структурування в паро-мікрохвильовому середовищі

Присутність води у складі ФСС не дозволяє визначити її реальну газотвірну здатність за загальноприйнятою методикою відповідно до ГОСТ 23409.12 без відповідного калібрування та локального нагрівання окремих робочих елементів приладу.

Це зумовлено конденсацією водяної пари на робочих елементах приладу під час проведення досліджень, що приводить до значної похибки значень газотвірної здатності таких сумішей. Тому, газотвірну здатність свіжоприготовленої ПРС з 5% РС, а також ПРС, структурованих за CO_2-процесом розраховували за формулою [364]:

$$Г=1670 \cdot m_B, \quad (5.1)$$

де m_B – маса води в 1 г структурованої суміші, г.

Виходячи з того, що в РС цих сумішей, частка води становить 60,1% (за масою), розрахунок газотвірної здатності ПРС, що висушена при 203±3 °С, проводили за формулою (5.1) з урахуванням наступної формули [364]:

$$m_B=0,385-0,2549 \cdot 10^{-2} \cdot t+0,7046 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 -0,9194 \cdot 10^{-8} \cdot t^3+0,4583 \cdot 10^{-11} \cdot t^4, \quad (5.2)$$

де t – температура нагріву РС під час досліджень, °С.

Величини газотвірної здатності досліджуваних ПРС наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Газотвірна здатність ПРС с 5% РС

Спосіб затвердіння РС	Тривалість структурування ПРС, хв	Г, $см^3/г$		
		експеримент	розрахунок	
			за (5.1)	за (5.1, 5.2)
-	0	50,2...50,7	50,9	
Продувка CO_2	0,8	48,4...50,8	50,9	
Сушка при 203±3 °С	180	7,2...7,7		7,6

Аналіз даних табл. 5.1 показує, що розрахункові та експериментальні значення газотвірної здатності досліджених ПРС практично збігаються. Отже формули (5.1) і (5.2) припустимо використовувати для розрахунку газотвірної здатності як структурованих, так і неструктурованих ПРС.

Залежності газотвірної здатності плакованого кварцового піску, висушеного до сипучого стану на повітрі, а також на повітрі і в мікрохвильовому випромінюванні, від маси РС, представлені на рис. 5.1.

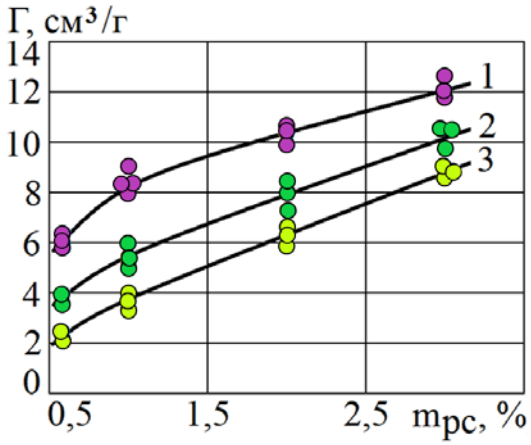


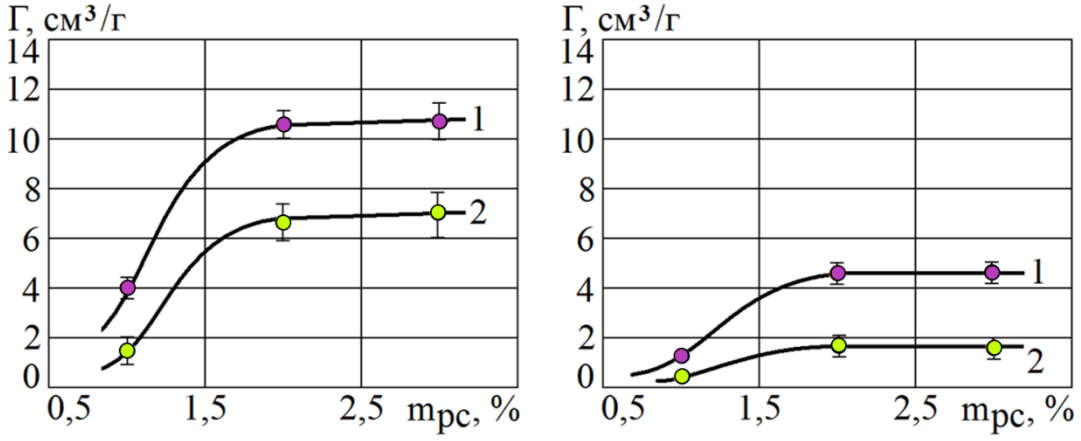
Рисунок 5.1 – Газотвірна здатність плакованого піску висушеного до сипучого стану: на повітрі (1), на повітрі і в мікрохвильовому випромінюванні в центрі обертового столу протягом 2 хв (2) і 5 хв (3) в залежності від маси РС в ньому

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.1 випливає, що зі збільшенням маси РС, використаного для плакування кварцового піску, газотвірна здатність

ПРС, висушеної як на повітрі, так і з наступним сушінням мікрохвильовим випромінюванням, збільшується. При цьому газотвірна здатність ПРС зменшується зі збільшенням тривалості сушіння плакованого піску мікрохвильовим випромінюванням і зі збільшенням часу структурування.

Ця закономірність пояснюється обмеженістю тривалості сушіння плакованого піску як на повітрі (1 год при 27...28 °С), так і в мікрохвильовому випромінюванні. Тобто, зі збільшенням маси РС в суміші для більшого видалення з неї води потрібно витратити більше часу сушіння.

Залежності газотвірної здатності плакованого піску, висушеного на повітрі до постійної маси, обробленого мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв (а) і 5 хв (б), структурованого мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв (1) і 5 хв (2) в центрі і на краю обертового столу від маси РС на плакування, представлені на рис. 5.2 і рис. 5.3 відповідно.

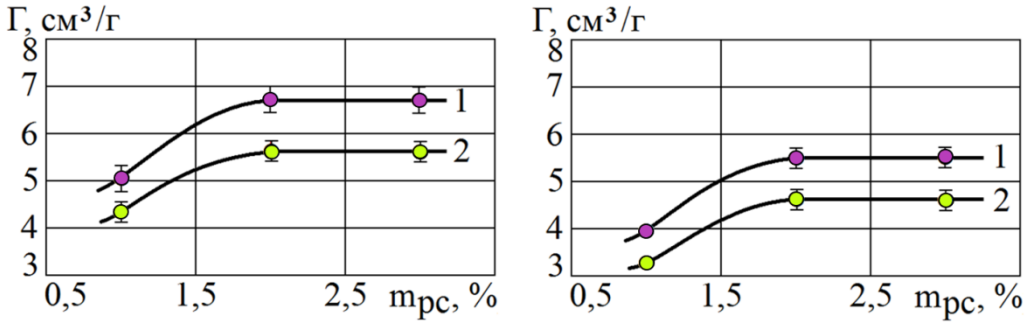


а б

Рисунок 5.2 – Газотвірна здатність плакованого піску, висушеного на повітрі до постійної маси, обробленого мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв (а) і 5 хв (б), структурованого мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв (1) і 5 хв (2) в центрі обертового столу в залежності від маси РС в піску

Аналіз ходу залежностей на рис. 5.2 і рис. 5.3 показує, що для зниження газотвірної здатності ЛФС, що виготовляють за ПМЗ-процесом, слід

використовувати кварцовий пісок, плакований менше ніж 1,5% РС, який після сушки на повітрі до постійної маси, оброблюють мікрохвильовим випромінюванням протягом 5 хв і структурують в паро-мікрохвильовому середовищі протягом 5 хв.



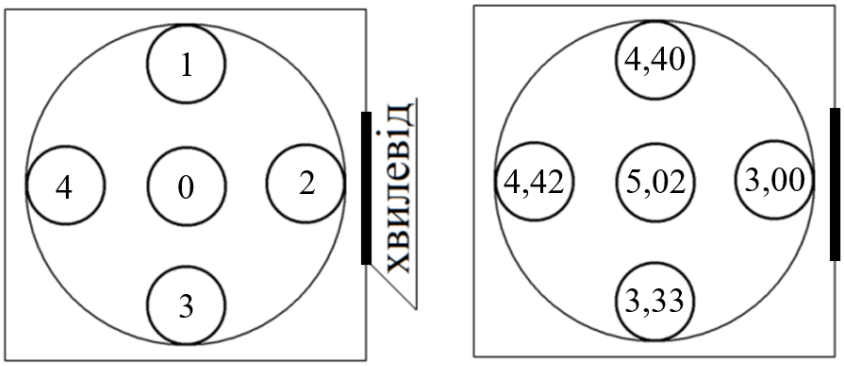
а б

Рисунок 5.3 – Газотвірна здатність плакованого піску, висушеного на повітрі до постійної маси, обробленого мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв (а) і 5 хв (б), структурованого мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв (1) і 5 хв (2) на краю обертового столу в залежності від маси РС в піску

У цих випадках, незалежно від положення структурованої суміші на обертовому столі її газотвірна здатність буде перебувати в межах від 1,5 до 5 $см^3/г$, що, як свідчить практика використання ПРС, при газопроникності понад 100 од попереджує виникнення у виливках газових раковин.

При вмісті РС, що було витрачено для плакування кварцового піску в ПРС, від 2% до 3% (див. рис. 5.2 і рис. 5.3) їх газотвірна здатність практично стає незалежною від вмісту РС. Мабуть, це пов'язано зі спінюванням РС під дією мікрохвильового випромінювання, що сприяло його більш інтенсивному та глибинному зневодненню.

Результати визначення газотвірної здатності одночасно структурованих за ПМЗ-процесом наважок ПРС загальною масою 1 кг від їх вихідного положення на обертовому столі (див. рис. 5.4,а) резонатора при вмісті в суміші 1,5% РС, представлені на рис. 5.4,б.



а б

Рисунок 5.4 – Схема розміщення на обертовому столі наважок ПРС (0-4) при їх структуруванні за ПМЗ-процесом (а) та їх газотвірна здатність в $см^3/г$ (б)

Аналіз даних на рис. 5.4 показує, що незалежно від маси одночасно структурованих наважок плакованого піску залежність їх газотвірної здатності від положення на обертовому столі резонатора мікрохвильовій печі якісно відповідає залежностям на рис. 5.2 і рис. 5.3.

Тобто, газотвірна здатність структурованої суміші, що розташована в області вісі обертання столу, завжди більше ніж суміші, яка при структуруванні знаходиться ближче до краю обертового столу. Зниження газотвірності сумішей, що знаходяться на краю обертового столу в резонаторі, пояснюється циклічністю їхнього нагріву, яка, мабуть, інтенсифікує процес видалення з них вологи [424, 425].

Незалежно від положення структурованої суміші щодо вісі мікрохвильової печі, що обертається в резонаторі, її газотворність буде знаходитися в межах від 3,33 до 5,02 $см^3/г$.

З числа наважок, структурованих на краю обертового столу, найбільшою газотвірною здатністю характеризується наважка, що найбільш віддалена від входу хвилеводу в резонатор, а найменшою – наважка, що з самого початку знаходилася поблизу входу хвилеводу в резонатор.

Причина такої відмінності величин газотвірної здатності одночасно структурованих наважок ПРС, вочевидь, пов'язана як з характером впливу

мікрохвильового випромінювання на структуровану суміш, так і просторовим розподілом пучностей в резонаторі на рівні наважок.

5.2. Робота вибивання та водостійкість піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі

Одним з основних недоліків ПРС, які структуровані за традиційними способами, є їх висока залишкова міцність, що підвищує трудоємність або робить неможливим вибивання стрижнів з виливків. Принциповою відмінністю ПМЗ-процесу від відомих способів структурування є використання в складі суміші немодифікованого РС та переважно «адресний» розподіл сполучного матеріалу в міжзеренному просторі ПРС.

Виходячи з результатів роботи [365] в дослідженнях сушку мікрохвильовим випромінюванням свіжоприготовлених ПРС проводили протягом 240 с. Структура свіжоприготовленої ПРС після обробки мікрохвильовим випромінюванням при вмісті РС від 1,0% до 3,5% надана на рис. 5.5.

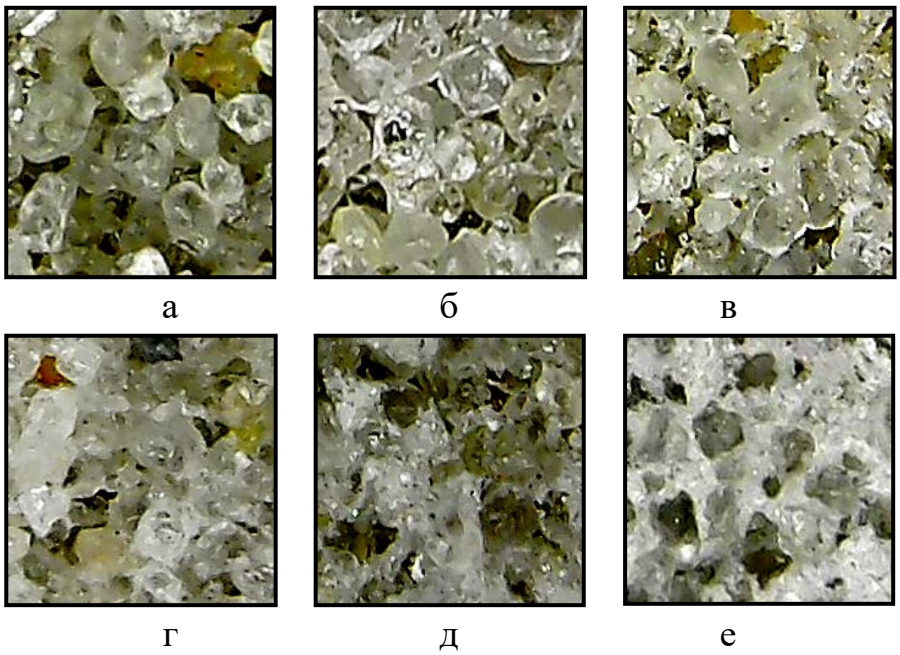


Рисунок 5.5 – Структура свіжоприготовленої ПРС після обробки мікрохвильовим випромінюванням при вмісті РС (за масою), ×30:
а – 1,0%; б – 1,5%; в – 2,0%; г – 2,5%; д – 3,0%; е – 3,5%

З аналізу зображень на рис. 5.5 витікає, що структура зразків ПРС зі свіжоприготовленої суміші при вмісті РС до 1,5% (див. рис. 5.5,а,б) являє собою зерна кварцового піску, які з'єднані між собою манжетами щільного СН, та має мережу міжзеренних капілярних каналів. При вмісті РС від 1,5% до 2,5% (див. рис. 5.5,в,г) в структурі структурованої ПРС з'являються ознаки присутності пінних осередків СН.

При вмісті РС більше 2,5% (див. рис. 5.5,д) простір між зернами кварцового піску починають заповнювати піноподібні осередки СН і зникати манжети. При вмісті 3,5% РС (див. рис. 5.5,е) манжети між зернами практично повністю зникають, а капілярний простір ПРС повністю заповнюється спіненим СН [211].

З цього витікає, що мікрохвильове сушіння свіжоприготовленої ПРС недоцільно, тому що при вмісті РС більше 2% в суміші виникають пінні структури СН, а при вмісті РС менше 2% спостерігається руйнування півформ під час їх протягування (стрижнів при їх вилученні з оснащення).

Залежність роботи вибивання ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом з 0,5%, 1,5% і 2,5% РС, від температури її попереднього нагріву надано на рис. 5.6.

На відміну від ПРС, що висушені мікрохвильовим випромінюванням в свіжоприготовленому стані, ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, не мають пінних структур СН. Тому міцність ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, монотонно зростає зі збільшенням в неї РС, яке було витрачено на плакування кварцового піску.

Розглядаючи питання про вибивку ПРС стрижнів з виливків слід виділити дві особливості даних сумішей в структурованому стані. Для пояснення розглянемо схему розрізу виливка зі стрижнем на рис. 5.7.

У відповідності до схеми на рис. 5.7, стрижень являє собою тіло сферичної форми, на якому співвісне і діаметрально розташовані циліндричні бобишки. За час відведення теплоти від залитого в форму розплаву і виливка 1, що охолоджується, стрижень 2 нагрівається нерівномірно. Якщо поверхневий шар стрижня нагрівається від 600 °С на відстані R_{600} від його центру до

максимальної температури на видаленні R (див. рис. 5.7).

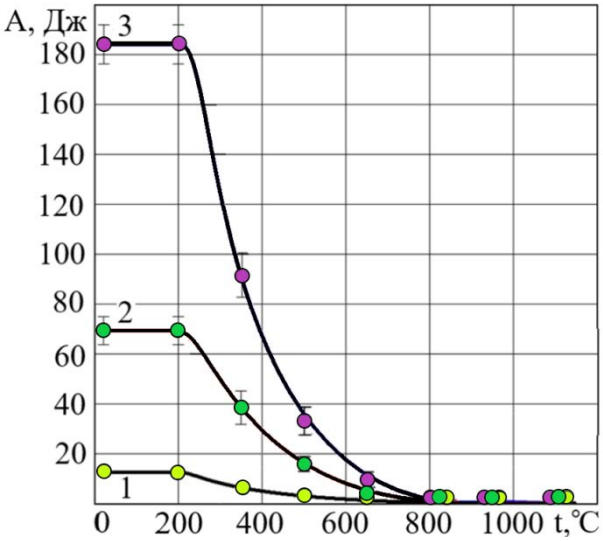


Рисунок 5.6 – Залежність роботи (А) вибивання ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом з 0,5% (1), 1,5% (2) і 2,5% (3) РС, від температури її попереднього нагріву

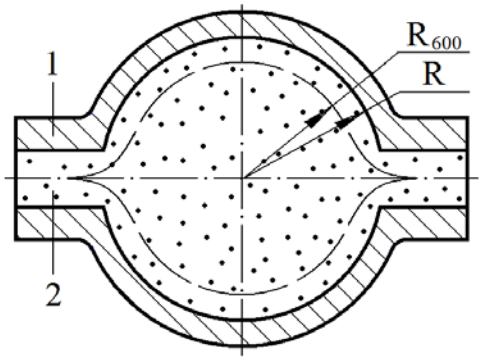


Рисунок 5.7 – Схема перерізу виливка зі стрижнем: 1 – виливок; 2 – стрижень

Це означає, що при ударно-вібраційному способі з виливка можливо видалити лише поверхневий шар стрижня, товщина якого в сферичній частині стрижня складе:

$$h_{П} = R - R_{600}, \tag{5.3}$$

де R – зовнішній радіус стрижня (див. рис. 5.7), мм;

R_{600} – радіус стрижня, де його температура підвищилась до 600 °С, мм.

При цьому внутрішня частина стрижня, маючи значно більшу міцність, залишиться практично незруйнованою, що під час вибивання вимагатиме збільшення тривалості небажаного ударно-вібраційного впливу на виливок. Ця закономірність, з двох найбільш значущих, є першою особливістю ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом.

Друга особливість полягає в тому, що ПРС, яка структурована за ПМЗ-процесом, досить швидко руйнується, контактуючи з гарячою водою [366].

Відповідно до методики досліджень, величину відносної тривалості руйнування зразків у воді (водостійкість) розраховували за формулою:

$$\nabla = \tau_i / \tau_1, \quad (5.4)$$

де τ_i – тривалість руйнування і-го зразка у воді, с;

τ_1 – тривалість руйнування зразків у воді (температура води 80 °С) із структурованого кварцового піску, плакованого 0,5% (за масою) РС, мікрохвильовим випромінюванням протягом 2 хв. Абсолютна величина τ_1 в експериментах склала 94 с.

Залежність відносної тривалості руйнування в киплячій воді (водостійкість) зразків з 1,5% РС, структурованих за ПМЗ-процесом протягом 2, 4 і 7 хв, від температури їх попереднього нагрівання та їх подальшому охолодженні на повітрі представлена на рис. 5.8.

З аналізу ходу залежності на рис. 5.8 випливає, що зі збільшенням температури попереднього нагрівання від 100 до 600 °С відносна тривалість руйнування (водостійкість) зразків монотонно збільшується і може бути розрахована за формулою:

$$\nabla = 1{,}32 \cdot \ln(t) - 5{,}69, \quad (5.5)$$

де t – температура попереднього нагрівання зразка від 100 до 600 °С, °С.

У разі попереднього нагріву зразків від 600 до 700 °С відносна тривалість

їх розчинення (водостійкість) різко збільшується і при нагріванні до температур понад 700 °С зразки в розглянутих умовах набувають практично абсолютну водостійкість в межах тривалості їх витримки у воді за прийнятою методикою. При цьому відносна тривалість руйнування зразків практично не залежить від тривалості їх структурування за ПМЗ-процесом в межах обробки від 2 до 7 хв.

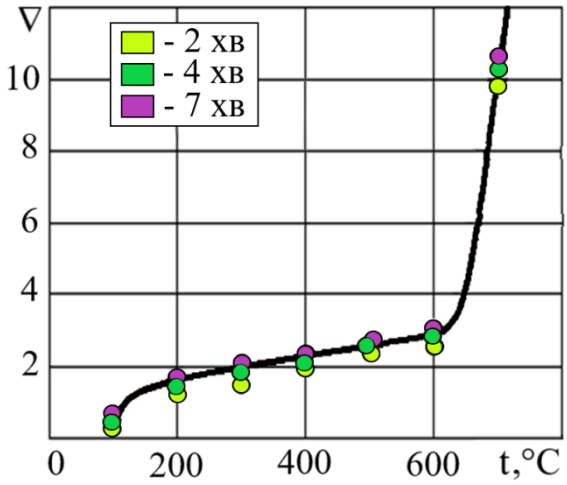


Рисунок 5.8 – Залежність відносної тривалості руйнування в киплячій воді (водостійкість) зразків, структурованих за ПМЗ-процесом, від температури їх попереднього нагрівання на повітрі (час витримки зразків на повітрі при кімнатній температурі до випробувань – 3...4 години)

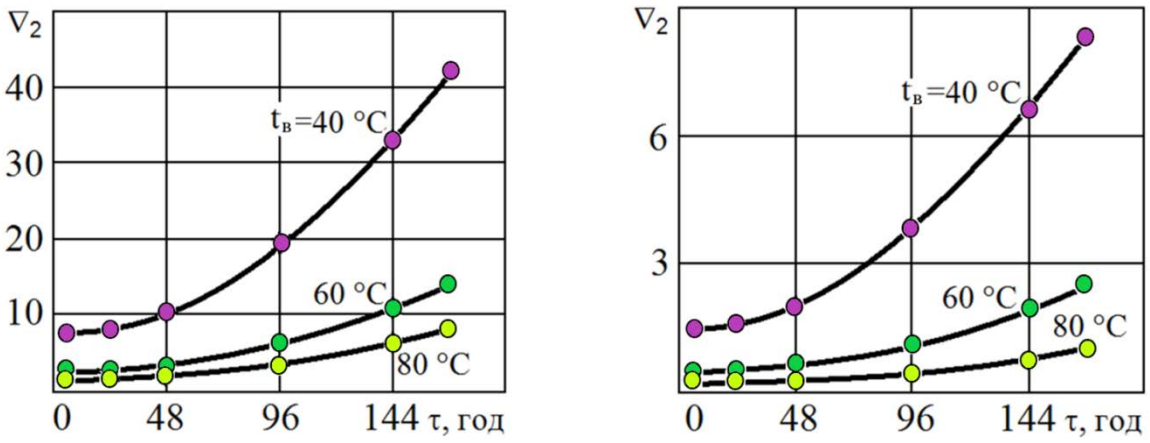
Дана закономірність відносної тривалості руйнування зразків від температури їх попереднього нагрівання в інтервалі від 600 до 700 °С пояснюється зміною структури СН в манжетах між піщинками. Цей висновок, зокрема, випливає з даних [341], згідно з якими трисилікат натрію після нагрівання до 600 °С і його подальшого охолодження при кімнатній температурі існує у вигляді $\beta Na_2O{\cdot}2SiO_2+SiO_2$, в складі якого присутні гідроксильні групи. Мабуть, саме ця обставина і є причиною швидкого розчинення $\beta Na_2O{\cdot}2SiO_2+SiO_2$ в воді (низької водостійкості ПРС).

При 600 °С трисилікат натрію повністю зневоднюється і втрачає здатність швидкого розчинення у воді. При температурі понад 665 °С трисилікат натрію перетворюється в висококремнеземістий силікат $3(\alpha Na_2O{\cdot}2SiO_2)+2SiO_2$, який

втрачає здатність до розчинення навіть в киплячій воді при атмосферному тиску або для його розчинення потрібен значний час, або підвищена температура і тиск над ним НВП.

Таким чином, гранично-припустимою температурою нагріву ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом, що забезпечує її руйнування в воді за технологічно прийнятний час слід вважати $t_р$ = 600 °С. Деяка розбіжність зазначених вище температур і залежності на рис. 5.8 пояснюється відмінністю умов проведення досліджень і величин M_{SIO2}, використаних в експериментах РС.

Залежність відносної тривалості руйнування структурованої суміші за ПМЗ-процесом у воді від тривалості витримки (зберігання) структурованої суміші з 0,5% і 2,5% РС на повітрі і температури води при 2 хв обробки суміші в паро-мікрохвильовому середовищі, представлена на рис. 5.9.



а б

Рисунок 5.9 – Залежність відносної тривалості руйнування в воді зразків структурованої суміші з 0,5% (а) і 2,5% (б) РС від тривалості її витримки на повітрі і температури води (тривалість ПМЗ-процесу – 2 хв)

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.9 випливає, що відносна тривалість руйнування зразків у воді підвищується зі зменшенням маси РС, яке пішло на плакування кварцового піску, з пониженням температури води, в якій руйнується зразок, і зі збільшенням тривалості витримки зразків на повітрі.

Відносний час розчинення (руйнування) суміші у воді при 40…80 °С впродовж 3...168 год з моменту закінчення структурування за ПМЗ-процесом (див. рис. 5.10,а) можна розрахувати за емпіричною формулою:

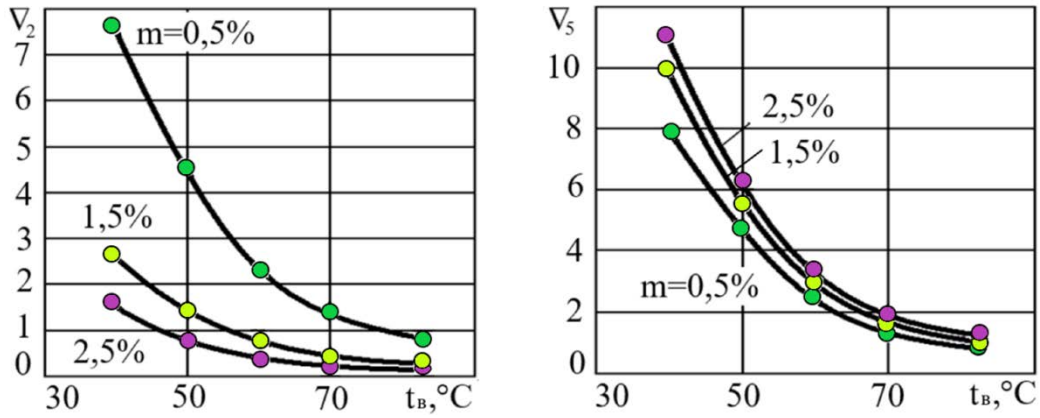
$$\nabla_2 = \frac{240 \cdot \tau^{0,002 \cdot \tau}}{(0,1 \cdot t_в)^3 \cdot m}, \qquad (5.6)$$

де τ – тривалість зберігання структурованої суміші на повітрі, год.;

$t_в$ – температура води при розчиненні, °С;

m – масова частка РС в суміші, яке пішло на плакування кварцового піску, %.

Залежності відносної тривалості руйнування структурованої суміші за ПМЗ-процесом в перебігу 2 хв і 5 хв у воді від температури води і кількості РС, яке пішло на плакування кварцового піску, обробки вихідної суміші в паро-мікрохвильовому середовищі, представлені на рис. 5.10.



а б

Рисунок 5.10 – Залежність відносної тривалості руйнування структурованої ПРС за ПМЗ-процесом в перебігу 2 хв (а) і 5 хв (б) у воді від її температури і вмісту РС

З аналізу ходу кривих на рис. 5.10 випливає, що зі збільшенням температури води тривалість руйнування (водостійкість) зразків зменшується, що відповідає відомим закономірностям впливу температури

розчинника на швидкість розчинення речовини. При цьому, якщо тривалість структурування суміші мікрохвильовим випромінюванням становить 2 хв, то тривалість розчинення суміші зростає зі зменшенням масового вмісту РС, яке пішло на плакування кварцового піску. Якщо тривалість структурування суміші становить 5 хв, то тривалість руйнування суміші скорочується зі зменшенням масового вмісту РС в суміші. Тобто, обробка за ПМЗ-процесом плакованого піску з 2,5% РС протягом 5 хв виявилася достатньою, щоб вміст залишкової гідратної води в СН зменшився до величини, порівнянної з величиною залишкової води в манжетах піску, плакованого 0,5% РС. З цього випливає, що при певній тривалості ПМЗ-процесу характер залежностей від тривалості ПМЗ-процесу і вмісту РС, яке пішло на плакування, повинно змінитися на протилежний.

Дані закономірності пояснюються одночасним впливом на величину ∇ двох чинників, один з яких – кількість РС, яке пішло на плакування кварцового піску, другий – тривалість ПМЗ-процесу в період його структурування. Для пояснення цього впливу розглянемо схеми манжет на рис. 5.11.

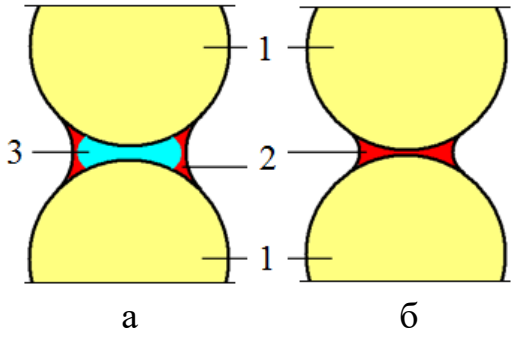


Рисунок 5.11 – Схеми манжет структурованої ПРС між піщинками, плакованими 2,5% (а) та 0,5% (б) РС: 1 – частинка піску; 2 – дегідратований СН; 3 – гідратований СН

Відмінною рисою схеми рис. 5.11,а від схеми на рис. 5.11,б є величина площі перерізу манжет, яка зростає з підвищенням вмісту РС в ПРС.

Природно, що при збільшенні маси РС, витраченого на плакування піску, площа поперечного перерізу манжет збільшується. Разом з цим, обмежений час впливу мікрохвильового випромінювання під час структурування плакованого піску призводить до того, що в манжетах з великою площею поперечного перерізу залишається частина гідратної води. Про це, зокрема, свідчить хід залежностей, представлених на рис. 5.12.

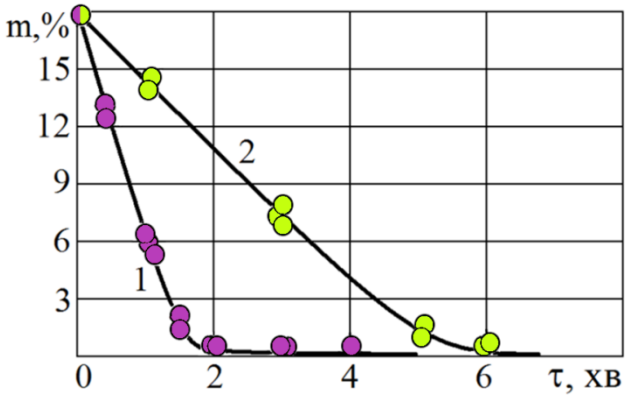
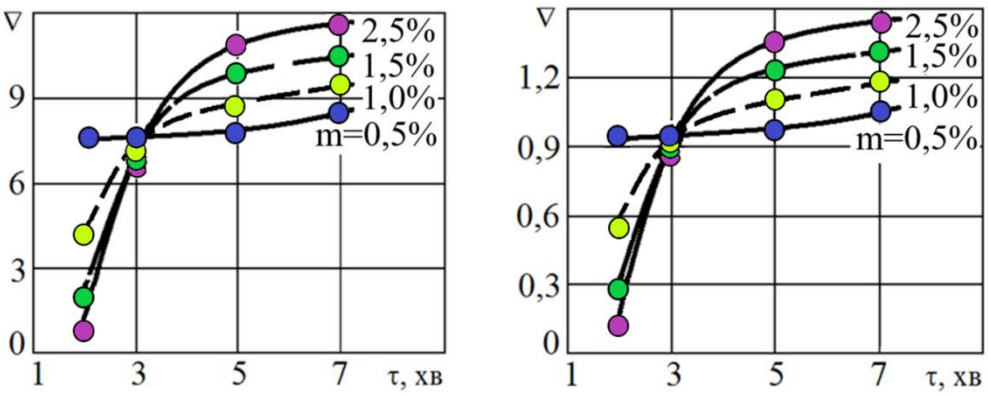


Рисунок 5.12 – Залежність вмісту гідратної води в манжетах ПРС від тривалості процесу ПМЗ (τ) при масі РС на плакування 0,5% (1) і 2,5% (2)

З аналізу залежностей на рис. 5.12 витікає, що за 2 хв мікрохвильової обробки в манжетах структурованого піску, плакованого 0,5% РС, вміст води знижується до ~0,4%. За той же час, в манжетах структурованого піску, плакованого 2,5% РС, вміст води знижується лише до ~11%. Можна припустити, що незалежно від вихідного розміру, манжети з великою кількістю гідратної води будуть розчинятися у воді з більшою швидкістю, ніж більш зневоднені манжети. Це припущення підтверджується залежностями відносного часу руйнування структурованої суміші у воді з температурою 40 °С і 80 °С від тривалості ПМЗ-процесу і кількості РС (m), яким плакували кварцовий пісок, представленими на рис. 5.13.



а б

Рисунок 5.13 – Залежність відносної тривалості руйнування структурованої суміші у воді від часу структурування вихідної суміші за ПМЗ-процесом і кількості РС в ПРС при температурі води $t_В$ = 40 °С (а) і $t_В$ = 80 °С (б)

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.13 витікає, що незалежно від температури води, в якій проходить руйнування зразків, характер відносної тривалості руйнування (водостійкості) від маси РС, яке пішло на плакування піску, змінюється через ~3,2 хв обробки за ПМЗ-процесом.

Тобто, отримані закономірності побічно підтверджують припущення про суттєвий вплив тривалості структурування і отже вмісту гідратної води в манжетах ПРС на їх водостійкість.

З викладеного вище випливає, що для швидкого і повного видалення таких стрижнів з виливків процес вибивання доцільно проводити в два етапи, які передбачають як ударно-вібраційний вплив на виливок, так і контакт гарячої води з стрижнем. Якщо жодна частина або ділянка стрижня під час формування та охолодження виливка у формі не відчули нагрів вище 600 °С, то видалення такого стрижня доцільно проводити виключно шляхом витримки виливка в гарячій воді (з температурою води не нижче 40 °С).

У разі, коли всі частини або переважна кількість частин стрижня в процесі формування виливка у формі нагріваються понад 600 °С, вибивання стрижня слід проводити виключно ударно-вібраційними методами, що витікає з аналізу

рис. 5.6 та рис. 5.8. Ймовірно, що така закономірність зміни роботи вибивання від температури попереднього нагрівання обумовлена частковим руйнуванням манжет, що викликано напруженим станом їх матеріалу (СН) при охолодженні до кімнатної температури. В свою чергу, такі напруження – це результат як різниці коефіцієнтів лінійного розширення СН і кварцового піску, так і поліморфного перетворення кварцового піску при 573 °С.

Таким чином, за результатами досліджень встановлено, що структура ПРС, висушеної мікрохвильовим випромінюванням з свіжоприготовленої суміші, зі збільшенням вмісту РС характеризується зміною вигляду дегідратованого СН в її міжзеренному просторі. При вмісті РС до 1,5%, СН в висушеної ПРС знаходиться в міжзеренному просторі у вигляді манжет з щільного СН. При вмісті від 1,5% до 2,5% РС знаходиться в манжетах, на поверхні яких з'являються елементи пінної структури СН. При вмісті РС більше 2,5%, СН в міжзеренному просторі знаходиться у вигляді піни, що відповідним чином може позначитися на рівні міцності структурованої ПРС, її обсипальності, газопроникності, вологопоглинанні і т.п.

5.3 Дослідження структур піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі, та характер їх руйнування при зовнішньому механічному впливі

В результаті структурування плакованого піску його сусідні зерна в місцях взаємного контакту з'єднані між собою містками затверділого РС, про що свідчить рис. 5.14, де представлені фрагменти зневоднених структур ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом [341].

Міцність ПРС, що структурована за ПМЗ-процесом, однакова з міцністю свіжоприготовленої суміші з більшою кількістю РС, але структурованою тепловим сушінням. Це пояснюється тим, що в структурованої ПРС за ПМЗ-процесом манжети хоча і менші в діаметрі (d), про що свідчать зображення на рис. 5.15, але більш дегідратовані та, відповідно, більш міцні.

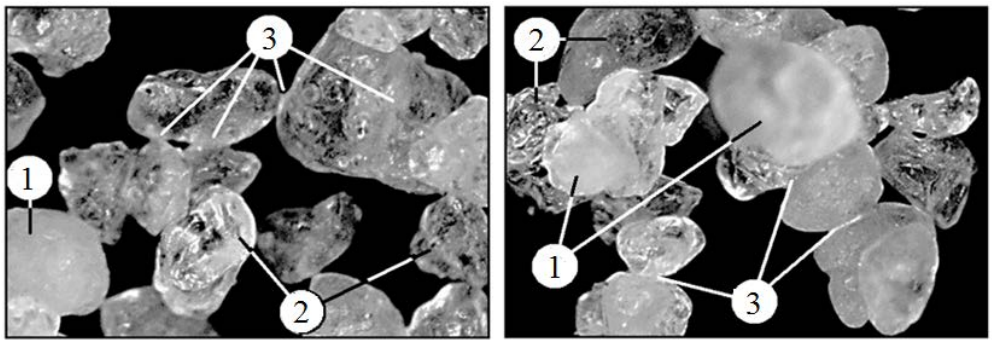
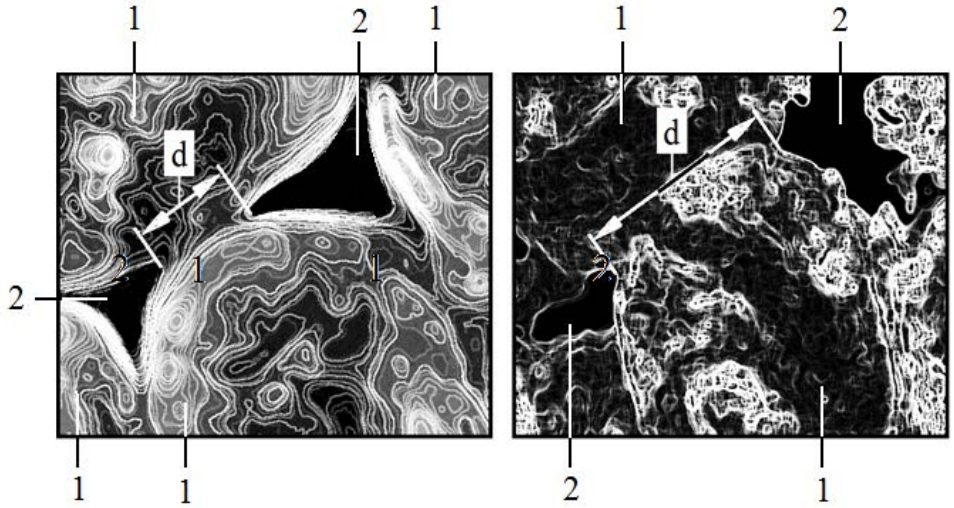


Рисунок 5.14 – Структурована за ПМЗ-процесом ПРС з плакованого піску: 1 – зерна кварцового піску із суцільним шаром РС; 2 – зерна кварцового піску без суцільного шару РС; 3 – міжзеренні манжети з РС



а б

Рисунок 5.15 – Вигляд манжет з РС діаметром d між піщинками на контурно-тіньовому зображенні піску плакованого 1,5% РС в суміші структурованої в паро-мікрохвильовому середовищі (а), піску в свіжоприготовленій суміші кварцового піску з 5% РС після теплового сушіння (б): 1 – піщинка; 2 – пора (капілярний канал)

В залежності від віддалення сусідніх піщинок і в'язкості вихідного рідкого сполучного матеріалу манжета може бути витягнутого типу, що схематично надано на рис. 5.16,а, або, скороченого типу (див. рис. 5.16,б), або короткого типу (див. рис. 5.16,в) [367].

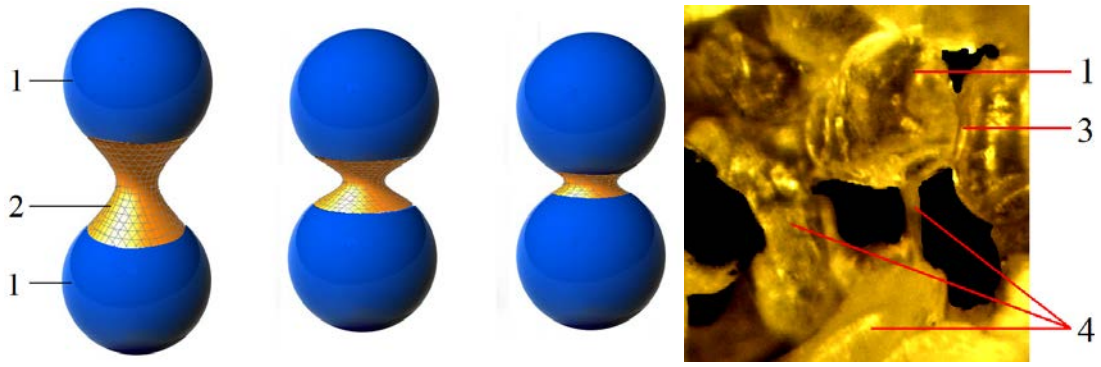


Рисунок 5.16 – Вигляд манжети витягнутого (а), скороченого (б) і короткого (в) типу із сполучного матеріалу між сусідніми піщинками в суміші, структура (×25) піщано-каніфольної суміші (г), структурованої за ПМЗ-процесом:
1 – піщинка; 2 – манжета з сполучного матеріалу;
3 – коротка манжета; 4 – витягнута манжета

Витягнутий тип манжет (див. рис. 5.16,а) характерний для нестикованих, досить віддалених одна від одної сусідніх піщинок у випадках, коли сполучний матеріал під час обробки за ПМЗ-процесом набуває рідкоплинності та високої в'язкості. До числа таких сполучних матеріалів, наприклад, відносяться смоли (див. рис. 5.16,г).

Скорочений тип манжети (див. рис. 5.16,б) характерний для сусідніх піщинок, не стикованих між собою, але які знаходяться на невеликій відстані одна від одної. Тобто, такий (скорочений) тип манжет можна спостерігати в сумішах, де сполучний матеріал під час структурування набуває відносно невисокої в'язкості. Скорочений тип манжети притаманний сумішам, в яких сполучним матеріалом є смоли, масла, РС з високою питомою щільністю і т.п.

Короткі манжети (див. рис. 5.16,в) формуються під час структурування суміші між піщинками навколо точок їх взаємного контакту і не залежно від в'язкості у рідкому стані використаного сполучного матеріалу.

Виходячи з того, що в ПРС, яка структурована за ПМЗ-процесом, всі спостережувані манжети короткого типу, припустили, що зміна міцності таких сумішей залежить виключно від зміни вмісту в них сполучного матеріалу, тобто

від площі контакту піщинки і манжети або площі поперечного перерізу манжети.

Якщо це так, то тип залежностей зміни міцності такої структурованої суміші від вмісту в ній сполучного матеріалу і, відповідно, площі контакту піщинки і манжети повинні бути ідентичними за змінами. У свою чергу з цієї ідентичності витікає, що руйнування сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, проходить переважно за адгезійним механізмом і при даному способі структурування практично весь сполучний матеріал знаходиться в манжетах. Це також означає, що таке адресне переміщення сполучного матеріалу в суміші (з плакованого шару – в манжети) має привести до того, що в порівнянні з відомими способами затвердіння, суміш, структурована за ПМЗ-процесом, повинна мати високу міцність при істотно меншому масовому вмісті сполучного матеріалу в ній. Якщо прийняте припущення не вірно, то руйнування структурованої суміші йде за когезійним механізмом. В цьому випадку, за інших рівних умов, для підвищення її міцності потрібно модифікувати РС або використовувати РС з іншим силікатним модулем.

Для вирішення цього завдання припустили, що у структурованій суміші:

- всі піщинки сферичні і одного розміру, що схематично надано на рис. 5.17,а;

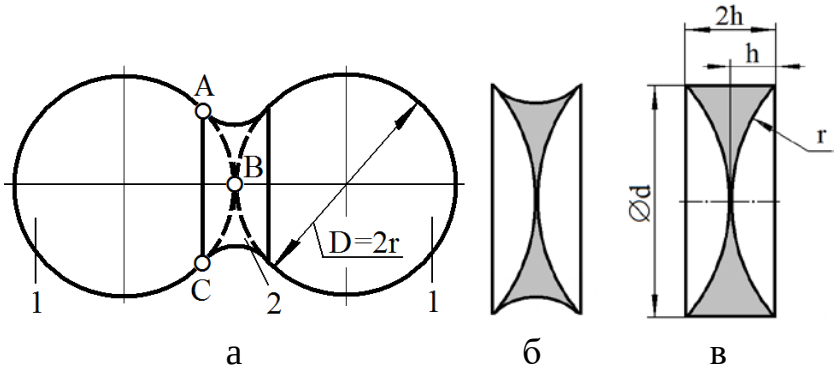


Рисунок 5.17 – Схема до розрахунку (а), теоретичний (б) і прийнятий в розрахунку (в) перетин короткої манжети: 1 – піщинка; 2 – манжета

- руйнування суміші за адгезійним механізмом проходить по поверхні контакту піщинки і манжети (див. лінію А-В-С на рис. 5.17,а), при руйнуванні за когезійним механізмом – по площині, що проходить через

точку контакту піщинок перпендикулярно геометричній вісі манжети;

- міцність структурованої суміші змінюється прямо пропорційно зміні площі поверхні контакту піщинки і манжети або площі поверхні поперечного перерізу манжети, що проходить крізь точку контакту піщинок;

- всі манжети одного розміру і форми.

З метою спрощення, розрахунок проводили для манжети не із тороподібною зовнішньою поверхнею (див. рис. 5.17,б), а з поверхнею циліндричної форми (див. рис. 5.17,в) [367].

Відповідно до рис. 5.17,в площу контакту піщинки сферичної форми діаметром D = 2r і манжети розраховували за формулою:

$$S_A = \pi \cdot d \cdot h\,, \tag{5.7}$$

що відповідає умові руйнування структурованої суміші за адгезійним механізмом.

При руйнуванні суміші за когезійним механізмом площу поперечного перерізу манжети розраховували за формулою:

$$S_K = 0{,}25 \cdot \pi \cdot d^2\,. \tag{5.8}$$

Оскільки об’єм циліндра діаметром d і висотою 2h:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{2}\,, \tag{5.9}$$

а об’єм двох кульових сегментів радіусом r, які утворюються від двох піщинок, що контактують між собою, дорівнює:

$$V_C = 2\pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right), \tag{5.10}$$

то об’єм манжети дорівнює:

$$V_M = V - V_C = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{2} - 2\pi \cdot h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) . \qquad (5.11)$$

Після перетворення (5.11) отримали вираз:

$$\frac{2\pi \cdot h^3}{3} - 2\pi \cdot h^2 \cdot r + \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{2} - V_M = 0 , \qquad (5.12)$$

$$d = 2\sqrt{Dh - h^2} . \qquad (5.13)$$

З точки зору маси сполучного матеріалу (РС), який пішов на плакування піску, з піщинками об'ємом V_P величину V_M розраховували за формулою:

$$V_M = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot k \cdot \varphi}{n \cdot \rho_m} = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \rho_p \cdot k \cdot \varphi}{6 \cdot n \cdot \rho_m} , \qquad (5.14)$$

$$k = \frac{m_{PC}}{m_p} , \varphi = f\ (\rho_{pc}),$$

де ρ_p, ρ_m – питома щільність піщинки (для кварцового піску ρ_p = 2,65 г/см^3) і СН (прийнято ρ_m = 2,44 г/см^3) відповідно;

φ – масова частка СН в РС, витраченого на плакування піску;

n – число манжет, що припадають на 1 частку піску;

m_{PC}, m_p – маса РС і піску в суміші при плакуванні відповідно, г.

Виходячи з того, що в реальних сумішах, які структуровані за ПМЗ-процесом, $m_{PC} << m_p$ можна з виразу (5.12) записати:

$$h = \sqrt[3]{\frac{1{,}5 \cdot V_M}{\pi}} . \qquad (5.15)$$

Виходячи з прийнятих припущень межу міцності структурованих сумішей від величини S_A і S_K розраховували за формулами:

$$\sigma_{CT} = f_A \cdot S_A \ , \tag{5.16}$$

$$\sigma_{CT} = f_K \cdot S_K \ , \tag{5.17}$$

де f_A, f_K – коефіцієнти, що враховують прийняті для розрахунку припущення.

Виходячи з того, що для структурованих сумішей між величинами межі міцності на розрив (σ_p) і на стиск (σ_{CT}) існує пряма пропорційна залежність [56, 368…370], а вимірювання міцності на стиск мають найменший інтервал відхилень від їх середніх арифметичних значень, то, прийнявши D=0,023 см, ρ_p=2,65 г/см^3, ρ_m=2,44 г/см^3, $\varphi=f(\rho_{pc})$, n=6, k=0,000...0,035, $f_A=4{,}7\cdot10^4$, $f_K=2{,}6\cdot10^4$ за формулами (5.16) і (5.17), розрахували і побудували залежності $\sigma_{CT}=f(m_{PC})$, які представлені на рис. 5.18.

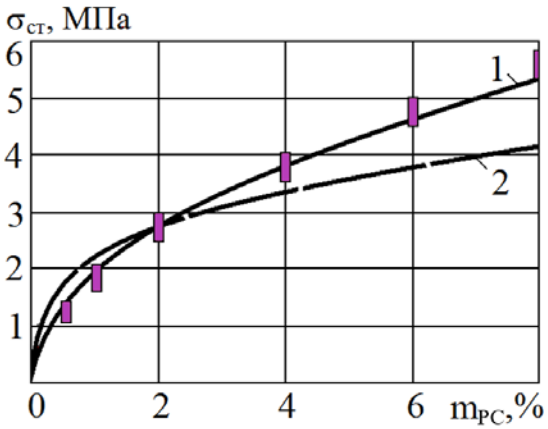
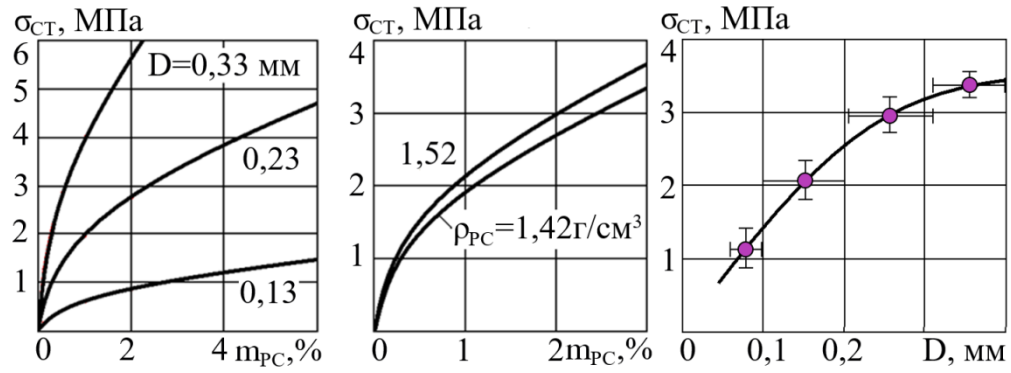


Рисунок 5.18 – Залежності $\sigma_{CT}=f(m_{PC})$, відповідні руйнуванню за адгезійним (1) і за когезійним (2) механізмом суміші, структурованої за ПМЗ-процесом (маркери – експериментальні дані)

Прийнявши ρ_p=2,65 г/см^3, ρ_m=2,44 г/см^3, $\varphi=f(\rho_{pc})$, n=6, k=0,00...0,06, $f_A=4{,}7\cdot10^4$ за формулою (5.16), розрахували і побудували залежності $\sigma_{CT}=f(m_{PC}, D)$, $\sigma_{CT}=f(m_{PC}, \rho_{pc})$ при D=0,023 см, які надані на рис. 5.19.

На рис. 5.19,в надано залежність $\sigma_{CT}=f(D)$, що побудована за експериментальними даними при m_{PC} = 2% РС та часом структурування паро-мікрохвильовим випромінюванням в продовж 3 хв.



а б в

Рисунок 5.19 – Залежність межі міцності на стиск ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом від маси РС (понад 100% піску), використаного на плакування кварцового піску, діаметра піщинок (а) і питомої щільності РС (б), що розраховані за формулою (5.16), та побудована за експериментальними даними (в)

Аналіз ходу залежностей на рис. 5.18 та рис. 5.19 показує, що міцність суміші структурованої за ПМЗ-процесом впродовж 3 хв зростає за статечною залежністю зі збільшенням вмісту РС в ПРС, розмірів частинок піску та питомої щільності використаного РС.

Для опису досліджуваного процесу відносно міцності сумішей використали π-теорему, кінцевий результат якої для сумішей піску і сполучного матеріалу можна представити у вигляді:

$$\sigma = f_H \cdot \varphi \cdot \frac{V_M}{V_p} \cdot \frac{1}{S_p} = f_H \cdot \varphi \cdot \frac{m_M}{\rho_M} \cdot \frac{\rho_p}{m_p} \cdot \frac{1}{S_p} = f_H \cdot \varphi \cdot k \cdot \frac{\rho_p}{\rho_M} \cdot \frac{1}{S_p}, \qquad (5.18)$$

де $f_н$ – поправочний коефіцієнт;

φ – масова частка в'язкої речовини в сполучному матеріалі;

m_M, m_p – маса сполучного матеріалу і піску в суміші відповідно;

ρ_p, ρ_M – питома щільність сполучного матеріалу (СН) і піску відповідно;

S_p – питома площа поверхні піску.

З аналізу формули (5.18) випливає, що міцність структурованої суміші

підвищується зі збільшенням вмісту в ній сполучної речовини, що пов'язано з питомою щільністю використаного РС, а також зі зниженням питомої поверхні піску, тобто, зі збільшенням діаметра його піщинок. З викладеного випливає, що висновки щодо впливу основних параметрів структурованої суміші за ПМЗ-процесом з аналізу формули (5.18) повністю узгоджуються з раніше отриманими теоретичними результатами.

Слід зазначити, що формули (5.16)...(5.18) можливо використовувати як для прогнозування міцності структурованих сумішей не лише на стиск, але і на розтягування та вигин, про що свідчать експериментальні значення міцності на стиск ($\sigma_{СТ}$), розтягування ($\sigma_{Р}$) і вигин ($\sigma_{ВИГ}$), а також їх співвідношень для ПРС, структурованих способом ПМЗ, наведені в табл. 5.2 [371].

Таблиця 5.2

Значення меж міцності на стиск, розтягнення і вигин, а також їх співвідношень для ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом

п/п	Вміст РС в кварцовому піску, % (за масою)	Тривалість ПМЗ, хв	Маса структурованої суміші, г	$\sigma_{СТ}$	$\sigma_{Р}$	$\sigma_{ВИГ}$	$\frac{\sigma_{СТ}}{\sigma_{Р}}$	$\frac{\sigma_{СТ}}{\sigma_{ВИГ}}$	Відносна похибка розрахунку межі міцності, %	
				МПа					$\Delta_{Р}$	$\Delta_{ВИГ}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,5	2	400	0,82	0,15	0,22	5,51	3,77	1,50	-1,28
2	0,5	3	400	1,21	0,21	0,33	5,74	3,62	-3,82	0,36
3	0,5	4	500	1,47	0,27	0,41	5,44	3,55	1,90	2,57
4	0,5	4	550	1,52	0,28	0,41	5,49	3,72	2,19	-0,74
5	1,0	2	400	1,50	0,27	0,39	5,55	3,81	-0,10	-4,52
6	1,0	4	550	3,02	0,56	0,81	5,37	3,71	2,83	-1,32
7	1,5	2	500	2,10	0,38	0,58	5,59	3,65	0,43	1,61
8	1,5	3	500	3,72	0,68	1,00	5,5	3,73	1,43	-1,09
9	1,5	4	500	3,99	0,73	1,08	5,48	3,69	1,52	-0,39
10	2,0	2	300	2,65	0,48	0,74	5,48	3,58	0,53	2,69
11	2,0	3	600	4,33	0,78	1,17	5,58	3,69	-0,02	-0,57

продовження табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	2,0	4	400	4,71	0,84	1,28	5,61	3,69	-1,03	0,01
13	2,5	2	300	2,90	0,56	0,78	5,22	3,72	6,69	-1,03
14	2,5	3	400	4,61	0,82	1,25	5,64	3,70	-1,30	-0,22
15	2,5	4	500	5,12	0,90	1,40	5,68	3,67	-2,50	0,62
16	2,5	4	500	4,97	0,90	1,35	5,52	3,69	0,50	-0,04
17	3,0	2	500	3,15	0,57	0,84	5,53	3,77	0,43	-1,90
18	3,0	3	900	4,85	0,87	1,32	5,55	3,68	-0,45	0,16
19	3,0	4	700	5,22	0,93	1,47	5,61	3,55	-1,13	3,50
20	4,0	2	700	3,95	0,72	1,12	5,46	3,52	1,15	4,16
21	4,0	3	700	5,03	0,94	1,37	5,33	3,66	3,58	0,23
22	4,0	4	500	5,55	0,96	1,50	5,77	3,70	-4,17	-0,54
23	6,0	2	700	4,40	0,81	1,18	5,43	3,74	2,12	-1,33
24	6,0	3	400	5,17	0,89	1,40	5,81	3,69	-4,67	-0,35
25	6,0	4	500	5,81	1,00	1,54	5,79	3,78	-4,68	-2,52

Відповідно до даних табл. 5.2, середнє значення співвідношень $\sigma_{СТ}/\sigma_{Р}$=5,55, $\sigma_{СТ}/\sigma_{ВИГ}$=3,68, а величина відносної помилки розрахунків $\sigma_{Р}$ і $\sigma_{ВИГ}$ з використанням коефіцієнтів $f_A=4{,}7\cdot10^4$, $f_K=2{,}6\cdot10^4$ за формулами (5.16) і (5.17), відповідно, не перевищує 7% і 5%. Це означає, що визначаючи, наприклад, величину межі міцності на стиск ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом, можна з високим ступенем достовірності для інженерних розрахунків розраховувати її міцність при розтягуванні і статичному вигині.

Виходячи з величин похибок між показниками міцності сумішей, для визначення характеру руйнування сумішей можливо використовувати виключно величину межі їх міцності на стиск.

Залежності межі міцності на стиск ПРС, структурованих за способом ПМЗ, від тривалості мікрохвильової обробки і від масового вмісту РС, використаного для плакування кварцового піску, представлені на рис. 5.20.

Криві 4 і 5 (див. рис. 5.20) побудовані за результатами теоретичних обчислень, викладених в роботі [367] в безвідносній системі координат, і носять чисто якісний характер зміни межі міцності суміші від вмісту в ній сполучного матеріалу і характеру руйнування сумішей.

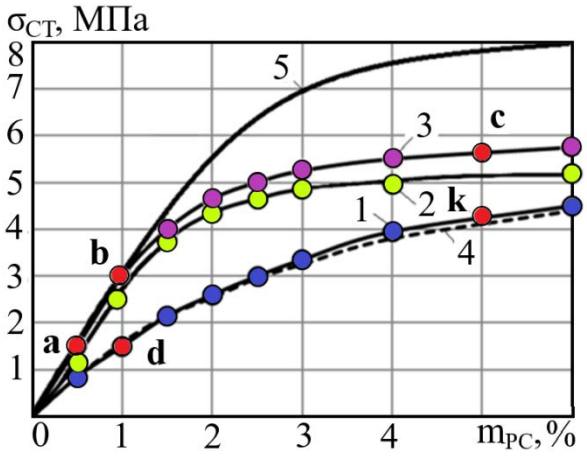


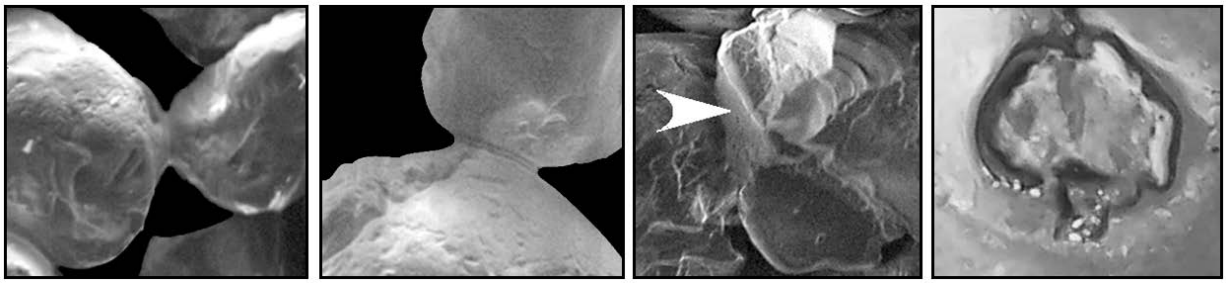
Рисунок 5.20 – Залежність межі міцності на стиск ПРС, що структурована за ПМЗ-процесом від масового вмісту РС, використаного для плакування кварцового піску, і від часу структурування: 1 – 2 хв; 2 – 3 хв; 3 – 4 хв; 4 – межа міцності на стиск при адгезійному характері руйнування суміші; 5 – межа міцності на стиск при когезійному характері руйнування суміші

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.20 випливає, що при збільшенні вмісту РС від 0 до 6%, а також збільшення тривалості мікрохвильової обробки межа міцності на стиск суміші зростає по залежності, близькою до статечної. При цьому не залежно від вмісту РС, яке пішло на плакування кварцового піску, обробка суміші за ПМЗ-процесом протягом 2-х хв призводить до руйнування таких сумішей за адгезійним механізмом. У той же час обробка суміші за ПМЗ-процесом протягом 3-х і 4-х хв з вмістом РС до 1,5% призводить до руйнування таких сумішей за когезійним механізмом, а в усіх інших випадках має місце змішаний (адгезійно-когезійний) характер руйнування структурованих сумішей (див. Додаток М, [439]).

Вірогідною причиною такої закономірності є вміст хімічно пов'язаної води в структурі СН, а високі показники міцності ПРС структурованих за способом ПМЗ, можливо, забезпечує щільна і більш досконала структура манжет СН, що випливає з аналізу зображень на рис. 5.15 та рис. 5.21.

Для визначення типу руйнування ПРС в якості еталонів використовували растрові зображення місць руйнування структурованих

сумішей, які представлені на рис. 5.22 та рис. 5.23.



а б в г

Рисунок 5.21 – Манжети СН (×100) між сфероподібними (а, б) і пласкими (в) (манжета вказана білою стрілкою) поверхнями зерен піску в структурованій суміші (×100), залишок зруйнованої манжети на поверхні піщинки (г)

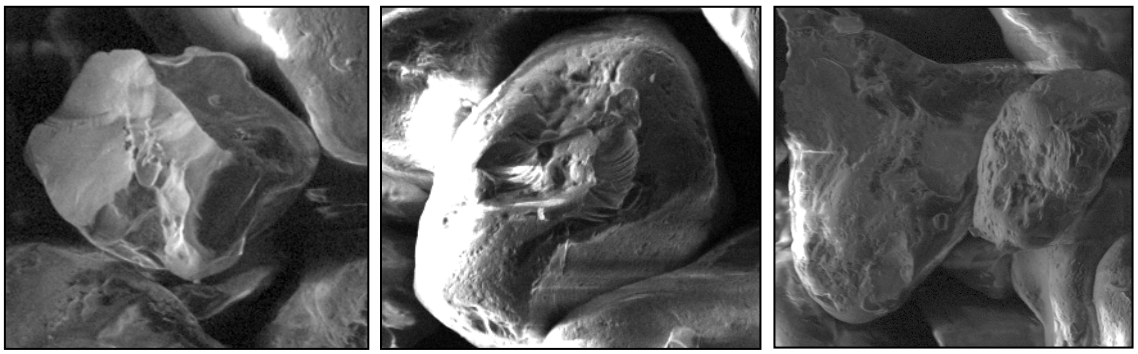


Рисунок 5.22 – Вигляд манжет з когезійним характером руйнування (×100)

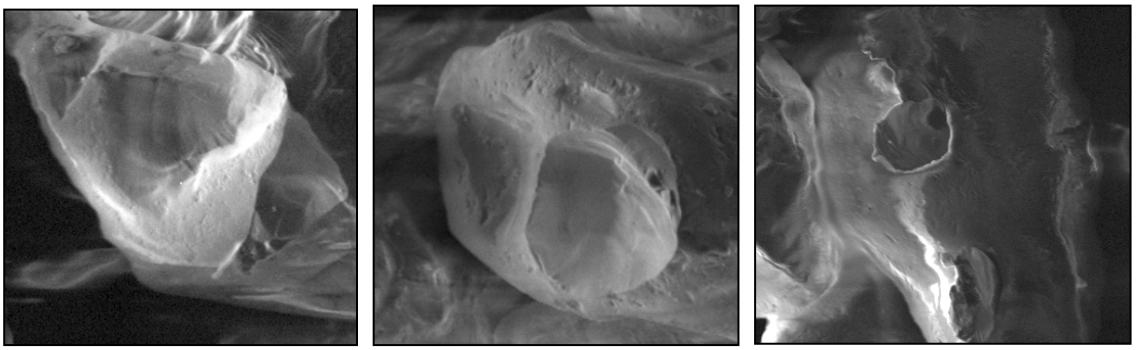
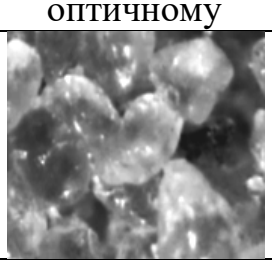
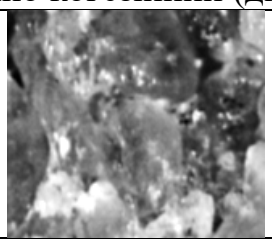
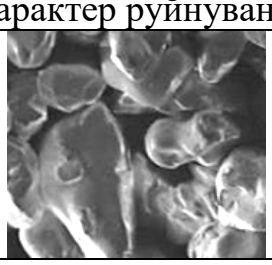
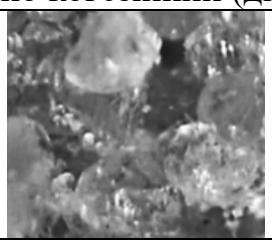
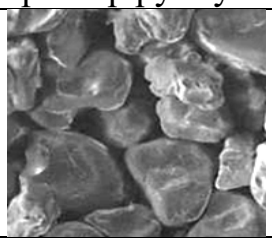
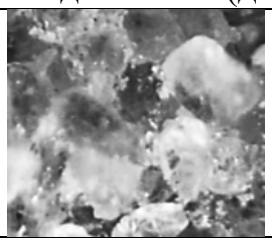
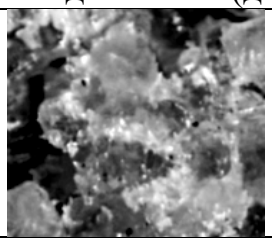


Рисунок 5.23 – Вигляд манжет з адгезійним характером руйнування (×100)

Вигляд поверхонь зламу на растровому електронному та оптичному мікроскопах зразків з структурованих ПРС з різним вмістом РС та часом структурування за ПМЗ-процесом, відповідно до рис. 5.20 надано в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Вигляд поверхонь зламу зразків, структурованих за ПМЗ-процесом, на растровому електронному та оптичному мікроскопах

Вид поверхонь зламу зразків на мікроскопі		Вміст РС, %	Час, хв
растровому електронному	оптичному		
		0,5	8
Характер руйнування переважно когезійний (див. точку **a** на рис. 5.20)			
		1	4
Характер руйнування переважно когезійний (див. точку **b** на рис. 5.20)			
		5	4
Характер руйнування когезійно-адгезійний (див. точку **c** на рис. 5.20)			
		1	2
Характер руйнування переважно адгезійний (див. точку **d** на рис. 5.20)			
		5	2
Характер руйнування переважно адгезійний (див. точку **k** на рис. 5.20)			

З аналізу табл. 5.3 випливає, що дані про характер руйнування зразків, отримані за результатами теоретичних досліджень роботи [371] збігаються з результатами візуальних оцінок, що підтверджує залежність характеру

руйнування від масового вмісту РС і часу обробки зразків мікрохвильовим випромінюванням за способом ПМЗ.

Слід зазначити, що затвердіння РС з вмістом 55...65% води (за масою) мікрохвильовим впливом супроводжується його спінюванням і появі пінних структур дегідратованого СН [372, 373], що хоч і дозволяє отримувати ЛФС з високими значеннями показників міцності, але вимагає ручного або автоматизованого ущільнення суміші і характеризується низьким рівнем газопроникності структурованих сумішей. В разі структурування ПРС за ПМЗ-процесом ущільнення суміші проводять на вібраційному столі протягом 10...60 с, забезпечуючи при цьому високу газопроникність структурованої суміші і межу міцності на стиск 1,0...1,5 МПа при масовому вмісті в суміші 0,5% РС і 4,2...5,6 МПа (див. рис. 5.22) – при 5% РС.

Таким чином, у ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом:

- міцність залежить від часу структурування за ПМЗ-процесом та маси РС, яке було витрачено на плакування кварцового піску;

- практично весь сполучний матеріал або його більшість в структурованій суміші знаходиться в міжзеренних манжетах;

- підвищення міцності можливо досягти шляхом збільшення вмісту в суміші СН, підвищення уявної щільності використаного РС, а також середнього діаметра зерен піску;

- зі збільшенням масового вмісту РС від 0,5 до 6% (за масою) для плакування кварцового піску, а також зі збільшенням тривалості обробки суміші способом ПМЗ, межа міцності суміші на стиск зростає по залежності близької до статечної. При цьому, характер руйнування структурованої суміші не залежить від вмісту РС, яке пішло на плакування, але залежить від тривалості процесу ПМЗ, зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного до змішаного або від адгезійного до змішаного і когезійного.

5.4 Оптимізація складу піщано-рідкоскляної суміші, структурованої в паро-мікрохвильовому середовищі

Для виробництва якісних литих деталей в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва виливків, відповідно до [38, 39, 67, 84, 85, 91, 105, 341, 374…377], придатність будь-якої структурованої ФСС оцінюють за наступними показниками: межа міцності на стиск, відносна величина стріли прогину до руйнування, обсипальність, газопроникність, уявна щільність, робота вибивання. Граничнодопустимі величини цих показників наведені в табл. 5.4 [378].

Таблиця 5.4

Граничнодопустимі величини показників властивостей структурованої ФСС через 3 години після завершення її структурування

Показник	Величина
Межа міцності на стиск, МПа	≥ 2,0
Відносна величина стріли прогину до руйнування, %	≥ 0,25
Обсипальність, %	≤ 0,3
Газопроникність, од	≥ 150
Уявна щільність, кг/м^3	≥ 1600
Робота вибивання, Дж	≤ 100

Тобто, для виготовлення сучасних ФСС необхідно оптимізувати склад ПРС, який би після структурування в паро-мікрохвильовому середовищі (за ПМЗ-процесом), відповідав вимогам, що наведені у табл. 5.4.

Оптимізацію зернового складу ПРС здійснювали для трьох видів конгломератів кварцового піску з РС, а саме [378]:

А – конгломерати з 2,5% РС, що пройшли через сито з осередком 0,63 мм, але не пройшли сито з осередком 0,315 мм;

В – конгломерати з 0,5% РС, що пройшли через сито з осередком 0,315 мм;

С – конгломерати з 2,5% РС, що пройшли через сито з осередком 0,315 мм, що випливає з даних табл. 2.2.

Відповідно до прийнятої методики, симплексні решітки будували для межі міцності на стиск ($\sigma_{СТ}$), обсипальності (Ос), роботи вибивання при 20°С ($А_{20}$), газопроникності (К), уявної щільності (ρ), відносної стріли прогину зразка балочного типу (Δ_ε). Результати реалізованої план-матриці досліджень надані в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Реалізована план-матриця експерименту

Код суміші	Відносна маса конгломератів в суміші			Параметри структурованої ПРС					
				Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
	А	В	С	$\sigma_{СТ}$, МПа	Ос, %	К, од	$А_{20}$, Дж	ρ, кг/м^3	Δ_ε, %
X_1	1			0,96	0,84	405	53	1224	0,13
X_2		1		0,74	1,22	152	6,1	1768	0,07
X_3			1	2,67	0,55	282	280	1710	0,275
X_4	0,5	0,5		1,63	0,57	308	98	1392	0,195
X_5	0,5		0,5	1,94	0,62	238	104	1675	0,195
X_6		0,5	0,5	2,95	0,26	151	92	1727	0,32
X_7	0,33	0,33	0,33	1,29	0,95	364	89	1465	0,16
X_8	0,25	0,50	0,25	1,37	0,88	328	79	1490	0,15
X_9	0,25	0,25	0,50	1,7	0,81	325	121	1555	0,19
X_{10}	0,50	0,25	0,25	1,15	0,94	380	81	1407	0,16

Коефіцієнти кореляції до формули (див. розділ 2, п.п. 2.5.4, формула (2.1)) відповідних параметрів структурованої ПРС надано в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Коефіцієнти кореляції

Параметр	Y_i	Коефіцієнти кореляції						
		b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
$\sigma_{СТ}$	Y_1	0,96	0,74	2,67	3,12	0,50	4,98	-30,3
Ос	Y_2	0,84	1,22	0,55	-1,84	-0,30	-2,50	16,08
К	Y_3	405	152	282	118	-442	-264	3981
А	Y_4	53,0	6,1	280,0	273,8	-246,0	-204,2	-119,7
ρ_2	Y_5	1224	1768	1710	-416	832	-48	-3867
Δ_ε	Y_6	0,13	0,07	0,275	0,38	-0,03	0,59	-2,775

Використовуючи дані табл. 5.6 розрахували та побудували відповідні симплексні трикутники з ізолініями в них.

Ізолінії на симплексному трикутнику (див. рис. 5.24,а...5.29,а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (див. рис. 5.24,б...5.29,б) відповідно до табл. 5.4 досліджуваних параметрів структурованої ПРС представлені на рис. 5.24...5.29.

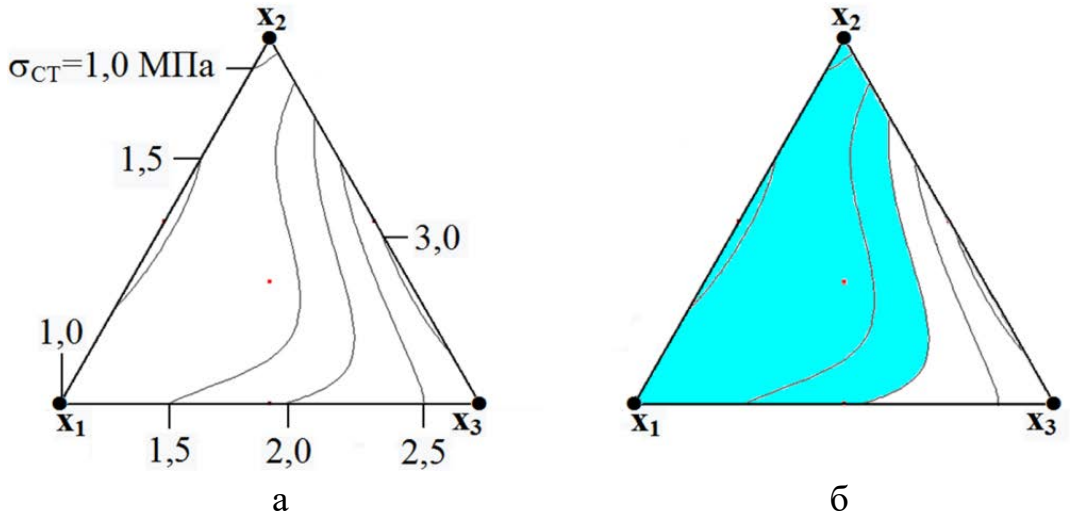


Рисунок 5.24 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (б) межі міцності на стиск структурованої ПРС

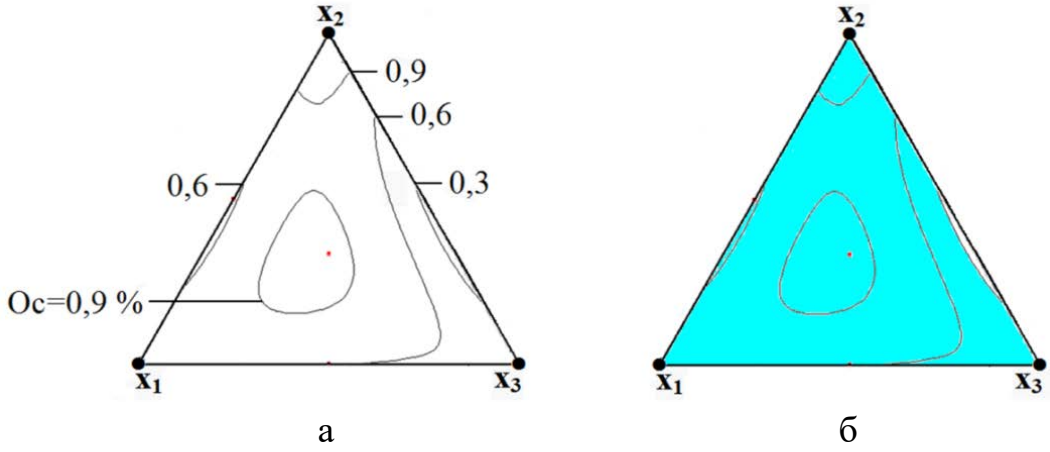
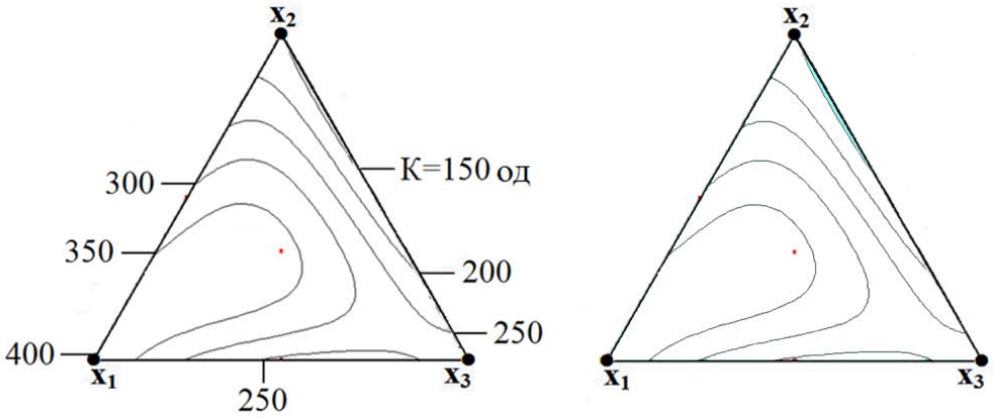
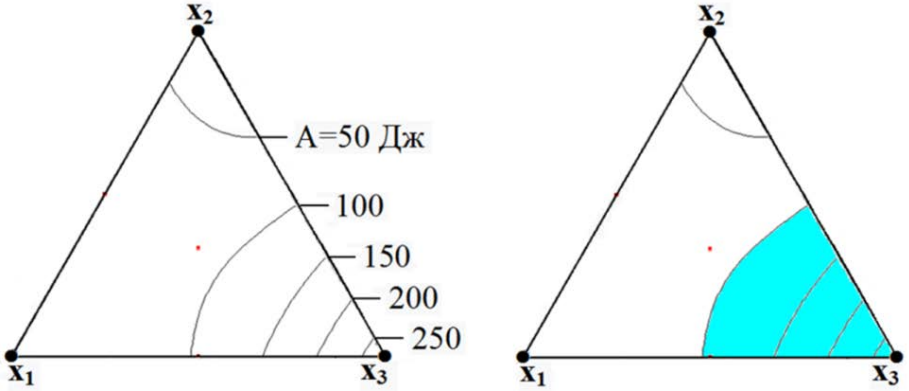


Рисунок 5.25 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (б) обсипальності структурованої ПРС



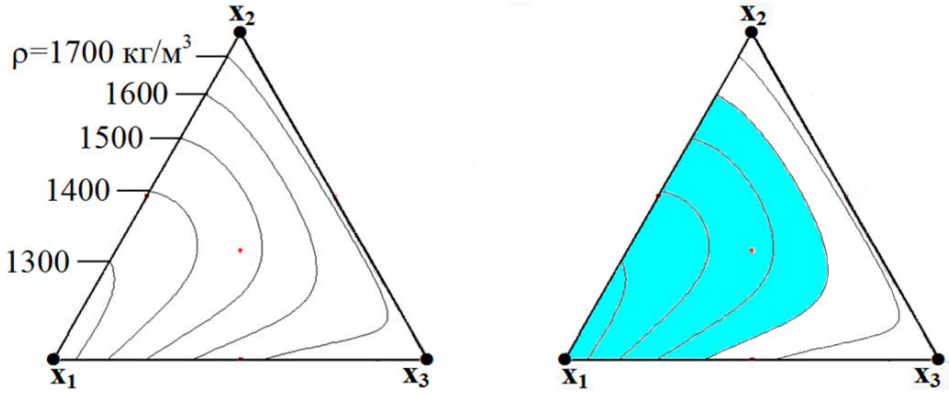
а б

Рисунок 5.26 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (б) газопроникності структурованої ПРС



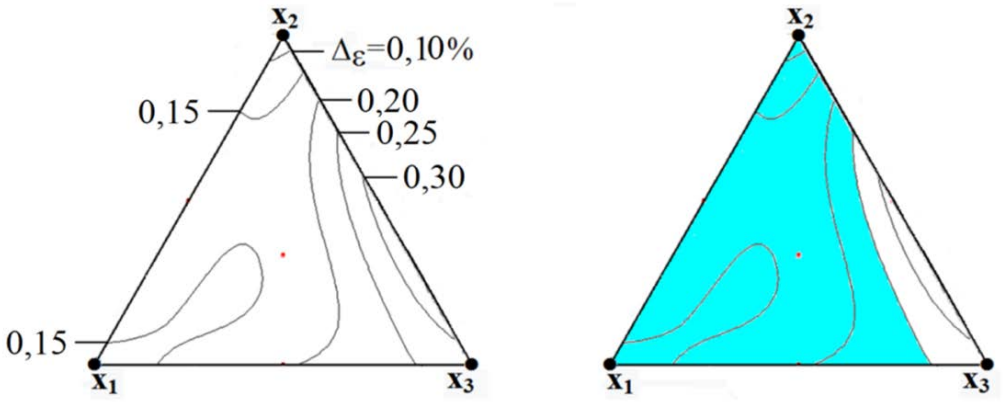
а б

Рисунок 5.27 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (б) роботи вибивання при 20 °С структурованої ПРС



а б

Рисунок 5.28 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (б) уявної щільності структурованої ПРС



а б

Рисунок 5.29 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і зафарбовані поля неприпустимих значень (б) відносної стріли прогину зразка балочного типу структурованої ПРС

Результат накладання симплексних решіток для виявлення оптимальної області (крапка f на зображенні) та зображення ключа в концентраційній сітці симплекс-решітки представлений на рис. 5.30.

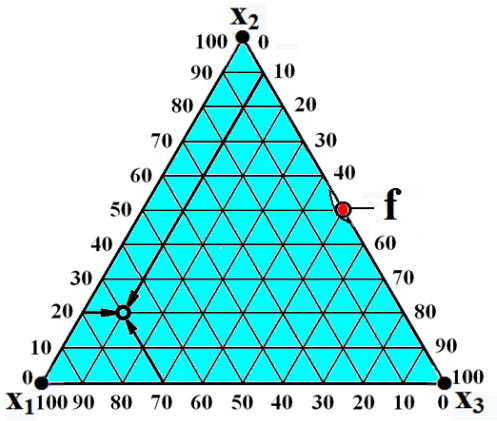


Рисунок 5.30 – Оптимальна область (точка f) в концентраційній сітці симплекс-решітки і її ключ

Згідно із зображенням на рис. 5.30 оптимальним складом ПРС, що структурована за ПМЗ-процесом, є суміш кварцового піску, частина якого пройшли крізь сито з осередком 0,315 мм та мають вміст РС (M_{SiO2}=2,8…3,0, ρ_2=1,42…1,44 г/см^3) у кількості 1,5% (за масою, понад 100% піску).

Виходячи з того, що суміші з постійною величиною РС, використаного для плакування кварцового піску, можна готувати з пісків з різним вмістом РС – встановили залежності межі міцності на стиск від співвідношення маси РС в наважках однакової маси плакованого кварцового піску при загальній масі РС (m_{PC}) 0,5, 1,5 і 2,5%, що наведено в табл. 5.7 і представлено на рис. 5.31 [378].

Таблиця 5.7

Маса наважки та маса РС (%, за масою), яке було використано для плакування наважок кварцового піску у зразках

Позначення наважки	Маса наважки, г	Маса РС (%, за масою), яке було використано для плакування наважок кварцового піску у зразках:				
		1	2	3	4	5
Загальна маса РС в суміші – 0,5%						
PC_1	200	0,000	0,083	0,167	0,333	0,500
PC_2	200	1,000	0,917	0,833	0,667	0,500
$\Delta_{PC}=PC_1/PC_2$		0	0,1	0,2	0,5	1,0
Загальна маса РС в суміші – 1,5%						
PC_1	200	0,00	0,25	0,50	1,00	1,5
PC_2	200	3,00	2,75	2,50	2,00	1,5
$\Delta_{PC}=PC_1/PC_2$		0	0,1	0,2	0,5	1,0
Загальна маса РС в суміші – 2,5%						
PC_1	200	0,000	0,417	0,833	1,667	2,500
PC_2	200	5,000	4,583	4,167	3,333	2,500
$\Delta_{PC}=PC_1/PC_2$		0	0,1	0,2	0,5	1,0

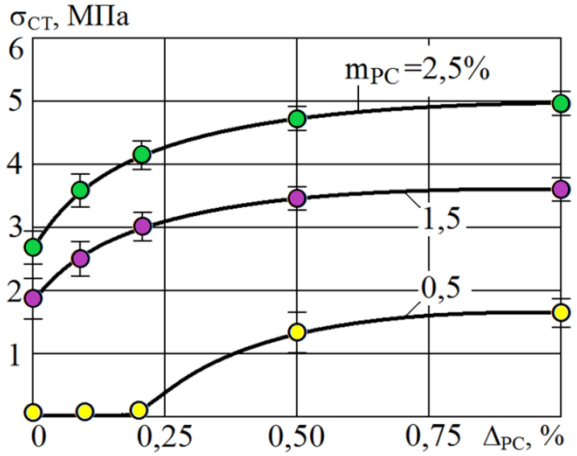


Рисунок 5.31 – Залежність межі міцності на стиск від співвідношення маси РС в наважках однакової маси плакованого кварцового піску при загальній масі РС (m_{PC}) 0,5%, 1,5% і 2,5%

В результаті проведених досліджень встановлено, що міцність структурованої суміші на стиск (див. рис. 5.24) та робота вибивання (див. рис. 5.27) зростає зі зменшенням розмірів використаних в її складі піщано-рідкоскляних конгломератів і зі збільшенням маси в них РС. Ця закономірність пояснюється тим, що з підвищенням кількості РС зростає площа поперечного перерізу манжет з СН між піщинками. З іншого боку, обмежений час паро-мікрохвильового впливу на великі конгломерати не забезпечує істотного збільшення в структурованій суміші числа міжзеренних контактів. Як результат зі збільшенням розмірів вихідних конгломератів в суміші зменшується не тільки її міцність, але уявна щільність і обсипальність, про що свідчить хід ізоліній в симплексному трикутнику на рис. 5.28 і рис. 5.25 відповідно.

Проте зі збільшенням розмірів конгломератів, використаних в складі сумішей, і зі збільшенням маси в них РС зростає газопроникність, про що свідчить хід ізоліній на рис. 5.26. Це пов'язано зі зменшенням щільності суміші та збільшенням простору між конгломератами – розмірів перетинів капілярних каналів. В свою чергу з цими ж показниками зменшується стріла прогину (див. рис. 5.29), так як структурована суміш стає менш міцною і більш крихкою.

Таким чином, оптимальний склад ПРС, що структурована впродовж 5 хв за процесом ПМЗ в печі з потужністю магнетрону 900 Вт (див. Додаток І), є суха сипуча суміш кварцового піску з натрієвим РС, яка пройшла крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого РС (M_{SiO2}=2,8…3,0, ρ_2=1,42….1,44 г/см^3) у кількості 1,5% (за масою, понад 100% піску).

5.5 Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей

Багатофакторність, нерівнозначність і різновекторність впливу умов виробництва на якість виливків – характерні риси будь-якої ливарної технології. Ці особливості призводять до постійного «дрейфу» в часі оптимуму поєднання властивостей ЛФС, співвідношень значущості факторів і технологічної

вагомості параметрів в процесі формування якості виливків і стабільності технології їх виробництва. З цього, успішне і швидке рішення ливарних завдань пов'язано не тільки зі знанням значень властивостей і параметрів, але і їх взаємного впливу, зі знанням закономірностей їх комплексної зміни при виникненні технологічних збурень в процесі виробництва лиття [379].

Дослідженням властивостей ЛФС присвячена велика кількість робіт [71...74, 76, 77 та ін.], а методики визначення та розрахунку ряду цих властивостей викладені у відповідній нормативній документації (стандартах). До числа найбільш важливих параметрів сумішей для ЛФС відносять: обсипальність, крихкість, газопроникність, міцність і вибиваємість – роботу, яку витрачають на вибивання виливків з форм і стрижнів з виливків.

Для вирішення цієї задачі використали π-теорему. Тому, до опису показника ***обсипальності***, в число змінних передбачуваної залежності при використанні методу аналізу розмірностей включили наступні показники суміші: К – газопроникність (характеристика структури затверділої суміші), $м^4/(кг·с)$; $\sigma_{СТ}$ – межа міцності на стиск (характеристика природи матеріалів, складу і структури затверділої суміші), $кг/м^2$; ρ – уявна щільність структурованої суміші (характеристика складу і структури затверділої суміші), $кг/м^3$; l – довжина зразка (характеристика геометричних розмірів зразка суміші), м.

В результаті розрахунку отримали наступну залежність [380]:

$$Oc = f_0 \cdot \rho^3 \cdot l \cdot \frac{K}{\sigma_{CT}}, \qquad (5.19)$$

де f_0 – безрозмірний поправочний коефіцієнт.

Крихкість структурованої суміші оцінювали за величиною стріли прогину (ε) зразка балочного типу, встановленого на опори на певній відстані одна від одної (l), в момент його руйнування під дією навантаження (Р), яке додається до зразка за триточковою схемою, що схематично надано на рис. 5.32 [381].

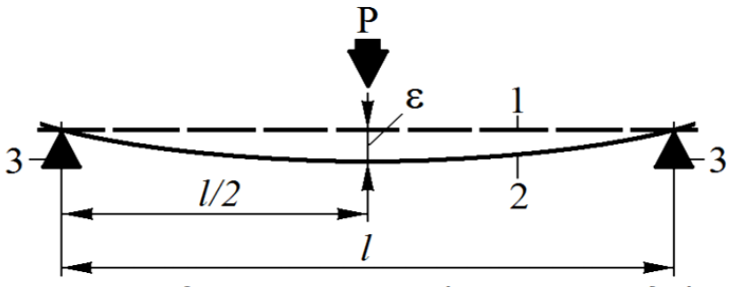


Рисунок 5.32 – Схема прогину балки: 1 – вид балки (зразка) до дослідження; 2 – вид балки в момент руйнування; 3 – опора зразка

В умовах такої схеми навантаження, матеріал балки одночасно відчуває як стискаючі, так і розтягуючі напруження, що випливає зі схем балки до і після її вигину (деформації), представлених на рис. 5.33.

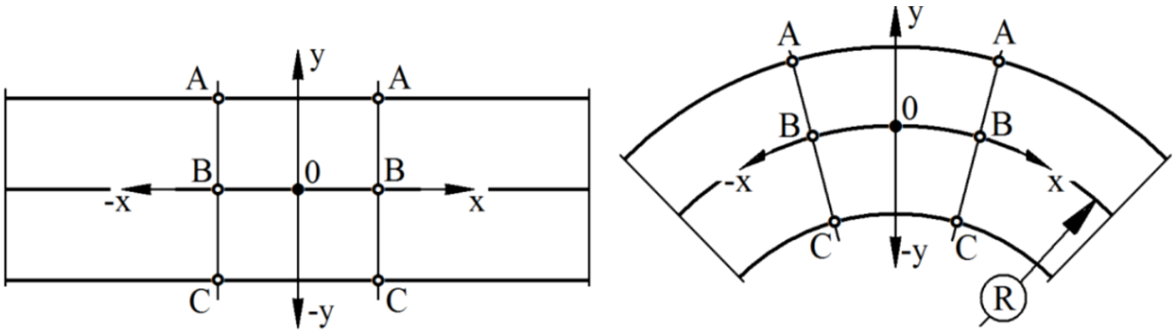


Рисунок 5.33 – Схема балки до (а) і після (б) вигину

При цій схемі навантаження деформація ε в кожній точці балки буде пропорційна координаті «у», яку в даному випадку відраховують від нейтральної (центральної) лінії (вісі х-х).

Це означає, що в результаті деформації відстань між точками А-А збільшується, між точками С-С – зменшується, а відстань між точками В-В на нейтральній лінії залишається незмінною. Тобто, зі схеми на рис. 5.33,б випливає, що:

$$\varepsilon = \frac{y}{R}, \tag{5.20}$$

де R – радіус кривизни бруса після його викривлення.

Відповідно, величина нормального напруження (σ) в даному перетині балки також залежить від координати «у» і визначається із закону Гука:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \tag{5.21}$$

де Е − модуль пружності матеріалу балки.

Для відносно малих прогинів балки, що характерно для структурованих сумішей, прийнявши уздовж вісі 0-х постійними величини модуля пружності і момент інерції (I), форму балки описують лінійним диференціальним рівнянням 4-го порядку (диференціальним рівнянням Ейлера-Бернуллі):

$$E \cdot l \cdot \frac{\partial^4 x}{\partial x^4} = P. \tag{5.22}$$

Будь-який варіант рішення рівняння Ейлера-Бернуллі (5.22) призводить до залежності стріли прогину лише від відстані між опорами балки (l), а також параметрами, що входять в формулу (5.22). Тобто формула (5.22), як і формула (5.20) не враховує особливості будови структурованих сумішей, де розміри і об'єм пор можуть бути порівняні з розмірами і об'ємом балки, рівня напруженого стану структурованої суміші і т.п.

У зв'язку з цим, як і в описаних вище випадках, для визначення закономірностей впливу основних параметрів структурованої суміші на граничнодопустиму стрілу прогину зразка балочного типу використовували метод аналізу розмірностей.

У числі змінних ймовірної залежності прийнято: К – газопроникність зразка (характеристика структури затверділої суміші), м^4/(кг·с); Ос – обсипальність (характеристика поверхневої міцності матеріалу стрижня або

форми), кг/(м^2·с); ρ – уявна щільність затверділої суміші (характеристика складу і структури затверділої суміші), кг/м^3; l – відстань між опорами зразка (характеристика геометричних розмірів зразка суміші), м.

В результаті розрахунку отримали наступну залежність:

$$\varepsilon = f_\varepsilon \cdot l \cdot \rho^2 \cdot \frac{K}{Oc}, \tag{5.23}$$

де f_ε – безрозмірний поправочний коефіцієнт.

Якщо праву і ліву частину формули (5.23) розділити на відстань між опорами (l), то отримаємо формулу для розрахунку відносної гранично-припустимої величини стріли прогину:

$$\Delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{l} = f_\varepsilon^* \cdot \rho^2 \cdot \frac{K}{Oc}, \tag{5.24}$$

де f_ε^* – безрозмірний поправочний коефіцієнт.

Якщо (5.19) підставити в (5.24), то отримаємо такий вираз для розрахунку абсолютної величини стріли прогину балки із структурованої суміші:

$$\varepsilon = \frac{f_\varepsilon^*}{f_0} \cdot \frac{\sigma_{CT}}{\rho}. \tag{5.25}$$

Робота вибивання (А) – це робота, яку необхідно затратити на вибивання виливків з форм і/або стрижнів з виливків. В даний час в якості критерію оцінки вибивання суміші деякі дослідники використовують значення величини роботи, витраченої на руйнування зразка суміші ∅50×30 мм [382]. Перед випробуваннями «сирі» або термічно оброблені зразки з випробуваної структурованої суміші з натягом укладають в сталеву гільзу відповідно до схеми на рис. 5.34.

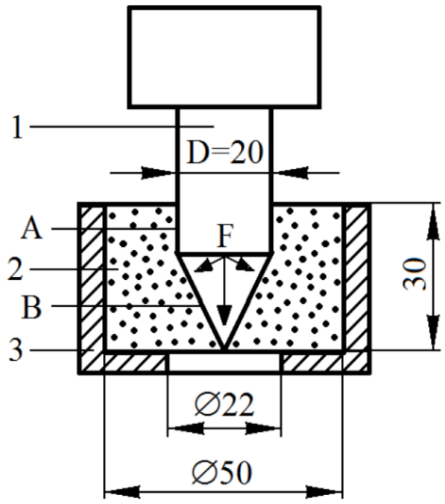


Рисунок 5.34 – Схема випробування зразків ФСС на вибивання з виливків: 1 – бойок; 2 – випробуваний зразок; 3 – гільза з отвором в днище

Після цього, у верхній поверхні зразка встановлюють сталевий бойок і на лабораторному копрі б'ють по бойку до тих пір, поки він не проникне в зразок на глибину 30 мм. Роботу (А), витрачену на пробивання зразка на зазначену глибину, розраховують за формулою, Дж (кг·м^2/с^2):

$$A = n \cdot G \cdot h, \tag{5.26}$$

де n – число ударів по бойку до пробивання зразка на глибину 30 мм;
G – маса падаючого на бойок вантажу в копрі;
h – висота падіння вантажу на копрі.

Ряд авторів, як критерій оцінки вибивання суміші використовують число ударів копра по бойку [305, 383] або величину межі міцності на стиск суміші після її попереднього нагрівання до певної температури (величину залишкової міцності) [382, 384] і т.д.

У прийнятій схемі випробувань (див. рис. 5.34) руйнування матеріалу зразка відбувається в результаті розколювання і роздавлювання структурованої суміші. Виходячи з цього, кількість енергії (роботи), витраченої на вибивання, можна розраховувати за формулами, складеними на

основі гіпотези Ріттенгера (гіпотеза поверхонь) або гіпотези В.Л. Кирпичова (гіпотеза об’ємів).

Відповідно до гіпотези Ріттенгера, робота, що витрачена при подрібненні (руйнуванні) тіла, пропорційна площі поверхні, що знову утворилася, або ступені подрібнення тіла. Тобто, відповідно до гіпотези Ріттінгера:

$$A_R = f_R \cdot S, \tag{5.27}$$

де f_R – коефіцієнт пропорційності;

S – площа поверхонь, що виникли в результаті руйнування тіла.

Відповідно до гіпотези В.Л. Кирпичова (гіпотеза об’ємів), енергія, необхідна для однакової зміни форми геометрично подібних тіл, пропорційно об’ємам або масам цих же тіл. Тобто, відповідно до гіпотези об’ємів, виходячи із закону Гука, роботу руйнування (дроблення) тіла розраховують за формулою:

$$A_K = \frac{\sigma_{CT}^2 \cdot V}{2E}, \tag{5.28}$$

де σ_{CT} – межа міцності на стиск матеріалу тіла;

E – модуль пружності першого роду матеріалу тіла;

V – об'єм тіла.

У гіпотезі В.Л. Кирпичова враховані витрати енергії насамперед на пружну, а потім на пластичну деформацію, але не враховані витрати енергії на виникнення в тілі поверхонь руйнування, на подолання сил зовнішнього і внутрішнього тертя, на втрати енергії, викликаними тепловими явищами і т.п. З цього випливає, що гіпотеза В.Л. Кирпичова застосовна при дробленні, а гіпотеза Ріттінгера – при розломі (тонкому подрібненні) тіла [385, 386].

Будь-яке подрібнення реального тіла представляє сукупність процесів стирання, дроблення, розламування і т.д., що одночасно проходять, але виражених в різному ступені і мінливих в часі.

Виходячи з цього П.А. Ребиндер, прийнявши, що енергія, яка витрачається на подрібнення матеріалу, є сумою енергій, витрачених як на деформацію матеріалу, що подрібнює тіло, так і на утворення нових поверхонь, роботу подрібнення розраховує за формулою:

$$A_K + A_R = A. \tag{5.29}$$

Виходячи з описаної вище методики визначення роботи, витраченої на вибивання циліндричного зразка структурованої суміші з обойми, його розмірів, форми і розмірів бойка, формулу (5.28) доцільно доповнити наступними складовими (див. рис. 5.34):

• робота (A_A), витрачена на подолання сили тертя (F_{TP}) на циліндричній поверхні бойка (А) при його русі в зразку:

$$A_A = \pi \cdot D \cdot l_A \cdot \mu \cdot (\sigma_{CT} + \sigma), \tag{5.30}$$

де l_A – довжина циліндричної частини бойка, що заглиблена в матеріал зразка;

μ – коефіцієнт тертя;

σ – стискаючі напруги в зразку, викликані натягом обойми при посадці в неї зразка (для реального виливка – лінійною усадкою виливка при його охолодженні);

$\pi = 3{,}14$;

• робота (A_B), витрачена при проходженні в суміші конічної частини бойка (В) шляху протяжністю l:

$$A_B = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (\sigma_{ЭФ} + \sigma) \cdot l \cdot \cos\alpha\ , \tag{5.31}$$

де $\sigma_{ЭФ}$ – деяке характерне (ефективне) напруження;

cosα – косинус кута між вектором прикладеної сили і вектором переміщення поверхні;

• робота (A_D) сили пружності при переході матеріалу бойка з недеформованого стану в деформований при ударі по бойку:

$$A_D = \frac{k \cdot \Delta l^2}{2}, \tag{5.32}$$

де k – жорсткість матеріалу бойка;

Δl – абсолютний стиск матеріалу бойка при ударі по ньому.

У цьому випадку формула (5.29) з урахуванням (5.30)...(5.32) матиме вигляд:

$$A = A_R + A_K + A_A + A_B + A_D. \tag{5.33}$$

З аналізу формули (5.33) випливає, що робота вибивання зразка за затвердженою методикою залежна від значного числа змінних факторів і здебільшого може бути використана для якісної оцінки впливу того чи іншого параметра на вибивання виливка з форми і стрижня з виливка.

Стосовно до показника вибиваємості (робота вибивання) в якості змінних використовували такі параметри зразка структурованої суміші: $\sigma_{СТ}$ – міцність на стиск, кг/м^2; К – газопроникність, м^4/(кг·с); l – довжина зразка, м.

В результаті розрахунку отримали наступну залежність [379]:

$$A = f_A \cdot K^2 \cdot \sigma_{ст}^2 \cdot l \cdot \rho = f_A \cdot K^2 \cdot \sigma_{ст}^3, \tag{5.34}$$

де f_A – безрозмірний поправочний коефіцієнт.

Для обчислення ***межі міцності*** структурованої суміші на стиск в якості змінних використовували такі параметри зразка структурованої суміші: ρ, $\rho_{СВ}$ – уявна щільність структурованої суміші і дійсна щільність затверділого

сполучного матеріалу відповідно, кг/м^3; $V_{СВ}$, $m_{СВ}$ – питомий об'єм (м^3) і питома маса (кг) затверділого сполучного матеріалу в суміші відповідно; $S_П$ – питома площа поверхні зернистої складової структурованої суміші, м^2.

В результаті розрахунку отримали наступну залежність [379]:

$$\sigma_{СТ} = f_\sigma \cdot \rho \cdot \frac{V_{СВ}}{S_П} = f_\sigma \cdot \frac{\rho}{\rho_{СВ}} \cdot \frac{m_{СВ}}{S_П}, \qquad (5.35)$$

де f_σ – безрозмірний поправочний коефіцієнт.

Якщо розглянуті властивості структурованих сумішей, що змінюються в часі, наприклад, під час зберігання ЛФС до заливки, то ці зміни можливо врахувати шляхом зведення в відповідну ступінь правих частин формул (5.19), (5.25), (5.34), (5.354) та їх множення на показник часу (τ).

Величину показників ступенів в такому випадку розраховують за експериментальними даними.

Тобто:

$$Oc = f_0 \cdot \tau^{n1} \cdot \left(\rho^3 \cdot l \cdot \frac{K}{\sigma_{СТ}} \right)^n, \qquad (5.36)$$

$$\varepsilon = \frac{f_\varepsilon^*}{f_0} \cdot \tau^{k1} \cdot \left(\frac{\sigma_{СТ}}{\rho} \right)^k, \qquad (5.37)$$

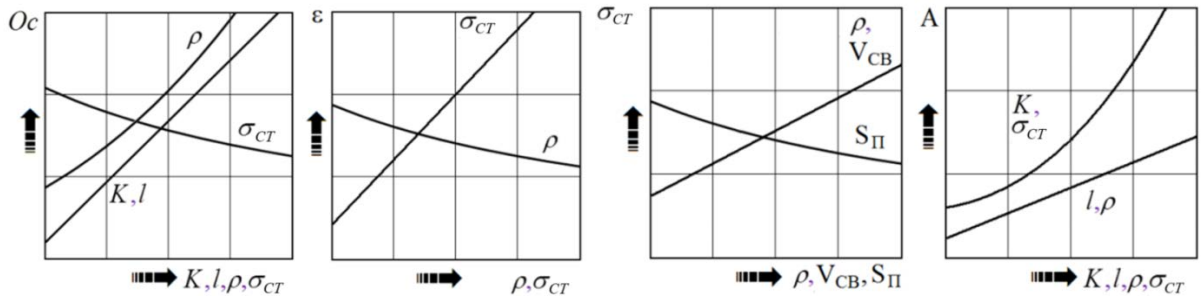
$$A = f_A \cdot \tau^{j1} \cdot \left(K^2 \cdot \sigma_{СТ}^2 \cdot l \cdot \rho \right)^j = f_A \cdot \tau^{j1} \cdot \left(K^2 \cdot \sigma_{СТ}^3 \right)^j, \qquad (5.38)$$

$$\sigma_{СТ} = f_\sigma \cdot \tau^{y1} \left(\rho \cdot \frac{V_{СВ}}{S_П} \right)^y = f_\sigma \cdot \tau^{y1} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{СВ}} \cdot \frac{m_{СВ}}{S_П} \right)^y, \qquad (5.39)$$

де n_1, n, k_1, k, j_1, j, y_1, y – показники ступеню.

Для аналізу отриманих результатів теоретичних досліджень, використо-

вуючи формули (5.19), (5.24), (5.34), (5.35), побудували графічні залежності досліджуваних властивостей структурованих сумішей від обраних для досліджень параметрів. Отримані залежності представлені на рис. 5.35.



а б в г

Рисунок 5.35 – Залежності обсипальності (а), стріли прогину (б), межі міцності на стиск (в) і роботи вибивання (в) структурованої суміші з виливка від параметрів, що входять в формули (5.19), (5.24), (5.34), (5.35) та (5.36)…(5.39)

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.35,а витікає, що, при інших незмінних параметрах, обсипальність будь-якої структурованої суміші зменшується з пониженням її уявної щільності, довжини випробуваного зразка і його газопроникності, а також зі збільшенням міцності суміші на стиск.

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.35,б витікає, що гранично-припустима стріла прогину бруса зростає (зменшується крихкість) зі зменшенням уявної щільності та збільшенням міцності суміші на стиск.

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.35,в витікає, що міцність структурованої суміші підвищується зі збільшенням об'ємної частки сполучного матеріалу в суміші і зменшенням питомої поверхні її піщинок (підвищенням фракції піску).

З аналізу ходу залежностей на рис. 5.35,г витікає, що робота вибивання стрижневої суміші з виливків зростає зі збільшенням її залишкової межі міцності на стиск, газопроникності, питомої щільності і довжини зразка (стрижня).

Отримані формули відображають взаємозв'язок між параметрами і

розмірами випробуваного тіла (зразка), і властивостями його матеріалу в межах прийнятих методів і методик проведення випробувань і визначень. Це означає, що для будь-якої реальної структурованої суміші між її параметрами також існує певний зв'язок. З цього витікає, що зміна будь-якого параметра структурованої суміші неминуче призводить до відповідних змін і інших її властивостей. Крім цього, відповідно до формули (5.34), можна констатувати, що в першому наближенні припустимо оцінювати вибивання стрижнів за величиною залишкової міцності їх матеріалу.

Вище були розглянуті ряд функціональних залежностей для різних сумішей, у числі яких і ПРС, а саме:

- обсипальність формула (5.19), де $l_C = 0{,}05$ м;
- стріла прогину формула (5.24), де $l_\varepsilon = 0{,}2$ м;
- робота вибивання формула (5.34), де $l_A = 0{,}05$ м.

Використовуючи експериментальні дані табл. 5.7 та формули (5.19), (5.24), (5.34) при значеннях $f_0 = 21 \cdot 10^{-12}$, $f_A = 56 \cdot 10^{-7}$, $f_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11}$ розрахували похибки між експериментальними та розрахунковими даними.

Результати визначення похибок надано в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Похибка розрахунків

Код суміші	Ос, %			А, Дж			Δ_ε, %		
	експ.	розр. (5.19)	похибка, %	експ.	розр. (5.34)	похибка, %	експ.	розр. (5.24)	похибка, %
X_1	0,84	0,81	3,3	53	52	2,3	0,13	0,135	-3,8
X_2	1,22	1,19	2,3	6,1	6,3	-2,7	0,07	0,072	-2,9
X_3	0,55	0,55	-0,8	280	271	3,1	0,275	0,285	-3,6
X_4	0,57	0,54	6,1	98	98	-0,2	0,195	0,2	-2,6
X_5	0,62	0,61	2,4	104	100	3,8	0,195	0,205	-5,1
X_6	0,26	0,28	-6,5	92	96	-4,3	0,32	0,33	-3,1
X_7	0,95	0,93	1,9	89	90	-1,6	0,16	0,155	3,1
X_8	0,88	0,83	5,5	79	84	-6,3	0,15	0,15	0,0
X_9	0,81	0,75	6,8	121	133	-9,9	0,19	0,18	5,3
X_{10}	0,94	0,97	-2,8	81	75	7,4	0,16	0,15	6,3

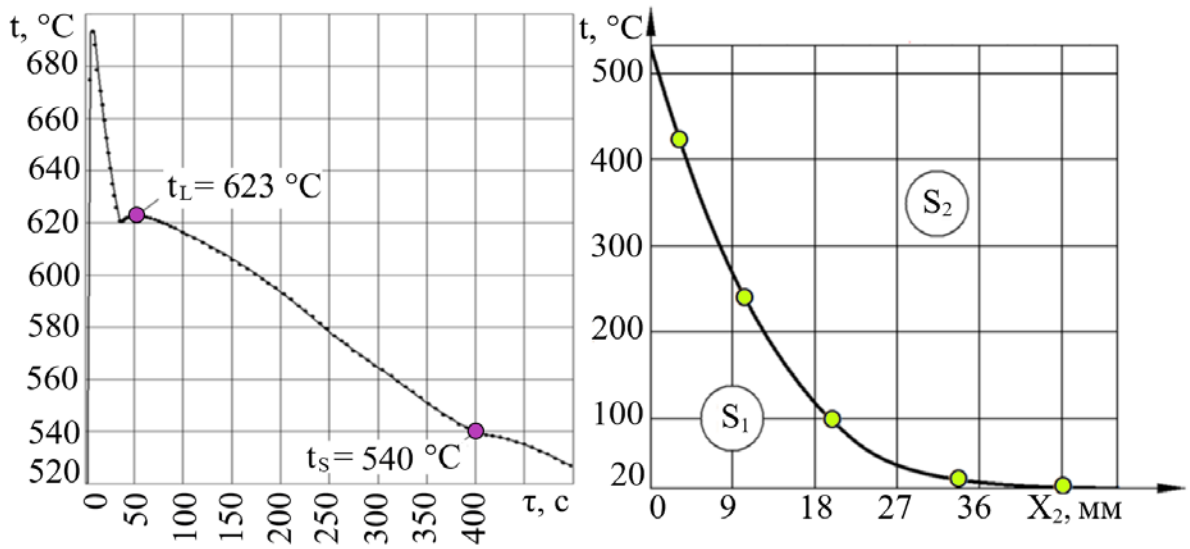
З аналізу даних табл. 5.8 випливає, що величина відносної похибки між експериментальними і розрахунковими даними за величиною обсипальності, роботи вибивання та відносної величини стріли прогину структурованих сумішей при, відповідно, $f_0 = 21 \cdot 10^{-10}$, $f_A = 56 \cdot 10^{-7}$ і $f_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11}$ не перевищує 10%. Така відносно невелика похибка свідчить про те, що використані функціональні залежності адекватно описують взаємозв'язок між розмірними, фізичними та технологічними параметрами, що входять до складу формул, а результати розрахунку за цими формулами можливо рекомендувати для моделювання та прогнозування властивостей ПРС, структурованих за способом ПМЗ, в умовах «дрейфу» області оптимуму при зміні умов виготовлення ЛФС (див. Додаток К) [427].

5.6 Визначення теплофізичних властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння

На відміну від чисельних методів, аналітичні методи розрахунку дають адекватні уявлення комплексного впливу теплофізичних параметрів на процес затвердіння та охолодження лише для виливків простої конфігурації [238, 239, 387, 388].

Для визначення теплофізичних властивостей ПРС форму виготовляли за способом ПМЗ. Суміш складалася з кварцового піску плакованого 0,5%, 1,5% і 3,0% РС (за масою, понад 100% піску). Плакування кварцового піску проводили шляхом його механічного перемішування з РС, сушінням на повітрі до сипучого стану і підсушуванням в мікрохвильовій печі протягом 3...4 хв. Для визначення впливу щільності плакованої суміші на її теплофізичні властивості, суміш після плакування і просушування на повітрі просівали через сита з розмірами осередків у світлі 1,0 мм, 0,63 мм, 0,4 мм, 0,315 мм і 0,2 мм. Відповідно до прийнятої методики досліджень (див. розділ 2, п.п. 2.5.7) для кожного циліндричного виливка була отримана термограма зміни температури і побудовано розподіл температурного поля в формі до

моменту завершення затвердіння залитого в форму розплаву в центрі виливка. Як приклад, термограма затвердіння циліндричного виливка зі сплаву Al+Mg (8,5%) і розподіл температури в стінці піщано-рідкоскляної форми, структурованої за способом ПМЗ, з 3% РС представлені на рис. 5.36 [383].



а б

Рисунок 5.36 – Термограма затвердіння циліндричного виливка зі сплаву Al+Mg (8,5%) (а) та розподіл температури в стінці ПРС форми, структурованої за способом ПМЗ, з 3% РС (б)

З аналізу термограми (див. рис. 5.36,а) випливає, що тривалість відводу теплоти перегріву від розплаву в форму складає 40 с, величина переохолодження розплаву ~3 °С, температура ліквідус сплаву t_L=623 °С, температура солідус t_S = 540 °С, тривалість затвердіння циліндричного виливка склала $\tau_{ЗТ}$ = 400 с, а глибина прогріву форми при цьому склала X_2 = 0,047 м.

Використовуючи показання термопар, розташованих у формі і дані про їх видалення від поверхні виливка, побудували криву розподілу температури формі (див. рис. 5.36,б). Накресливши зображення розподілу температури і обмеживши прямокутником точки її перетину з вісями координат зображення, методом планіметрування визначили площі над (S_2) і під (S_1)

температурною кривою в $см^2$. Величину показника ступеня параболічної кривої на рис. 5.36,б розраховували за формулою робіт Г.А. Анісовича [305]:

$$n=S_2/S_1. \quad (5.40)$$

Розрахункові і експериментальні значення параметрів, прийняті для розрахунку теплофізичних властивостей, структурованих сумішей, при заливці в них сплаву Al+8,5%Mg і сірого чавуну СЧ200, наведені в табл. 5.9.

Таблиця 5.9

Розрахункові і експериментальні значення параметрів, прийняті для розрахунку теплофізичних властивостей, структурованих сумішей, при заливці в них сплаву Al+8,5%Mg і сірого чавуну СЧ200

$m_{РС}$, % (за масою)	$\tau_{ЗТ}$,с	X_2,м	n	$t_п$, °С
Виливок зі сплаву Al+8,5%Mg				
0,5	195	0,028	2,9	511
1,5	280	0,036	3,0	507
3,0	400	0,047	3,4	487
Виливок з сірого чавуну СЧ200				
0,5	137	0,029	3	965
1,5	215	0,04	3,3	960
3,0	317	0,05	3,5	950

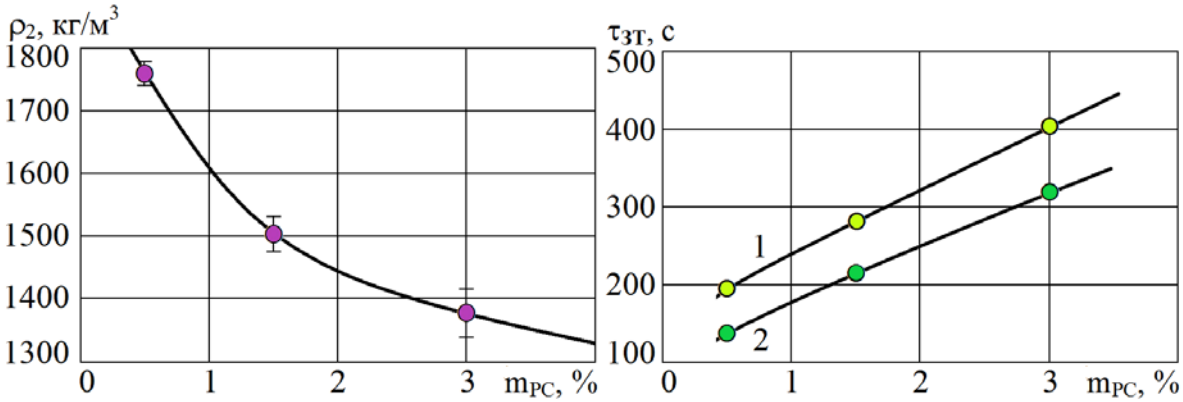
Результати розрахунків теплофізичних властивостей структурованих сумішей при заливці в них сплаву Al+8,5%Mg і сірого чавуну СЧ200, відповідно, наведені в табл. 5.10.

Використовуючи дані табл. 5.10 побудували залежності щільності структурованого кварцового піску, плакованого РС, і часу затвердіння циліндричних напівнескінчених виливків ∅30 мм в формах зі структурованого кварцового піску, плакованого РС, від маси РС, використаного на плакування кварцового піску, які представлені на рис. 5.37 [383].

Таблиця 5.10

Теплофізичні властивості структурованих сумішей для різних сплавів

$m_{РС}$, % (за масою)	ρ_2, $\frac{кг}{м^3}$	c_2, $\frac{Дж}{кг \cdot град}$	λ_2, $\frac{Вт}{м \cdot град}$	$a_2 \cdot 10^6$, $\frac{м^2}{с}$	b_2, $\frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2 \cdot град}$
при заливці сплаву Al+8,5%Mg					
0,5	1758	1047	0,526	0,286	984
1,5	1503	923	0,465	0,335	803
3,0	1380	848	0,414	0,353	696
при заливці сірого чавуну СЧ 200					
0,5	1758	1220	0,801	0,373	1311
1,5	1503	1037	0,689	0,442	1036
3,0	1380	902	0,605	0,486	868

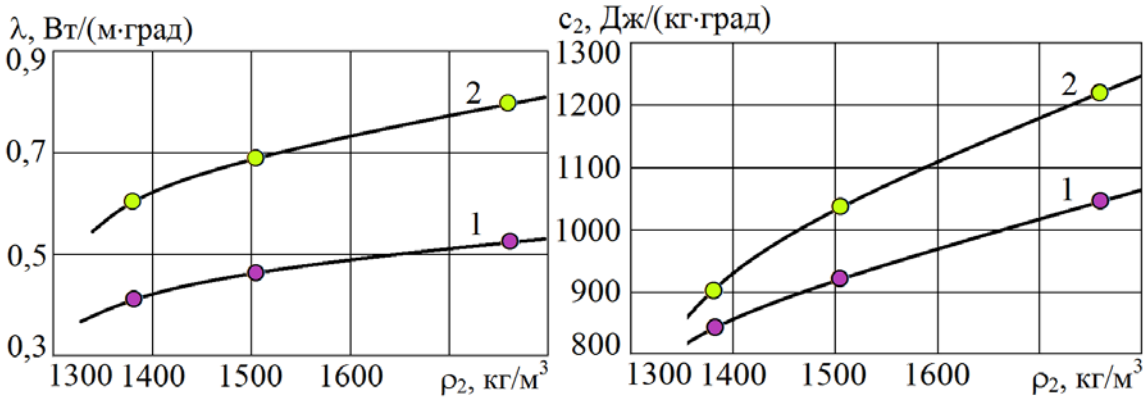


а б

Рисунок 5.37 – Залежність щільності структурованого кварцового піску, плакованого РС (а) і часу затвердіння циліндричних виливків у формах зі структурованого кварцового піску, плакованого РС (б) від маси РС, використаного на плакування кварцового піску:
1 – виливки зі сплаву Al+8,5%Mg; 2 – виливки з сірого чавуну СЧ 200

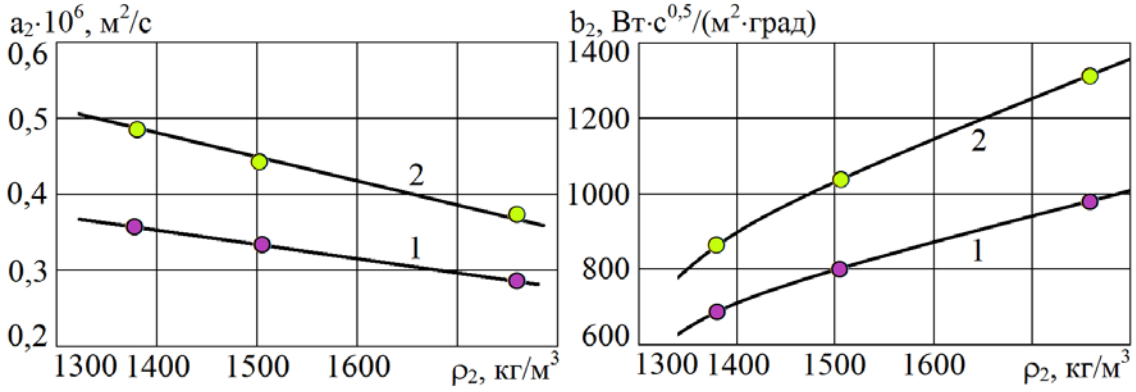
Залежність теплопровідності і питомої теплоємності від щільності структурованого кварцового піску, плакованого РС, а також залежність коефіцієнтів температуропровідності і теплоакумулюючої здатності від щільності

структурованого кварцового піску, плакованого РС, при заливці форм алюмінієвим сплавом і сірим чавуном представлені на рис. 5.38 і рис. 5.39 відповідно.



а б

Рисунок 5.38 – Залежність теплопровідності (а) і питомої теплоємності (б) від щільності структурованого кварцового піску, плакованого РС: 1 – виливки зі сплаву Al+8,5 % Mg; 2 – виливки з сірого чавуну СЧ 200

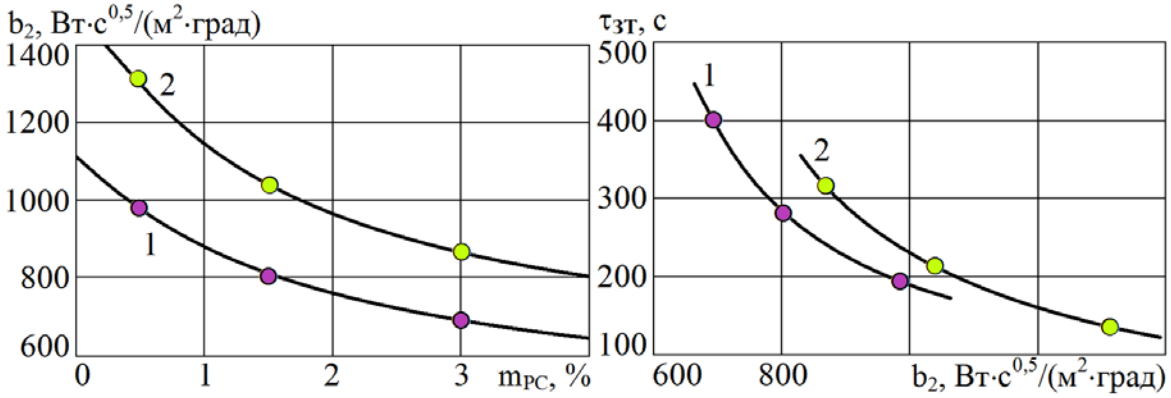


а б

Рисунок 5.39 – Залежність температуропровідності (а) і теплоакумулюючої здатності (б) від щільності структурованого кварцового піску, плакованого РС: 1 – виливки зі сплаву Al+8,5%Mg; 2 – виливки з сірого чавуну СЧ 200

Залежності коефіцієнта теплоакумулюючої здатності матеріалу форми від маси РС, використаного на плакування, і тривалості затвердіння полунескінченого циліндричного виливка ∅30 мм від величини коефіцієнта

теплоакумулюючої здатності матеріалу форми при її заливанні алюмінієвим сплавом і сірим чавуном представлені на рис. 5.40.



а б

Рисунок 5.40 – Залежність коефіцієнта теплоакумулюючої здатності матеріалу форми від маси РС, використаного на плакуваннння (а), і тривалості затвердіння полунескінченого циліндричного виливка ∅30 мм від величини коефіцієнта теплоакумулюючої здатності матеріалу форми (б):
1 – виливки зі сплаву Al+8,5%Mg ; 2 – виливки з сірого чавуну СЧ 200

На рис. 5.40,б представлена крива залежності $\tau_{ЗТ}=f(b_2)$, яку побудували за експериментальними даними. Аналіз залежностей на рис. 5.40,б показує, що обидві залежності відповідають формулі (5.40) [389]:

$$b_2 = 2\frac{V_O}{F_O}\cdot\frac{\rho_1 r}{(t_{KP}-t_Ф)\sqrt{\tau_{ЗТ}}}, \qquad (5.41)$$

де V_O – об’єм виливка;

F_O – площа дотику виливка з формою;

r – теплота кристалізації металу;

t_{KP} – температура кристалізації металу;

ρ_1 – щільність твердого металу (сплаву) виливка;

$t_Ф$ – початкова температура форми;

$\tau_{ЗТ}$ – час затвердіння виливка.

Формулу (5.41) для сірого чавуну і алюмінієвого сплаву можна представити в наступному вигляді:

$$\tau_{ЗТ} = B \cdot \left(\frac{R}{b_2} \right)^2 , \qquad (5.42)$$

$$B = \frac{n+1}{2n} \cdot \left(\frac{\rho_2 \cdot r}{t_{КР} - t_{Ф}} \right)^2 .$$

Використовуючи формулу (5.42) при $B=84 \cdot 10^{10} \frac{(Вт \cdot с)^2}{м^6 \cdot град^2}$ для алюмінієвого сплаву і $B=105 \cdot 10^{10} \frac{(Вт \cdot с)^2}{м^6 \cdot град^2}$ для сірого чавуну з відносною похибкою не більше 5% можна розрахувати тривалість затвердіння напівнескінченого циліндричного виливка в піщано-рідкоскляній формі, суміш якої структурована за ПМЗ-процесом. Про це свідчать дані табл. 5.11, де наведено величини похибки ($\Delta\tau$) між розрахунковими і експериментальними даними величин тривалості затвердіння таких виливків ∅30 мм.

Таблиця 5.11

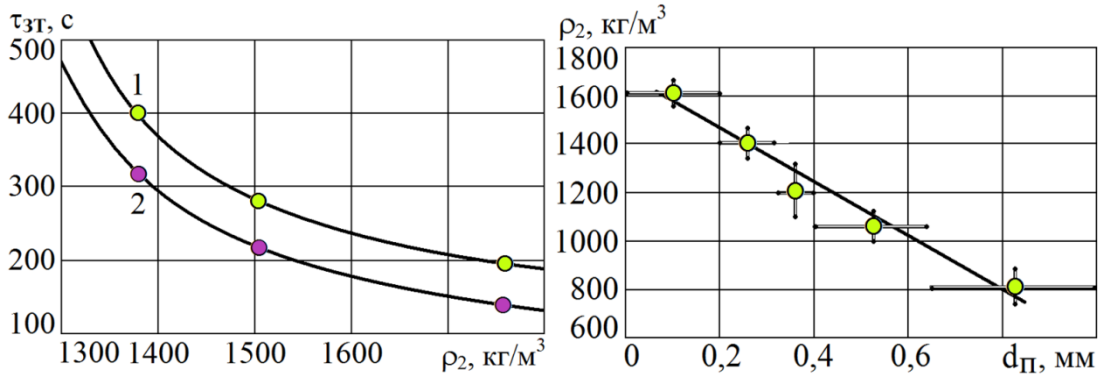
Похибка ($\Delta\tau$) розрахована за формулою (5.41) і експериментальних величин за формулою (5.42) тривалості затвердіння напівнескінченних циліндричних виливків з алюмінієвого сплаву Al+8,5%Mg і сірого чавуну СЧ 200

b_2, $\frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2 \cdot град}$	$\tau_{ЗТ}$, с (Al+8,5%Mg)		$\Delta\tau$, %	b_2, $\frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2 \cdot град}$	$\tau_{ЗТ}$, с (СЧ 200)		$\Delta\tau$, %
	експ.	розр.			експ.	розр.	
984	195	195,3	-0,2	1311	137	137,5	-0,4
803	280	292,9	-4,6	1036	215	220,1	-2,4
696	400	390,4	2,4	868	317	313,5	1,1

Для практичного використання отриманих даних найбільш прийнятним

є залежність тривалості затвердіння від питомої щільності структурованої формувальної суміші, представленої на рис. 5.41,а.

При цьому слід враховувати, що величина уявної щільності структурованої ПРС за способом ПМЗ залежить і від розмірів конгломератів частинок плакованого піску, про що свідчить залежність на рис. 5.41,б.



а б

Рисунок 5.41 – Залежності тривалості затвердіння циліндричного виливка ∅30 мм від питомої щільності ПРС, структурованої за способом ПМЗ (а), залежність питомої щільності ПРС з 3% РС, структурованої за способом ПМЗ, від діаметра зерен кварцового піску (б):
1 – виливки зі сплаву Al+8,5% Mg; 2 – виливкиз сірого чавуну СЧ 200

Аналіз залежності на рис. 5.41,б показує, що при уявній щільності чистого піску 1642 кг/м^3 збільшення розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів з 0,1 до 0,8 мм призводить до зменшення питомої щільності структурованої суміші в 2 рази – з ~1610 до ~810 кг/м^3. Відповідно, такі зміни призведуть і до зміни теплофізичних властивості структурованої суміші.

Тобто, змінюючи кількість РС, що пішло на плакування кварцового піску або використовуючи різні фракції конгломератів, які, наприклад, отримують в результаті розсіву не повністю висушеної плакованої суміші через сита з різним розміром осередків, можна в широких межах змінювати тривалість затвердіння виливка і, відповідно, структуру її металу. Крім того, така залежність свідчить про те, що, використовуючи конгломерати великих

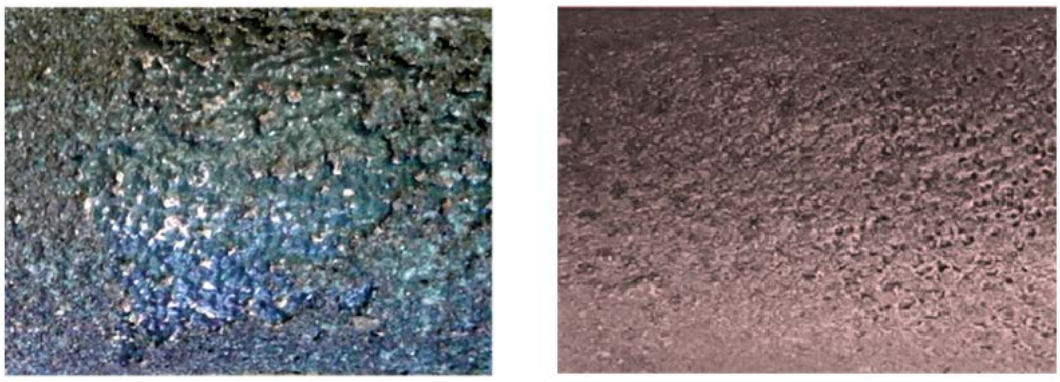
розмірів при незмінному загальному складі ПРС, можливо використовувати таку ПРС у якості теплоізоляційного матеріалу для надливів виливків.

5.7. Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру і якість виливків

Для порівняльної оцінки впливу способу структурування ПРС на якість поверхні виливків у ливарній форми, які виготовлені відповідно до методики (див. розділ 2, п.п. 2.5.9, рис. 2.6,а) були відлиті циліндричні виливки з міді, як найбільш хімічно активного матеріалу по відношенню до РС.

У дослідженнях використовували ливарні форми з ПРС з 5% РС, які після ущільнення сушили при 200 °С протягом 2 годин, та форми, виготовлені за ПМЗ-процесом, з кварцового піску, плакованого 1,5% РС. Заливання розплаву міді проводили з перегріванням 105...110 °С.

Вид поверхні виливків після їх вибивання та очищення металевою щіткою представлений на рис. 5.42 [390].



а б

Рисунок 5.42 – Вигляд поверхні мідного виливка, відлитого у ливарну форму з ПРС після теплового сушіння (а) і у ливарну форму, виготовлену за ПМЗ-процесом (б)

З аналізу виду поверхонь мідних виливків на рис. 5.42 витікає, що на

відміну від виливка отриманого в ПРС, яку структурували тепловим сушінням, виливок, який отримано в ПРС, структуровану за ПМЗ-процесом, після обробки металевою щіткою не має пригару. Тобто, на поверхні виливка, залитого у форму, яку було висушену за загальноприйнятою технологією, є термохімічний пригар, який являє собою шар формувальної суміші чорного кольору товщиною до ~1,5 мм, що «пригоріла» до виливка.

Виходячи з того, що випробувані ПРС у структурованому стані газопроникні, а температура заливання розплаву міді у форми становила ~1210 °С, то ймовірною причиною виникнення такого виду пригару стало окислення міді на межі контакту її розплаву з формою:

$$2Cu + O_2 \xrightarrow{t} 2CuO\,, \tag{5.43}$$

і поява купрату натрію в результаті взаємодії оксиду міді (II) з оксидом натрію зі складу СН у ПРС:

$$CuO + Na_2O \xrightarrow{t} Na_2CuO_2\,, \tag{5.44}$$

з подальшим розчином купрату натрію в частині СН в шарі ПРС, прилеглому до виливка. Як результат, охолоджені міжзеренні манжети сполучного матеріалу в шарі пригару, вірогідно, є сплавом наступного хімічного складу:

$$xNa_2CuO_2 \cdot yCuO \cdot (mSiO_2 \cdot nNa_2O), \tag{5.45}$$

який не лише надав шару пригару чорний колір, а й високу міцність та силу адгезії до поверхні мідного виливка.

Для порівняльної оцінки впливу способу структурування ПРС та розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів кварцового піску, плакованого РС, на час і швидкість об'ємного затвердіння виливків провели термографування циліндричних виливків, що були залиті в моноблочні форми

(див. розділ 2, п.п. 2.5.9, рис. 2.6,а). У дослідженнях використовували ливарні форми таких типів:

- *тип A* – свіжоприготовлена суміш кварцового піску з 5% РС, ущільнена ударно-механічним способом, структурована тепловим сушінням на повітрі при 200 °С протягом 2 годин;
- *тип B* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами від 0,315 до 0,63 мм, плакованих 1,5% РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ;
- *тип C* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами менше 0,315 мм, плакованих 1,5% РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ;
- *тип D* – суміш конгломератів частинок кварцових частинок з розмірами менше 0,315 мм, плакованих 0,5% РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ;
- *тип E* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами менше 0,315 мм, плакованих 2,5% РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ.

Отримані результати термографування виливків надано на рис. 5.43 та наведено в табл. 5.12.

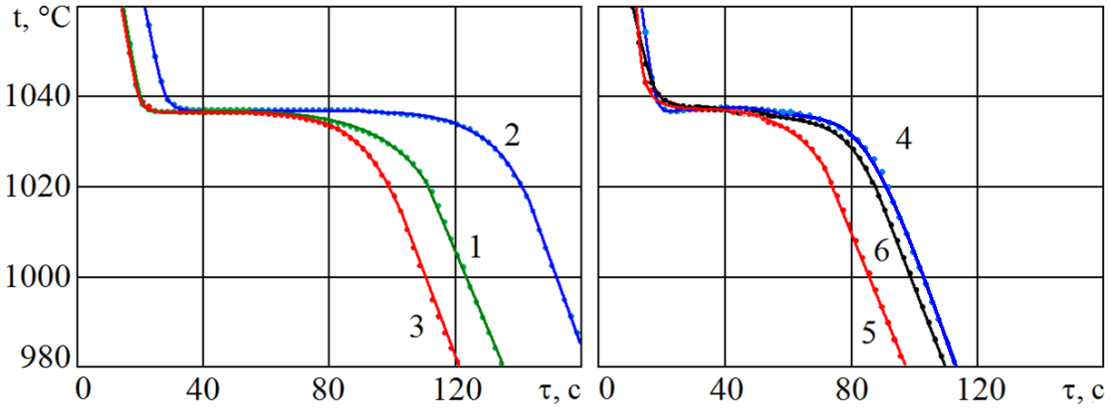


Рисунок 5.43 – Термограми затвердіння та охолодження циліндричних виливків (∅32×100 мм) із алюмінієвої бронзи, що була перегріта при заливці у ливарні форми на 140 °С (а) та на 90 °С (б): 1 – ливарна форма типу A; 2 – ливарна форма типу B; 3, 5 – ливарна форма типу C; 4 – ливарна форма типу D; 6 – ливарна форма типу E

Таблиця 5.12

Результати термографування затвердіння циліндричних виливків (∅32×100 мм) з алюмінієвої бронзи

Тип ливарної форми	Перегрів розплаву, °С	Час, с			V_C, мм/с
		відводу теплоти перегріву	кристалізації	затвердіння	
A	140	20	34	54	0,296
B		28	62	90	0,178
C		20	27	47	0,340
D	90	18	34	52	0,308
C		16	18	34	0,471
E		17	23	40	0,400

За результатами досліджень встановлено, що для даних умов швидкість об'ємного затвердіння виливків з алюмінієвої бронзи, яку забезпечують ливарні форми з ПРС, що структуровані тепловим сушінням, складає 0,296 мм/с (див. табл. 5.12). Виходячи з того, що в даний час бронзові виливки в ливарних цехах виготовляють і в ливарних формах з ПРС з 5% РС, структура та властивості яких відповідають рівню вимог, що висуваються до таких виливків, для подальших досліджень граничним значенням була прийнята мінімально-припустима швидкість об'ємного затвердіння виливків з алюмінієвої бронзи на рівні 0,3 мм/с.

Макроструктури виливків з алюмінієвої бронзи, представлені на рис. 5.44, а мікроструктури бронзи БрА9, перегрітої на 140 °С та залитої в ливарні форми типу В (а) та типу С (б) представлені на рис. 5.45.

З аналізу макроструктур на рис. 5.44 витікає, що розмір макрозерен у виливках із алюмінієвої бронзи залежить виключно від величини перегріву її розплаву при заливці. При цьому, зі зниженням перегріву зі 140 до 90 °С розмір макрозерен у виливках значно зменшується.

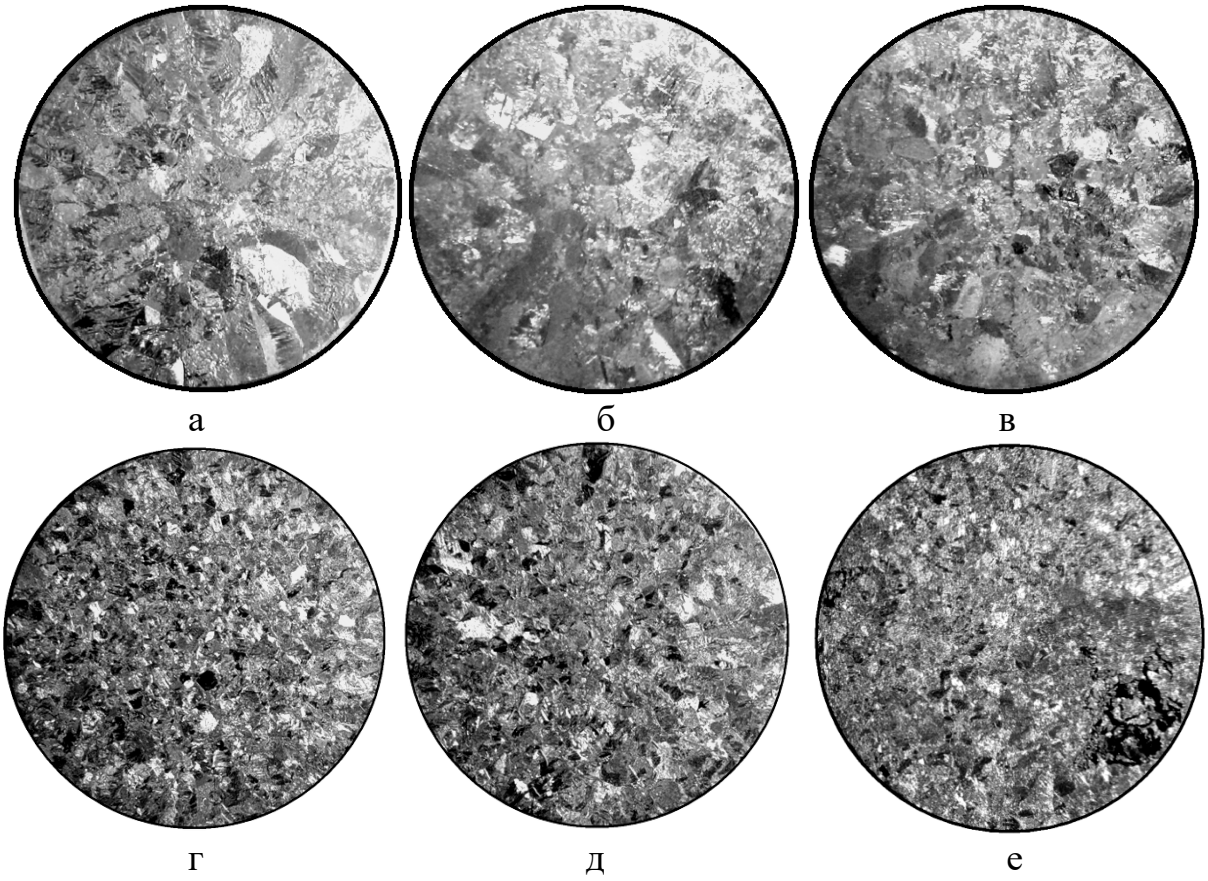


Рисунок 5.44 – Макроструктура виливків із бронзи БрА9, перегрітої на 140 °С та залитої в ливарні форми типу А (а), типу В (б), типу С (в), перегрітої на 90 °С та залитої в ливарні форми типу D (г), типу С (д), типу Е (е)

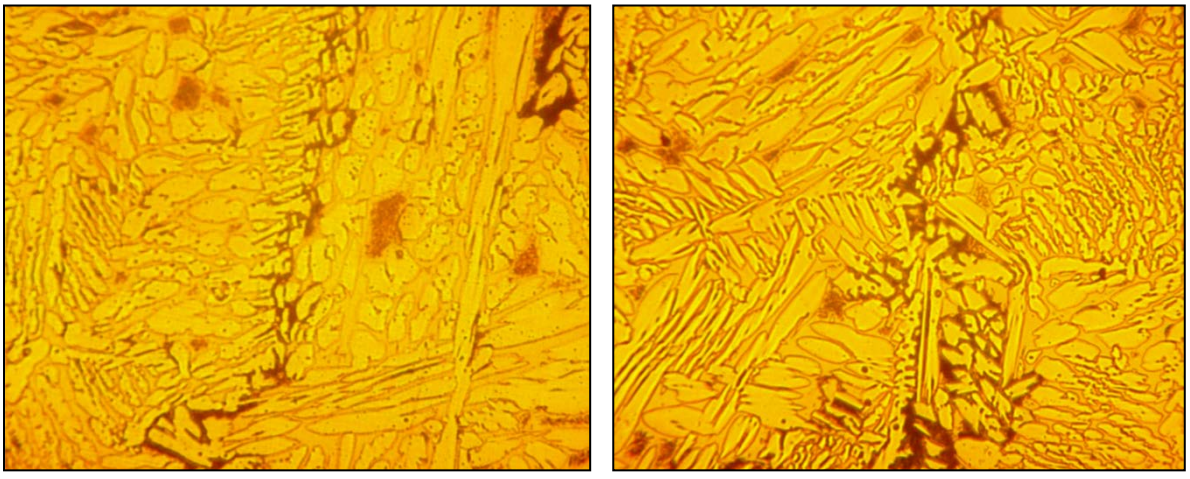


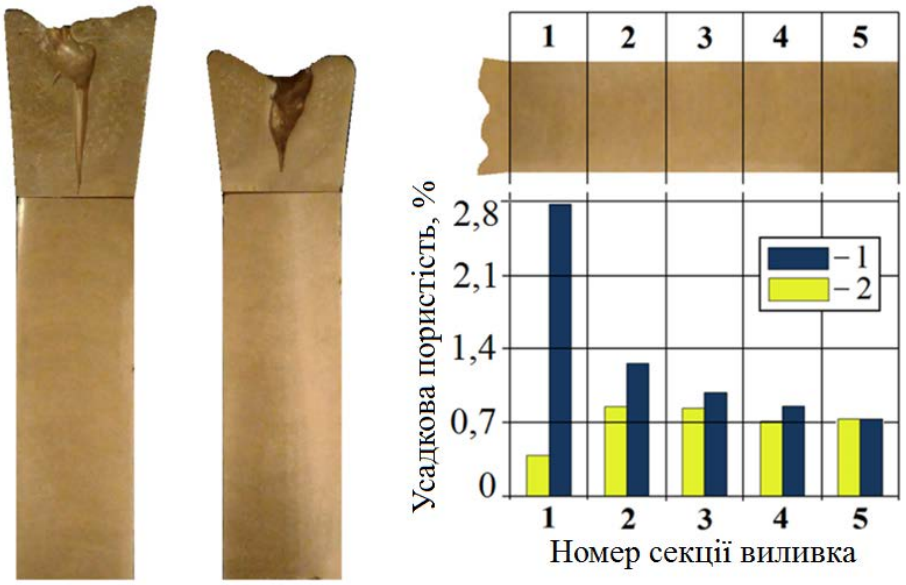
Рисунок 5.45 – Мікроструктура (×100) виливків із бронзи БрА9, перегрітої на 140 °С та залитої в ливарні форми типу В (а) та типу С (б)

Мікроструктура виливків із бронзи БрА9, перегрітої на 140 °С та залитої в ливарні форми типу В та типу С практично нічим не відрізняються з чого витікає, що керуванням швидкості затвердіння виливків з бронзи БрА9 в досліджених межах не можливо суттєво змінити її мікроструктуру та, відповідно, властивості литого металу. Тому теплофізичні особливості різноконгломератних сумішей доцільно використовувати виключно з метою покращення умов живлення виливків при затвердінні та зменшення витрат рідкого металу на їх надливи.

Особливістю виливків, виготовлених у ливарній формі типу Е, є значні за розміром об'єми локальної усадкової пористості хаотично розташовані по висоті та радіусу виливка і видимі неозброєним оком без хімічного травлення зразків. Хаотично розташовані по тілу усадкові раковини розміром до 5 мм також спостерігаються і в окремих виливках, виготовлених з використанням ливарних форм типу А.

Дані табл. 5.12 свідчать, що розплав алюмінієвої бронзи в ливарній формі типу С твердне швидше, ніж у ливарних формах інших типів. У зв'язку з цим для виготовлення ЛФС за ПМЗ-процесом слід використовувати кварцовий пісок, плакований 1,5% РС і просіяний через сито зі стороною осередку 0,315 мм. У той же час залишок такого піску на ситі з осередком 0,315 мм можна використовувати, як теплоізоляційну суміш.

Можливість використання ПРС з крупних конгломератів, структурованих за ПМЗ-процесом, в якості теплоізоляційної суміші оцінювали за результатами аналізу темплетів циліндричних виливків. При цьому, в одному випадку для виготовлення виливків використовували моноблочну ливарну форму типу С (див. розділ 2, п.п. 2.5.9, рис. 2.6,а), в іншому випадку – комбіновану форму, де для виливка використовували ливарну форму типу С, а для надливу – типу В (див. розділ 2, п.п. 2.5.9, рис. 2.6,б). Темплети циліндричних виливків зі своїми надливами представлені на рис 5.46,а,б, а на рис. 5.46,в – графік розподілу усадкової пористості за висотою виливків від їхнього торця (дільниця №5 на рис. 5.46) до місця встановлення надливу (дільниця №1 на рис. 5.46).



а б в

Рисунок 5.46 – Темплети циліндричних виливків з надливами, відлитих в моноблочну (а) та комбіновану (б) ливарну форму, графік розподілу усадкової пористості вздовж циліндричних виливків (в): 1 – моноблочна ливарна форма; 2 – комбінована ливарна форма

З аналізу рис. 5.46 витікає, що використання ПРС з конгломератів різних розмірів дозволяє виготовляти комбіновані ливарні форми з утепленими надливами, які не тільки мають зменшену масу надливу на 17...22%, але і дозволяють знизити об'єм усадкової пористості у виливках (див. рис. 5.46,в).

Для дослідження можливостей ПРС, які структуровані за ПМЗ-процесом, провели оптимізацію їх хімічного та фракційного складів за планом Г. Шефе. Коефіцієнти кореляції наведено в табл. 5.13, реалізована план-матриця експерименту – в табл. 5.14, коди сумішей з плакованого кварцового піску – в табл. 2.2.

Таблиця 5.13

Коефіцієнти кореляції

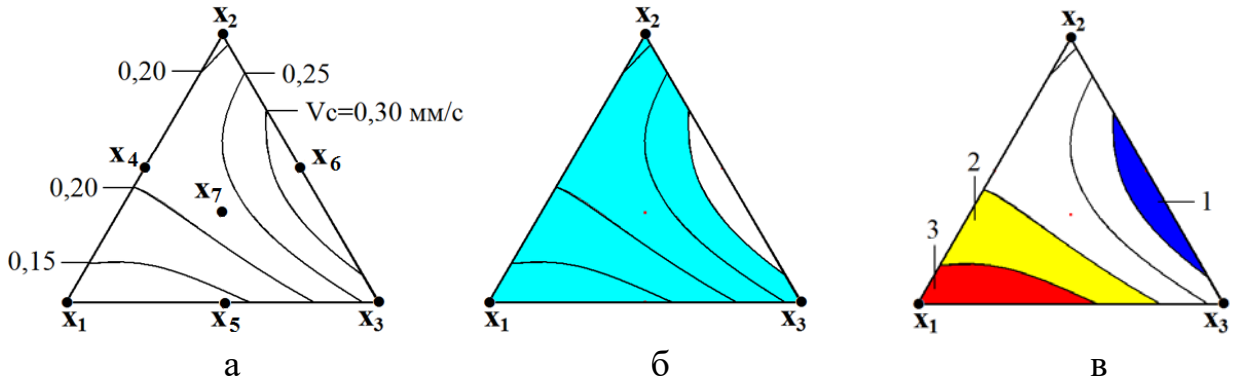
Параметр	Коефіцієнти кореляції						
	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
V_C	0,109	0,179	0,267	0,248	-0,216	0,468	-0,393

Таблиця 5.14

Реалізована план-матриця експерименту

Код суміші	Відносна маса в суміші			Час затвердіння, с	V_C, мм/с
	A	B	C		
X1	1			147	0,109
X2		1		89	0,179
X3			1	60	0,267
X4	0,5	0,5		78	0,206
X5	0,5		0,5	119	0,134
X6		0,5	0,5	47	0,340
X7	0,33	0,33	0,33	71	0,226

За результатами досліджень побудовано симплексний трикутник з ізолініями швидкості об'ємного затвердіння виливків, на якому виділено область складів сумішей, що забезпечують швидкість затвердіння виливків більше 0,3 мм/с та області складів сумішей, які можуть бути рекомендовані для виготовлення виливків та їх ливникових систем в комбінованих ливарних формах, що надано на рис. 5.47.



а б в

Рисунок 5.47 – Симплексний трикутник з ізолініями швидкості об'ємного затвердіння виливків (а), зона складів сумішей (не затемнена), що забезпечують швидкість затвердіння виливків більше 0,3 мм/с (б), зони складів сумішей, які можуть бути рекомендовані для виготовлення виливків та їх ливникових систем в комбінованих ливарних формах (в): 1 – зона складів сумішей, придатних для виливків, 2 – зони складів сумішей, придатних для теплоізольованих надливів з f=1,5/1...2/1; 3 – зони складів сумішей, придатних для теплоізольованих надливів з f≥ 2/1

З аналізу рис. 5.47 витікає, що потрібну швидкість об'ємного затвердіння (≥0,3 мм/с) виливкам забезпечують ПРС, які виготовлені з кварцового піску плакованого РС від 1% до 2% (за масою) та мають фракцію піщано-рідкоскляних конгломератів менше 0,315 мм (див. рис. 5.47,б). При цьому, суміші, склад яких знаходиться у жовтій та червоній зоні (див. рис. 5.47,в), можуть бути використані, як теплоізоляційні, у зв'язку з тим, що співвідношення швидкостей об'ємного затвердіння, що лежать в синій та жовтій зоні складає f=1,5/1...2,0/1, а в синій та червоній зоні – f ≥ 2,0.

Якість поверхні виливків оцінювали візуально. Для цих досліджень використовували виливки з алюмінієвої бронзи, розплав якої заливали в ливарні форми типів D, C і E з перегрівом 90 °C. Відмінністю між отриманими виливками було і те, що для структурування плакованих пісків за ПМЗ-процесом моделі циліндричних виливків були виготовлені з поліпропілену або гіпсу Г22 і не мали ливарних ухилів. Вид поверхні отриманих виливків зі збільшенням ×1,5 представлений на рис. 5.48.

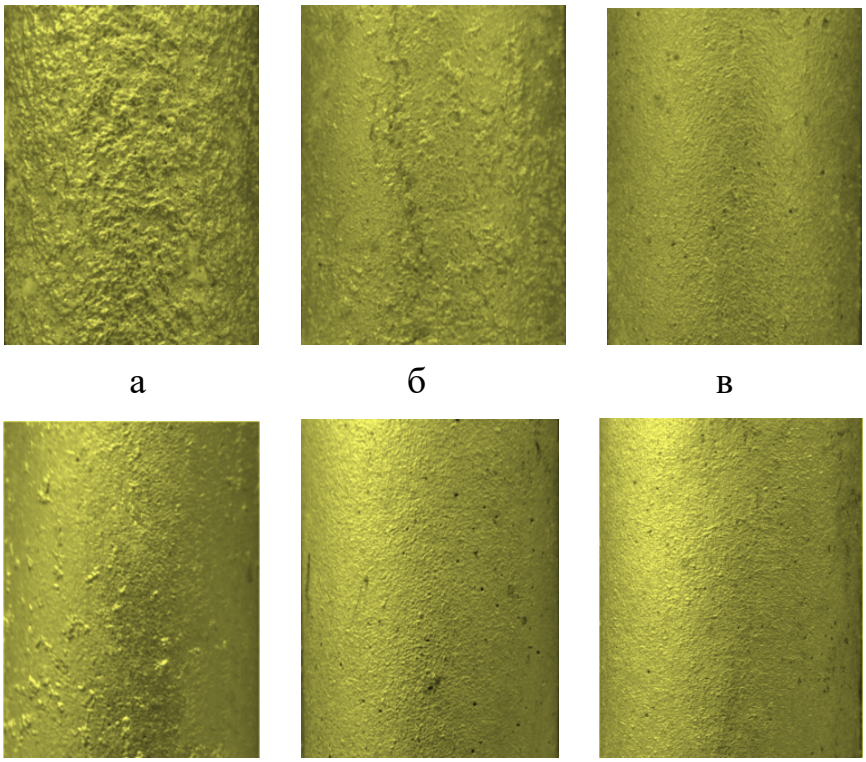


Рисунок 5.48 – Вид поверхні виливків, одержаних у ливарній формі типу D (а, г), типу C (б, д), типу E (в, е) при використанні моделі виливків з поліпропілену (а, б, в) та з гіпсу (г, д, е), ×1,5

З аналізу зображень на рис. 5.48 витікає, що зі збільшенням РС, яке було використане на плакування кварцового піску, якість поверхні виливків покращується. При цьому, поверхневих дефектів на виливках, які виготовили з використанням гіпсової моделі, значно менше ніж у виливків, для яких використовували поліпропіленові моделі. Такі закономірності пояснюються тим, що зі збільшенням долі РС в ПРС її міцність, у тому числі і поверхнева, зростає і, відповідно, обсипальність знижується. Тому під час протягування моделі поверхня такої структурованої суміші руйнується значно менше.

Щодо впливу матеріалу моделі, то тут значною мірою на обсипальність поверхні ливарної форми при її протягуванні впливає величина коефіцієнту лінійного розширення (КЛР) матеріалу моделі. За результатами досліджень встановлено, що поліпропілен та гіпс Г22, які були використані для виготовлення моделей виливків в інтервали від 20 °С до 130 °С мали КЛР, відповідно, $17{,}2\cdot10^{-5}$ і $2{,}4\cdot10^{-5}$ $°C^{-1}$. Тобто, маючи однакову температуру нагрівання поліпропіленова модель на відміну від гіпсової моделі більш розширювалася завдяки цьому і чинила більший тиск на робочу поверхню ливарної форми, що відповідно позначилося на більшій величині руйнування цієї поверхні.

5.8 Висновки

1. Використання мікрохвильового випромінювання для структурування свіжоприготовлених ПРС недоцільно в зв'язку з низькою якістю одержаних ЛФС, що зумовлено виникненням пінних структур затверділого РС при його вмісті в суміші більше 2,5% та вкрай низькою міцністю поверхневих шарів.

2. Для зниження газотвірної здатності рідкоскляних ЛФС до 3...5 $см^3/г$, що виготовляють способом ПМЗ, треба використовувати кварцовий пісок, плакований менш ніж 2% РС (за масою), який після сушки на повітрі до сипучого стану, слід обробити мікрохвильовим випромінюванням протягом 5 хв і структурувати у відповідному оснащенні протягом не менше 5 хв.

3. Зі збільшенням температури попереднього нагріву робота вибивання

ПРС структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі, що містять від 0,5% до 2,5% РС, знижується з 185…15 Дж до нуля при температурі попереднього нагріву від 800 до 1100 °С.

4. Вибивання стрижнів або їх частин, що структуровані за способом ПМЗ, у яких після контакту з залитим в ливарну форму розплавом не перевищила 600 °С, рекомендовано здійснювати шляхом занурення виливків в воду.

5. З підвищенням тривалості зберігання на повітрі (від 3 до 168 год) ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом, її водостійкість збільшується, що обумовлено карбонізацією гідратованого СН в манжетах між піщинками структурованої суміші. Виходячи з цього, для видалення у воді стрижнів з ПРС, структуровані за способом ПМЗ і не зазнавших нагрівання понад 600 °С, рекомендовано:

- зберігати стрижні на повітрі в закритій тарі не більше 96 годин;

- занурювати виливок у воду з температурою не менше 40 °С після досягнення температури на зовнішній поверхні виливка 100...200 °С.

6. У ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом, міцність визначається масштабним фактором їх структурних складових – площею поверхні контакту піщинки і манжетою з дегідратованого СН, та підвищується зі збільшенням вмісту в суміші СН, уявної щільності використаного для плакування натрієвого РС, середнього діаметра зерен піску.

7. Характер руйнування структурованої суміші, при цьому не залежить від вмісту РС, яке пішло на плакування кварцового піску, але залежить від тривалості процесу ПМЗ, зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного до змішаного і когезійного.

8. Оптимальний склад ПРС, що структурована впродовж 5 хв за процесом ПМЗ в печі з потужністю магнетрону 900 Вт, є суха сипуча суміш кварцового піску з натрієвим РС, яка пройшла крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого РС (M_{SiO2}=2,8…3,0, ρ_2=1,42….1,44 г/см^3) у кількості 1,5% (за масою, понад 100% піску).

9. Використання ПРС оптимізованого складу для виготовлення ЛФС за

ПМЗ-процесом при раціональному рівні його технологічних параметрів забезпечить структурованим ПРС наступний рівень властивостей: $\sigma_{СТ}$ = 2,9...3,0 МПа, Ос = 0,26…0,30 %, К = 150…155 од, $А_{20}$ = 92…100 Дж, ρ = 1720…1730 кг/м^3, Δ_ε = 0,32%, що відповідає сучасним вимогам до ЛФС.

10. Вперше встановлено функціональні залежності між обсипальністю, крихкістю, міцністю, роботою вибивання виливків з форм і стрижнів з виливків і рядом параметрів і властивостей структурованих ФСС, які визначають на зразках за стандартними і загальноприйнятими методиками.

11. Міцність на стиск, уявна щільність, стріла прогину та робота вибивання ПРС структурованої за ПМЗ-процесом зростають, а обсипальність знижується зі зменшенням розмірів використаних в її складі піщано-рідкоскляних конгломератів і зі збільшенням маси в них натрієвого РС. В той же час, газопроникність сумішей збільшується з підвищенням розмірів конгломератів і вмісту в них РС.

12. Вперше визначено інтегрально-ефективні величини теплофізичних параметрів кварцового піску, плакованого РС в кількості від 0,5 до 3,0% (за масою, понад 100% піску) і структурованого за способом ПМЗ при заливці в нього алюмінієвого сплаву і сірого чавуну.

13. Піщано-рідкоскляні конгломерати з розміром більше 0,315…0,4 мм, що структуровані за ПМЗ-процесом, характеризуються рівнем теплофізичних властивостей притаманним теплоізоляційним сумішам, які використовують в ливарних формах.

14. Якість поверхонь ливарної форми, виготовленої за способом ПМЗ, і, відповідно, якість поверхні виливків підвищується, зі збільшенням в суміші кількості РС (від 0,5 до 2,5%), використаного для плакування кварцового піску, та зі зниженням коефіцієнта термічного лінійного розширення матеріалів постійних моделей виливків.

РОЗДІЛ 6. ПРОМИСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ ЛИВАРНИХ ФОРМ ТА СТРИЖНІВ З ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ, ЩО СТРУКТУРОВАНІ ЗА СПОСОБОМ ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО ЗАТВЕРДІННЯ, ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ

6.1 Тривалість та умови зберігання плакованого піску на повітрі

Одним з недоліків РС, як сполучного матеріалу, є його карбонізація в твердому стані при контакті з повітрям. Зокрема, Фіговський О.Л. та Кудрявцев П.Г. у роботі [391] зазначають, що на повітрі, затверділе РС повільно втрачає гідратаційну воду та поглинає з повітря вуглекислий газ. Це явище викликає в РС міграцію іонів натрію до поверхні його контакту з повітрям, виникнення кристалічних карбонатних структур та формування маловодного кремнеземного каркасу, що призводить до підвищення водостійкості затверділого РС.

Карбонізація відбувається як в шарі РС на плакованих піщинках, так і в манжетах структурованої ПРС та зумовлена хемосорбцією вологи і вуглекислого газу з повітря поверхнею шару РС, його насиченням вологою, розчиненням вуглекислого газу у цій волозі та проходженням наступних хімічних реакцій [392, 393]:

$$Na_2O\times3SiO_2+CO_2+6H_2O\rightarrow Na_2CO_3+3H_4SiO_4, \quad (6.1)$$

$$Na_2O\times3SiO_2+2CO_2+7H_2O\rightarrow 2NaHCO_3+3H_4SiO_4, \quad (6.2)$$

$$Na_2O\times3SiO_2\times3H_2O+CO_2+3H_2O\rightarrow Na_2CO_3+3H_4SiO_4, \quad (6.3)$$

$$Na_2O\times3SiO_2\times3H_2O+2CO_2+4H_2O\rightarrow 2NaHCO_3+3H_4SiO_4. \quad (6.4)$$

Відповідно до (6.1)...(6.4) в результаті карбонізації в затверділому РС утворюється не тільки карбонат або бікарбонат натрію, але і нерозчинна у

воді ортокремнієва кислота. Згодом, ортокремнієва кислота, яка є хімічно нестійким з'єднанням, може поліконденсуватися, перетворюючись в дікремнієву або пірокремневу кислоту з виділенням води за реакціями:

$$2H_4SiO_4 \rightarrow H_2Si_2O_5 + 3H_2O, \quad (6.5)$$

$$2H_4SiO_4 \rightarrow H_6Si_2O_7 + H_2O. \quad (6.6)$$

Тобто, карбонізація РС в плакованому шарі піщинок та манжетах між ними в ПРС повинна приводити не тільки до появи в його складі карбонатів натрію, але і за рахунок цього до певної зміни технологічних та механічних властивостей сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, розчинності СН структурованих сумішей у воді і т.д.

Як і для будь-якого іншого хімічного процесу, процес карбонізації РС на піщинках проходе в часі, а його швидкість та завершеність багато в чому залежить від умов зберігання як плакованого піску, так і структурованої суміші. Виходячи з цього доцільно дослідити кінетику процесу карбонізації в шарі РС та визначити припустиму тривалість зберігання плакованого РС піску на повітрі, яка є часом з моменту завершення плакування піску РС до моменту початку його структурування за ПМЗ-процесом.

Згідно з методикою кінетику карбонізації на повітрі встановлювали за результатами визначення величини зміни маси шару РС товщиною 20…30 мкм в часі, нанесеного на поверхню порожніх скляних куль ∅50 мм. Результа-ти цих досліджень представлені у вигляді відповідних залежностей на рис. 6.1.

Аналіз ходу залежностей на рис. 6.1 показує, що в процесі карбонізації затверділого (частково дегідратованого) РС в тонких шарах практично відсутній індукційний період, а зміна маси шару РС носить екстремальний характер. Тобто, з моменту закінчення сушіння шару РС і початку проведення вимірювань маса куль збільшується, що свідчить про ймовірне проходження карбонізації відповідно до рівнянь (6.3) і (6.4).

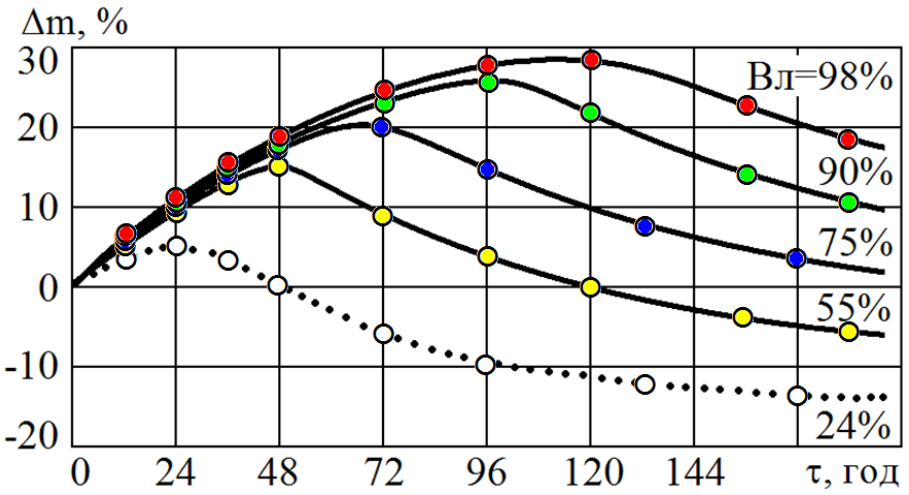


Рисунок 6.1 – Залежність відносної зміни маси шару РС від тривалості витримки на повітрі в клімат-камері і його відносної вологості при 24±1 °С

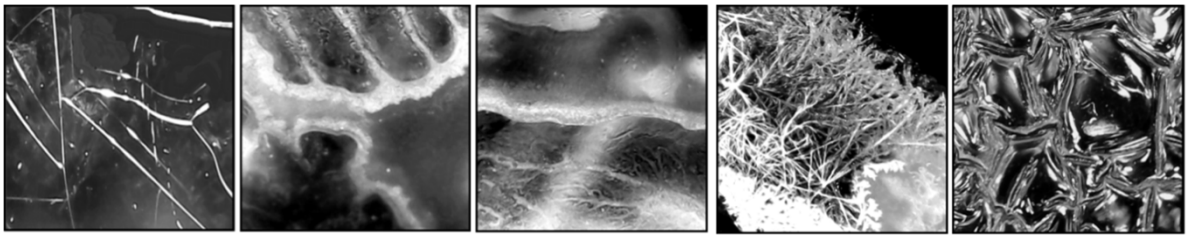
При цьому, зі збільшенням відносної вологості повітря інтенсивність карбонізації та маса плакованих куль зростають, у зв’язку з утворенням в шарі РС карбонату і гідрокарбонату натрію. Подальша витримка куль в кліматичній камері при заданих параметрах призводить до зменшення їх маси незалежно від величини відносної вологості повітря. Таку закономірність можливо пояснити завершенням реакцій карбонізації (6.3) і (6.4) і в подальшому часі проходженням реакцій поліконденсації (6.5) і (6.6) з виділенням води при утворенні дікремнієвої або пірокремнієвої кислот.

При відносній вологості повітря 24% зниження маси в шарі РС настільки велике, що через 2,5 доби витримки в кліматичній камері маса плакованих куль стає менше їх початкової маси (див. рис. 6.1). Мабуть, така закономірність пов'язана з незначною карбонізацією РС, що обумовлено поглинанням вуглекислого газу повітря їдким натром (NaOH), присутнім в даному експерименті в кліматичній камері в чистому вигляді для зниження відносної вологості повітря, випаровуванням води при поліконденсації, утворенням ортокремнієвої кислоти і дегідратацією РС.

Під час поліконденсації вищі кременієві кислоти утворюють складні (лінійні, розгалужені, змішані) просторові структури [393]. У тонкому шарі

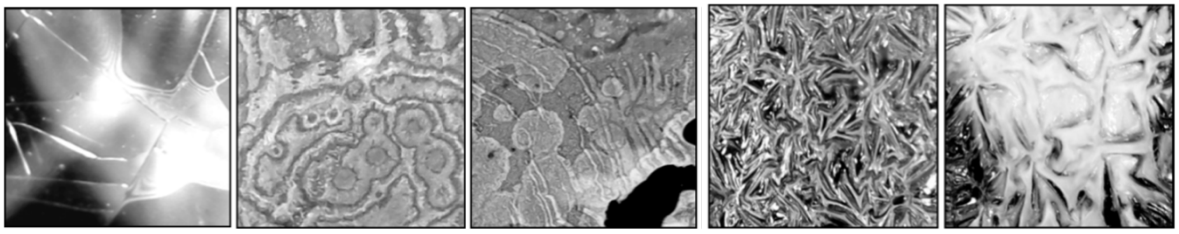
затверділого РС такі кремнієві кислоти, як складова структури матеріалу, повинні проявляти себе у вигляді безбарвних плівок самої різної текстури і розмірів, а карбонат (бікарбонат) натрію має бути у вигляді білого наліту або окремих кристалів білого кольору на поверхні шару.

Підтвердженням викладеного є вигляд карбонізованої поверхні плакованих шарів на кулях через 5 діб (див. рис. 6.2) і через 10 діб (див. рис. 6.3) їх витримки в кліматичній камері.



а б в г д

Рисунок 6.2 – Вигляд шару РС (×25) після 5 діб витримки на повітрі з відносною вологістю 24% (а), 55% (б), 75% (в), 90% (г) і 98% (д)



а б в г д

Рисунок 6.3 – Вигляд шару РС (×25) після 10 діб витримки на повітрі з відносною вологістю 24% (а), 55% (б), 75% (в), 90% (г) і 98% (д)

Слід зазначити, що при відносній вологості 24% і пониженому вмісті вуглекислого газу в повітрі рідкоскляний шар практично не карбонізований ні через 5 діб (див. рис. 6.2,а), ні через 10 діб (див. рис. 6.3,а). При цьому, в шарі через 5 діб виникли тріщини, а через 10 діб, можливо у зв'язку з високим ступенем зневоднення, шар відшарувався від поверхні скляної кулі.

Як показує практика використання та структурування ПРС за способом ПМЗ, карбонізація РС на плакованому піску після його структурування призводить і до збільшення обсипальності, і зниження міцності виробів з нього. Для збереження високої технологічності плакованого піску при його використанні більше ніж чим через добу (до місяця) після плакування, його потрібно зберігати в герметичній ємності з 1…3 г сухого NaOH з розрахунку на 10…15 кг плакованого кварцового піску.

Водні розчини СН – хімічно-активні матеріали, тому введення в РС будь-якої речовини (модифікатора), вірогідно, повинно відображатися не тільки на властивостях структурованих ПРС, а і на карбонізації РС в них.

В якості піддослідних речовин-модифікаторів РС використовували (за масою): цукор – 1%, бікарбонат натрію – 5%; хлористий натрій – 5%, гліцерин – 3%, розчин каніфолі (5%) в гліцерині – 3%, 5% та 10%, карбамід – 5%, хлористий натрій йодований – 5%, каніфоль – 1%, пари ізопропілового спирту для обробки висушеного шару РС впродовж 30 хв. Вигляд поверхні шарів РС з речовинами-модифікаторами через 48 годин витримки в кліматичній камері при відносній вологості 75% наведені на рис. 6.4.

Аналіз вигляду шарів РС з речовинами-модифікаторами через 48 годин витримки в кліматичній камері (див. рис. 6.4) показує, що жоден з використаних модифікаторів не попереджає карбонізацію РС.

На рівень межі міцності суміші на стиск, при інших рівних умовах, істотно впливає як вихідна (до плакування) вологість кварцового піску, так і вологість плакованого шару на кварцовому піску в момент початку його структурування за ПМЗ-процесом, про що свідчать залежності на рис. 6.5 [394].

Відповідно до залежностей на рис. 6.5, зі збільшенням вологості піску до та після його плакування міцність структурованої суміші за ПМЗ-процесом зменшується. Тому для реалізації структурування за способом ПМЗ доцільно використовувати кварцовий пісок для плакування РС з початковою вологістю не більше 0,2%, а після сушіння на повітрі плакований пісок доцільно додатково сушити впродовж 3…4 хв мікрохвильовим випромінюванням.

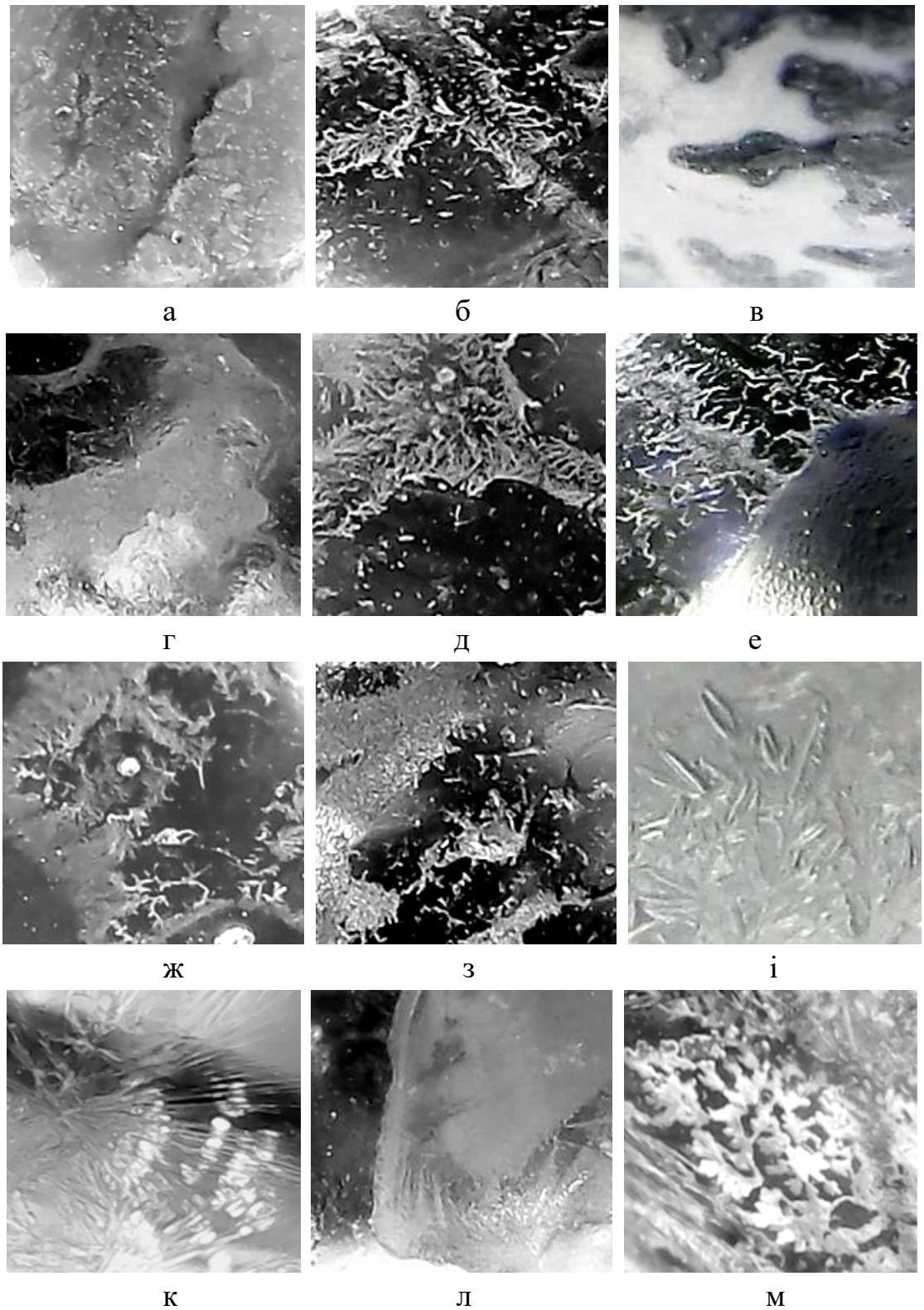


Рисунок 6.4 – Вигляд через 48 год (×30) шару РС: без модифікатору (а), з цукром (б), з бікарбонатом натрію (в), з хлористим натрієм (г), з гліцерином (д), з розчином каніфолі у гліцерині 3% (е), 5% (ж) та 10% (з), з карбамідом (і), в парах ізопропілового спирту (к), з йодованим хлористим натрієм (л), з каніфоллю (м)

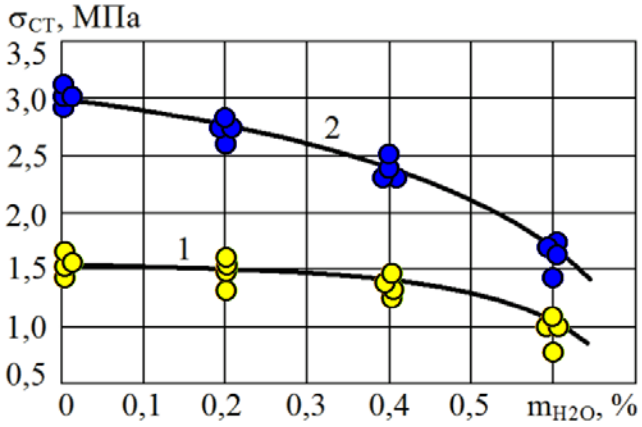


Рисунок 6.5 – Залежність міцності на стиск ПРС з 1% РС, структурованої протягом 3 хв за способом ПМЗ, від вихідної вологості кварцового піску та при сушінні плакованого піску впродовж 1 години на повітрі (1), а також впродовж 1 години на повітрі і 3 хв в мікрохвильовому випромінюванні (2)

Тобто, додаткова обробка плакованого РС кварцового піску мікрохвильовим випромінюванням після його попереднього сушіння на повітрі дозволяє знизити вміст води в плакованому шарі кварцового піску з 17...20% (за масою плакованого шару) до 2...3% [394] та значно (див. рис. 4.13,б) підвищити міцність структурованої ПРС. Така залежність міцності вірогідно, пояснюється структурою манжет, що формуються під час структурування ПРС за ПМЗ-процесом. Тобто, чим вище вихідний вміст води у плакованому шарі, тим вище вірогідність утворення в структурованій суміші не манжет з щільного СН, а його пінних структур, що є причиною зниження її міцності.

Неухильне зниження масового вмісту води у складі частково дегідратованого РС під час його зберігання за будь-яких умов визначають відповідні зміни і в міцності структурованої ПРС від тривалості зберігання плакованого кварцового піску та його початкової температури при структуруванні.

Підтвердженням цього є залежності впливу терміну зберігання та початкової температури структурованого кварцового піску, плакованого 3% РС, протягом 3 хв мікрохвильовим випромінюванням в печі з магнетроном

номінальною потужністю 900 Вт на величину межі міцності на стиск, які представлені на рис. 6.6.

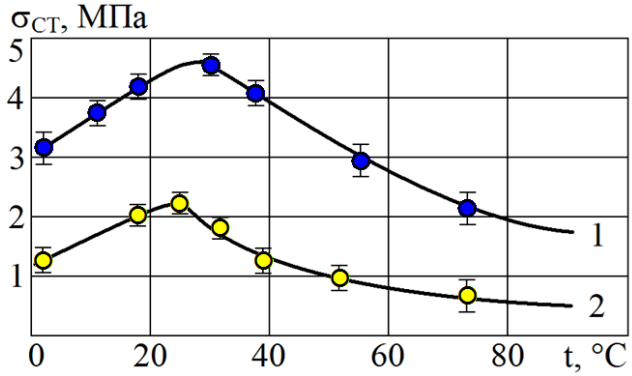


Рисунок 6.6 – Залежність межі міцності на стиск структурованого плакованого кварцового піску від початкової температури:
1 – термін зберігання плакованого піску на повітрі – 1 доба;
2 – термін зберігання плакованого піску в герметичній тарі – 1 рік

З аналізу ходу залежностей на рис. 6.6 випливає, що межа міцності на стиск в результаті тривалого зберігання плакованого кварцового піску навіть в герметично закритій тарі зменшується в 2...3 рази в порівнянні зі свіжоплакованою сумішшю.

Така закономірність пояснюється тим, що навіть при зберіганні в герметично закритій тарі, вуглекислий газ, що залишився в повітрі межзеренного простору піску, призводить до часткової карбонізації РС. При цьому, максимальні значення межі міцності мають суміші, що структуровані з початковою температурою піску 20...26 °С.

Зниження межі міцності суміші, структурованої з початковою температурою понад 26 °С, вочевидь, пов'язане зі зниженням об’єму конденсату, що виділяється на зернах піску під час їх паро-мікрохвильової обробки.

Тобто, ця обставина обмежує насичення СН водою і, відповідно, не дозволяє сформувати великі манжети між ними. У той же час зниження початкової температури плакованого піску нижче 20 °С так само призводить

до зменшення межі міцності структурованої суміші, що мабуть пов'язано з обмеженим часом тривалості структурування і, відповідно, незавершеністю процесу дегідратації РС в манжетах.

Одним з показників стабільності ЛФС є величина межі міцності на стиск в їх різних частинах та якість поверхні ЛФС. З метою виявлення такої закономірності кварцовий пісок плакований 3% РС, який зберігався в герметичній тарі 1 добу та 1 рік, маючи вихідну температуру 2...76 °С, структурували протягом 3 хв за ПМЗ-процесом в циліндричних витрусних ящиках ∅30×220 мм. Після структурування стрижні розрізали і визначали їх межу міцності на стиск. Отримані залежності представлені на рис. 6.7 та 6.8,а, вигляд стрижнів зі структурованого плакованого піску, що зберігався в герметичній тарі 1 рік – на рис. 6.8,б.

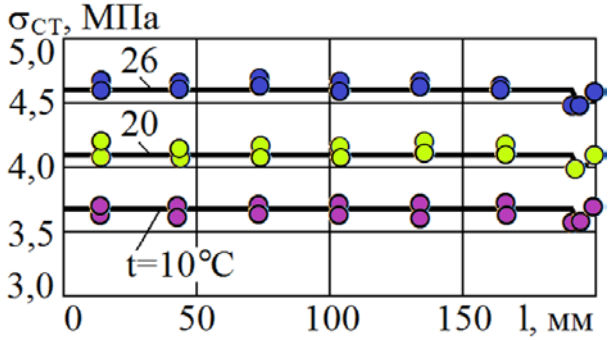
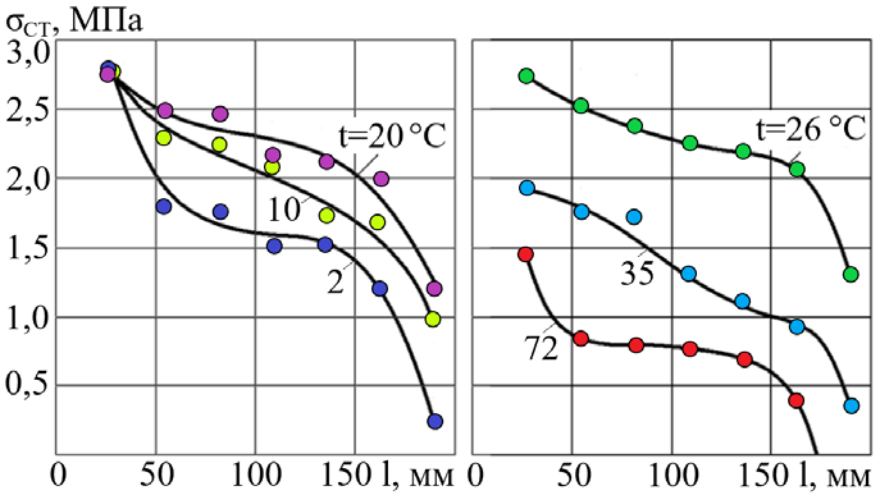


Рисунок 6.7 – Залежності величини межі міцності на стиск структурованого плакованого кварцового піску, що зберігався в герметичній тарі впродовж 1 доби від віддалення від ВЗ і його початкової температури

Встановлено (див. рис. 6.7), що стрижні, які структуровані з ПРС з початковою температурою в межах від 10 до 26 °С після 1 доби його зберігання не залежно від віддалення суміші від ВЗ мають міцність 3,5…4,7 МПа та високу якість поверхні. В той же час міцність стрижнів, які структуровані із плакованого кварцового піску, що зберігався впродовж 1 року в герметичній тарі, зменшується з віддаленням від місця розташування ВЗ (див. рис. 6.8,а).



а

б

Рисунок 6.8 – Залежності межі міцності на стиск структурованого плакованого кварцового піску, що зберігався в герметичній тарі впродовж 1 року від віддалення від ВЗ і його початкової температури (а), вигляд стрижнів, виготовлених за способом ПМЗ з різною початковою температурою (б)

Найбільшу міцність (1,5...2,7 МПа) мають стрижні (див. рис. 6.8,а), що структуровані з початковою температурою 20...26 °С. При цьому, за візуальною оцінкою (див. рис. 6.8,б), незалежно від температури структурування якість поверхні всіх стрижнів вкрай низька. Причиною цього, мабуть, є як процеси конденсації водяної пари на поверхні стрижневого ящика під час структурування ПРС, так і карбонізації в ній РС під час її зберігання.

Таким чином для виготовлення ЛФС за способом ПМЗ слід використовувати свіжоприготовлений плакований 0,5...2,5% РС кварцовий пісок з початковою температурою 20...26 °С і вологістю СН 2...3% при початковій вологості неплакованого кварцового піску не більше 0,2%.

6.2 Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі

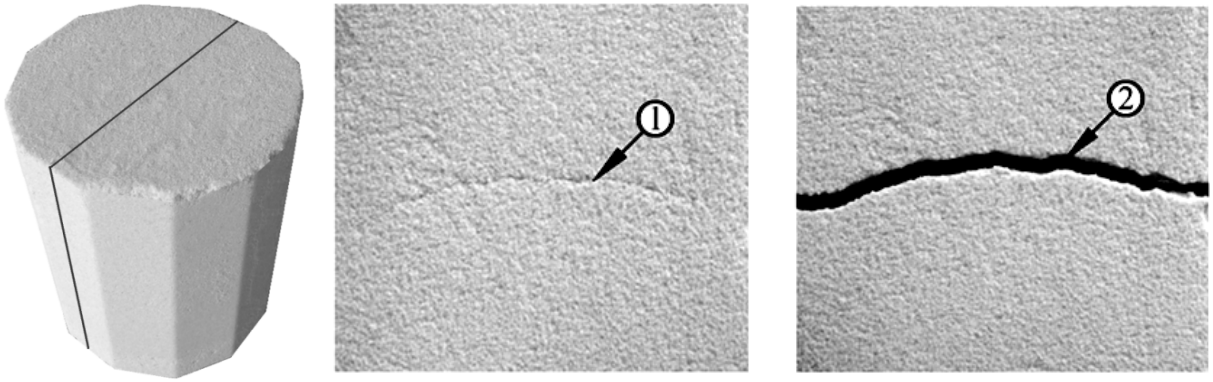
Виготовлення піщано-рідкоскляних ЛФС за ПМЗ-процесом виключає необхідність їх подальшого сушіння [395]. Проте, як показала практика, при певних умовах виробництва стрижні, що виготовлені за ПМЗ-процесом, незважаючи на високу початкову міцність і зовнішню цілісність, розламуються при маніпуляціях з ними або при складанні форми, або під дією динамічного удару рідкого металу об них. Причина цього – виникнення під час структурування плакованого піску всередині стрижня шару низької міцності. Тобто, причиною руйнування стрижнів з ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом є їх внутрішні тріщини.

Для досліджень процесу виникнення внутрішніх тріщин використовували ПРС, плаковану 2,5% РС. Стрижні мали вигляд багатогранного усіченого конуса з діаметром найбільшої підстави 110 мм (маса стрижня 2,4 кг).

Тривалість обробки суміші мікрохвильовим випромінюванням при структуруванні за ПМЗ-процесом в печі з потужністю магнетрону 700 Вт становила 8 хв. Перерву в процесі обробки мікрохвильовим

випромінюванням здійснювали через 4 хв з моменту початку структурування ПРС шляхом відключення магнетрона мікрохвильової печі на 60 с.

Дослідження структури стрижня, що представлений на рис. 6.9,а з лінією розрізу, який був структурований за ПМЗ-процесом в переривчастому режимі мікрохвильового випромінювання, показало, що при такому режимі структурування ПРС в стрижнях з'являється прошарок піску з ослабленими міжзеренними зв'язками (внутрішня тріщина), що представлено на рис. 6.9,б.



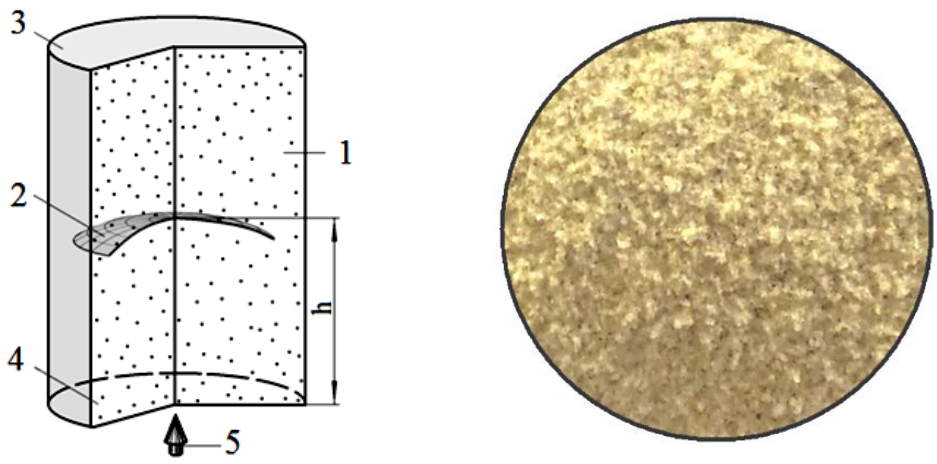
а б

Рисунок 6.9 – Вигляд експериментального стрижня (а), внутрішньої тріщини в закритому (1) і розкритому (2) стані (б)

Тобто, внутрішня тріщина в незруйнованому стрижні являє собою шар слабо пов'язаних між собою піщинок товщиною в 1...2 піщинки, який не має виходу на поверхню стрижня і розташована перпендикулярно напрямку руху фронту структурування суміші, схема та вигляд, якого надано на рис. 6.10.

Для встановлення механізму виникнення внутрішніх тріщин визначили відносне лінійне розширення сухого неплакованого піску і сухого плакованого піску з 1% і 2,5% РС в залежності від часу їх нагрівання мікрохвильовим випромінюванням на повітрі і в паро-мікрохвильовому середовищі.

Результати дилатометричних досліджень при мікрохвильовій обробці ПРС в паро-мікрохвильовому середовищі у вигляді відповідних залежностей представлені на рис. 6.11.



а б

Рисунок 6.10 – Схема (а) та вигляд (б) поверхні фронту структурування кварцового піску, плакованого 1,5% РС: 1 – внутрішня поверхня стрижня; 2 – внутрішня тріщина; 3 – вільна поверхня стрижня; 4 – нижній торець стрижня; 5 – напрямок руху водяної пари при мікрохвильовій обробці суміші

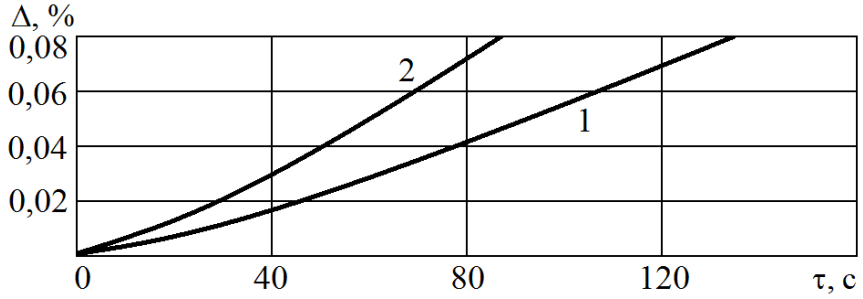


Рисунок 6.11 – Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску (1) і сухого кварцового піску в середовищі водяної пари (2) від часу впливу мікрохвильового випромінювання

З аналізу ходу залежностей на рис. 6.11 випливає, що величина зміни відносного лінійного розширення сухого кварцового піску за час випробувань менше, ніж його відносне лінійне розширення в паро-мікрохвильовому середовищі. Така закономірність пояснюється тим, що діелектрична проникність кварцового піску в рази менше діелектричної проникності води.

З цієї причини, в паро-мікрохвильовому середовищі водяна пара, конденсуючись на поверхні піщинок, віддає їм своє тепло і надалі повторно випаровується, нагріваючись в результаті дії на конденсат мікрохвильового випромінювання. Все це інтенсифікує процес нагрівання піску і, відповідно, збільшує величину його лінійного розширення в часі в порівнянні з піском, що нагрівають мікрохвильовим випромінюванням в повітряному середовищі, діелектрична проникність якого близька до 1.

Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, плакованого 1% РС і просіяного через сито з осередком 0,4 мм, в середовищі повітря та водяної пари від часу впливу мікрохвильового випромінювання представлені на рис. 6.12,а, а на рис. 6.12,б представлено вигляд піщинки і конгломератів піщинок такої суміші.

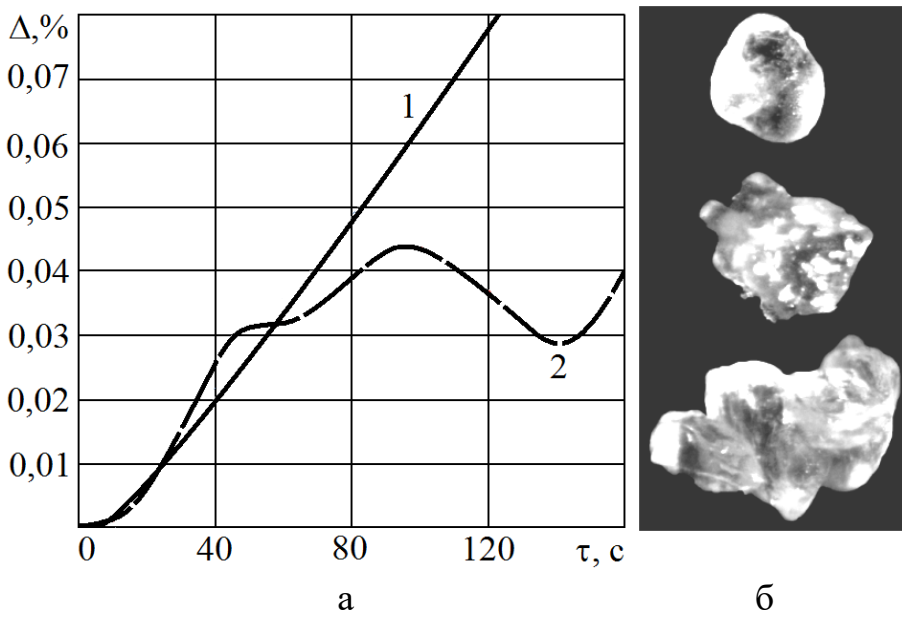


Рисунок 6.12 – Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, який плаковано 1% РС, в середовищі повітря (1) та водяної пари (2) від часу його обробки мікрохвильовим випромінюванням (а), вигляд піщинки і конгломератів піщинок, плакованих 1% РС і просіяних через сито з осередком 0,4 мм (б)

З аналізу ходу залежності 1 на рис. 6.12,а випливає, що сухий плакований пісок в мікрохвильовому випромінюванні в повітряному середовищі розширюється аналогічно чистому кварцовому піску в тому ж середовищі (див. залежність 1 на рис. 6.11), але дещо з більшою інтенсивністю.

Більш інтенсивне нагрівання плакованого піску в даному випадку викликано наявністю на його поверхні частково дегідратованого шару РС (СН), який має більшу діелектричну проникність і, отже, більш високу інтенсивність нагрівання мікрохвильовим випромінюванням [358].

Плакований кварцовий пісок в середовищі водяної пари (див. залежність 2 на рис. 6.12,а) починає розширюватися тільки з 12 с мікрохвильового впливу і його постійне розширення триває до ~47 с. Подальше нагрівання призводить не тільки до припинення збільшення, але і до деякого зниження висоти піску в зразку. Така зміна висоти зразка під час обробки зумовлена його певним ущільненням.

Справа в тому, що випробуваний плакований пісок являє собою суміш, як окремих зерен, так і їх конгломератів, і осколків конгломератів (див. рис. 6.12,б). В середовищі водяної пари спочатку сухі манжети конгломератів при насиченні водою з конденсату переходять в рідкий стан, в результаті чого пов'язані ними зерна піску отримують можливість переміщатися відносно один одного.

Таке переміщення (ущільнення) під власною вагою, підвищуючи уявну щільність суміші, не дивлячись на неухильне підвищення температури піщинок, і призводить до тимчасового зменшення висоти зразка (розширення суміші).

Залежності відносного лінійного розширення сухого піску, плакованого 2,5% РС в повітряному середовищі, сухого піску, плакованого 2,5% РС і просіяного через сито з осередком 0,4 мм в середовищі водяної пари, а також сухого піску, плакованого 2,5% РС і просіяного через сито з осередком 0,63 мм в середовищі водяної пари, від часу впливу мікрохвильового випромінювання представлені на рис. 6.13,а.

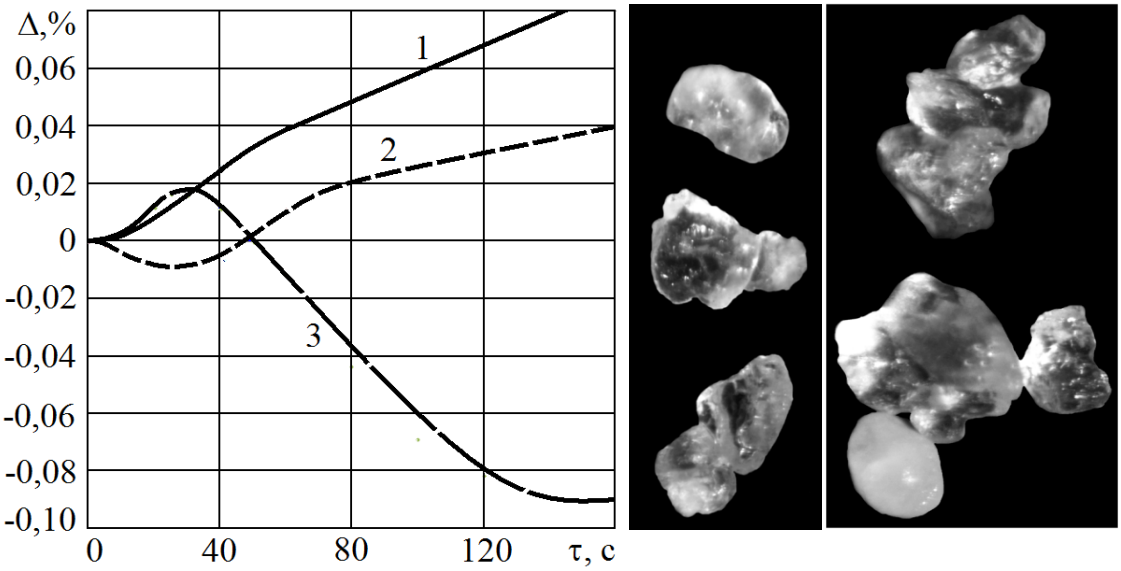


Рисунок 6.13 – Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, плакованого 2,5% РС, в повітряному середовищі (1), сухого кварцового піску, плакованого 2,5% РС і просіяного через сито з осередком 0,4 мм (2) та 0,63 мм (3), в середовищі водяної пари від часу впливу мікрохвильового випромінювання (а), вигляд конгломератів піщинок сухого кварцового піску, плакованого 2,5% РС, і просіяного через сито з осередком 0,4 (б) і 0,63 (в) мм

З аналізу ходу залежностей на рис. 6.13,а витікає, що сухий пісок, плакований 2,5% РС (крива 1 на рис. 6.13,а) в повітряному середовищі під дією мікрохвильового випромінювання розширюється аналогічно чистому кварцовому піску в повітряному середовищі (див. криву 1 на рис. 6.11) і плакованому кварцовому піску 1% РС в повітряному середовищі (див. криву 1 на рис. 6.12,а).

Однак кварцовий пісок, плакований 2,5% РС під дією мікрохвильового випромінювання розширюється інтенсивніше, ніж пісок з 1% РС. В даному випадку це обумовлено як більш високою діелектричною проникністю СН по відношеню до кварцового піску, так і його більшим вмістом у складі ПРС.

Хід кривих 2 і 3 на рис. 6.13,а кардинально відрізняється від ходу кривої 1. Як і в попередньому зразку (див. криву 2 на рис. 6.12,а) це пов'язано

не тільки з наявністю в суміші окремих піщинок (див. рис. 6.13,б), але і їх конгломератів. При цьому як піщинки, так і їх конгломерати у цих сумішах покриті відносно товстим шаром СН, що і є причиною такої зміни характеру в розширенні випробуваного зразка суміші в часі.

Відносна лінійна зміна в оснащенні висоти піску, плакованого 2,5% РС і просіяного через сито з осередком 0,63 мм (див. криву 3 на рис. 6.13, а), з 35 с нагріву зразка носить стійкий від′ємний характер. Тобто в процесі структурування обсяг суміші зменшується, і, отже, підвищується її уявна щільність. Певно, як і в описаному вище випадку, це пов'язано з тим, що дана суміш практично повністю складається з великих і не завжди компактних за формою конгломератів піщинок, які покриті відносно товстим шаром СН (див. рис. 6.13,в).

Як результат, в процесі структурування в паро-мікрохвильовому середовищі в такій суміші локальні переміщення піщинок проходять на відносно більші відстані, що і зумовлює характер і величину зміни висоти зразка суміші при її структуровані.

Виходячи з викладеного, а також зі схеми на рис. 6.14, механізм виникнення внутрішніх тріщин в ЛФС з ПРС, що структурують за ПМЗ-процесом, можна пояснити наступним чином.

Стркутурування плакованного кварцового піску за ПМЗ-процесом передбачає надходження водяної пари з ВЗ, розташованого в нижній частині робочій порожнині стрижневого ящика (опоки), і реалізується виключно під час обробки суміші, яку структурують мікрохвильовим випромінюванням.

При цьому, водяна пара надходить в капілярні канали піску не миттєво, а послідовно їх заповнюючи, що і зумовлює наявність візуально чітко визначеного фронту структурування у суміші в різний час її структурування.

Така послідовність надходження водяної пари з ВЗ в суміш, що структурується, зумовлює і послідовність структурування суміші – тобто неодночасність проходження цих процесів в різних частинах виготовляємого стрижня або ливарної форми.

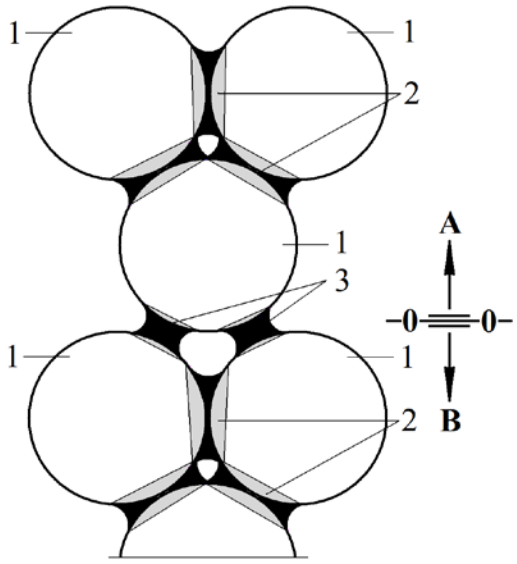


Рисунок 6.14 – Схема елементу структури суміші, що структурована за ПМЗ-процесом, в області внутрішньої тріщини: 1 – піщинка кварцового піску; 2 – манжета між піщинками, що утворилася при безперервній дії мікрохвильового випромінювання; 3 – манжета в області внутрішньої тріщини, що утворилася при переривчастій дії мікрохвильового випромінювання, О-А – напрямок руху фронту структурування

Припустимо, що водяна пара і фронт структурування (див. рис. 6.14) переміщуються в напряму 0-А, а дія гравитації – в напряму 0-В. Якщо під час мікрохвильової обробки відбудеться тимчасове припинення дії випромінювання, то відмінність в характері або швидкості зміни розширення суміші над (напрямок 0-А на рис. 6.14) і під (напрямок 0-В на рис. 6.14) фронтом структурування (див. лінію 0-0 на рис. 6.14) буде реалізовано у вигляді збільшення відстані між сусідніми зернами піску в напрямку, паралельному напрямку переміщення фронту структурування суміші.

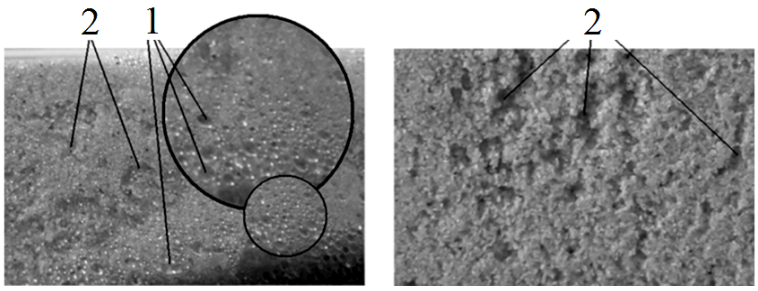
Подальший вплив мікрохвильового випромінюванням приведе до того, що на фронті струткурування між сусідніми піщинками формуються манжети СН, які характеризуються більшою довжиною, меншим поперечним перерізом і, відповідно, меншою міцністю. Надалі саме в цій області виникає внутрішня тріщина, яка веде до руйнування ЛФС у вказаних вище випадках.

Таким чином, виникнення внутрішньої тріщини в ЛФС, які структуровані за ПМЗ-процесом, викликане тимчасовим припиненням процесу обробки суміші мікрохвильовим випромінюванням і пов’язано з відмінностями у величині і характері зміни лінійних розмірів структурованої і неструктурованої частини суміші в оснащенні.

Виходячи з викладеного вище, з метою попередження появи внутрішніх тріщин в ЛФС структурування їх ПРС за ПМЗ-процесом слід проводити при безперервному режимі їх обробки мікрохвильовим випромінюванням.

6.3 Вимоїни на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі

Вимоїни – специфічний поверхневих дефект, притаманний ЛФС з ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, і являють собою поглиблення на поверхні ЛФС від слідів крапель води, що сконденсувались на холодній поверхні модельно-стрижневого оснащення під час структурування і мають вигляд, який представлено на рис. 6.15 [396].



а б

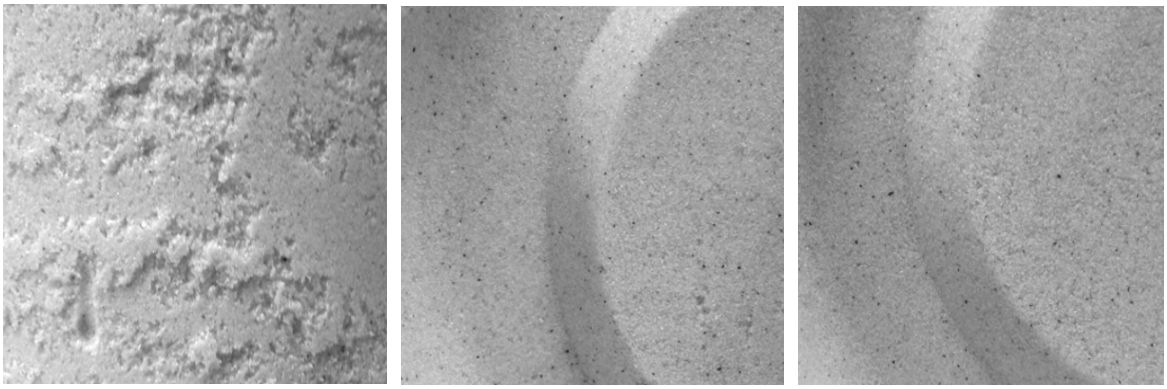
Рисунок 6.15 – Вигляд поверхні стрижня через стінку поліпропіленового стрижневого ящика (а), вид поверхні стрижня після його вилучення з ящику (б): 1 – краплі конденсованої вологи; 2 – дефект вимоїна (×2)

На рис. 6.15,а представлено вигляд поверхні структурованої ПРС з вимоїнами 2 через прозору стіну стрижневого ящика на якій спостерігаються

краплі конденсованої вологи 1. На рис. 6.15,б представлено вигляд вимоїни, яка являє собою поглиблення на поверхні структурованої суміші в місцях конденсації вологи на стінах стрижневого ящика.

Для визначення впливу явища змочування поверхні модельно-стрижневого оснащення водою на можливість появи на поверхні ЛФС вимоїн в поліпропіленовому стрижневому ящику встановлювали попередньо просушені при 200 °С і охолоджені до кімнатної температури вкладені елементи з гіпсу марки Г-3. При цьому, гіпсові елементи, в одному випадку, залишали без будь-якого покриття їх поверхонь, в іншому – поверхні просочували поліметілсилоксановою рідиною (силіконовим маслом), що надавало їм водовідштовхувані властивості.

У дослідженнях використовували кварцовий пісок попередньо плакований 1,5% (за масою) РС. Структурування піску проводили протягом 7 хв при використанні ВЗ масою 1 г. Вид поверхні стрижня з боку поліпропіленової стіни стрижневого ящика і з боку гіпсових закладених в нього елементів представлено на рис. 6.16.



а б в

Рисунок 6.16 – Вигляд поверхні стрижня з боку поліпропіленової стіни (а), гіпсового закладеного елемента (б) і гіпсового закладеного елемента, поверхня якого попередньо була просочена силіконовим маслом (в)

Аналіз зображень на рис. 6.16 показує, що на відміну від поліпропіленової стіни, на гіпсових закладених елементах незалежно від їх просо-

чення силіконовим маслом вимоїни не виникли. Тобто, конденсат на гіпсових поверхнях не утворювався і, відповідно, не поглинався гіпсом. Цей результат є основою для відхилення гіпотези про вирішальне значення поглинання гіпсом конденсату, що виникає на його поверхні під час структурування сумішей за ПМЗ-процесом і стає причиною виникнення вимоїн.

Суттєвою відмінністю гіпсу від поліпропілену та кварцового піску є його більш висока діелектрична проникність. Ця обставина під час мікрохвильової обробки приводить до того, що гіпс гріється швидше ніж поліпропілен та пісок. В свою чергу кварцовий пісок нагрівався швидше за поліпропілен, що і призводило до виникнення вимоїн на поверхні стрижнів, які контактували з поліпропіленовою стіною, та попередило виникнення вимоїн на поверхнях стрижня, що контактували з гіпсом. Виходячи з цього механізм виникнення дефекту вимоїна за отриманими результатами досліджень та прийнятими припущеннями можливо представити у вигляді етапів, спрощена схема яких надана на рис. 6.17.

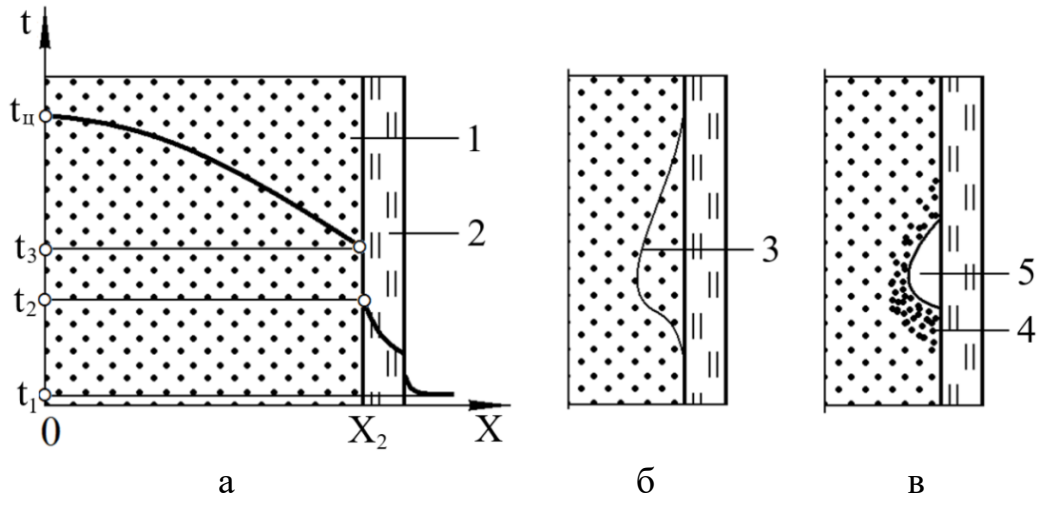


Рисунок 6.17 – Спрощена схема етапів виникнення дефекту вимоїна:
1 – структурована суміш; 2 – стіна стрижневого ящика; 3 – межа області суміші, яка просочена конденсатом; 4 – локально ущільнена суміш; 5 – вимоїна

У зв'язку з тим, що стіни стрижневого ящика 2 нагріваються повільніше, чим прилеглий до них пісок, на поверхні контакту стін ящику з піском

з'являється конденсат 3. З появою конденсату проходить розчинення в краплях води дегідратованого РС суміші (див. рис. 6.17,б). За результатом цього, на локальних ділянках в манжетах суміші дегідратоване РС насичується водою 3 (гідратується). За рахунок переходу РС в рідкий стан, суміш 4 в поверхневому шарі набуває певної плинності та, ущільнюючись під власною вагою та капілярною силою, «сповзає» по похилих і вертикальних стінах оснащення, що призводить до утворення на поверхні стрижня (ливарної форми) раковин – вимоїн 5 (див. рис. 6.17,в).

Отже, припустили, що у попередніх експериментах відносно висока швидкість нагрівання гіпсу мікрохвильовим випромінюванням приводила до того, що прилеглий до гіпсових закладених елементів плакований пісок нагрівався до температур, при яких точка роси під час структурування суміші перебувала не на поверхні чи в глибині гіпсових закладених елементів, а під поверхневим шаром суміші стрижня.

Для попередження виникнення вимоїн необхідно структурування сумішей за ПМЗ-процесом проводити в оснащенні, у якому конденсація вологи на його робочих поверхнях не буде відбуватися. Це можливо якщо під час структурування суміші температура робочих поверхонь оснащення буде завжди більше точки роси водяної пари, яка утворюється з ВЗ.

Припустимо, що тиск НВП повітря в капілярних каналах структурованої ПРС у внутрішній поверхні стрижневого ящика, при температурі t дорівнює:

$$p_1 = w_B \cdot p_{01}, \tag{6.7}$$

де p_{01} – тиск НВП при температурі t_3 (див. рис. 6.17,а);

w_B – відносна вологість повітря у внутрішній поверхні стін стрижневого ящика, при температурі t_3.

Конденсації водяної пари на внутрішній поверхні стін стрижневого ящика не буде, якщо виконується наступна умова:

$$p_1 < p_{02}, \tag{6.8}$$

де p_{02} – тиск НВП при температурі t_2 (див. рис. 6.17,а).

Тобто, прийнявши, що внутрішня поверхня стрижневого ящика буде залишатися сухою при:

$$p_1=p_{02}, \tag{6.9}$$

або:

$$p_{02}=w_B \cdot p_{01}, \tag{6.10}$$

і оскільки $p_{01}=f(t)$ табульовано [397], то, використовуючи наближену формулу, яку отримали за результатом обробки даних [397]:

$$p_{01}=0,71+124,56\cdot10^{-4}\cdot t+37,15\cdot10^{-4}\cdot t^2-34,55\cdot10^{-6}\cdot t^3+96,67\cdot10^{-8}\cdot t^4 , \tag{6.11}$$

і формулу (6.10), знаходимо, що:

$$\Delta t = t_3-t_2 = t-80\cdot(w_B\cdot p_{01})^{0,17}-74. \tag{6.12}$$

За формулами (6.11) і (6.12) побудували номограму для визначення різниці між температурою повітря і точкою роси (Δt) від температури і відносної вологості повітря, яка представлена на рис. 6.18.

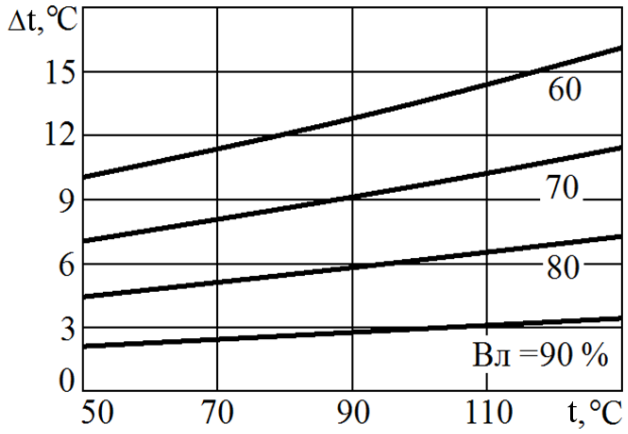


Рисунок 6.18 – Номограма для визначення різниці між температурою повітря і точкою роси від температури і відносної вологості повітря

З аналізу номограми на рис. 6.18 витікає, що для попередження виникнення вимоїн на ЛФС з ПРС, що структурують за ПМЗ-процесом, нагрівання оснащення повинно проходити швидше нагрівання самої суміші.

Іншим варіантом вирішення такої задачі є проведення ПМЗ-процесу в оснащенні, у якого б від самого початку температура перевищувала б початкову температуру суміші і була вище температури точки роси при відносній вологості повітря 100%, тобто вище 100 °С.

В роботі [317] для виготовлення модельно-стрижневого оснащення для ПМЗ-процесу рекомендовано використовувати гіпс марки Г-22, як матеріал, що найбільш придатний для роботи у викладених вище умовах.

Виходячи з того, що використання модельно-стрижневого оснащення з початковою температурою вище 100 °С небезпечно для працівників, з метою забезпечення підвищеної швидкості нагрівання оснащення під дією мікрохвильового випромінювання встановили швидкість нагрівання чистого гіпсу і його сумішей з деякими ТД.

Для виготовлення стрижнів використовували поліпропіленові стрижневі ящики. Зразки вкладених елементів до стрижневих ящиків виготовляли з чистого гіпсу Г-22, а також суміші гіпсу Г-22 та 1% (за масою) ТД, що надано в табл. 6.1 для відповідних зразків.

Таблиця 6.1

Технологічні добавки в гіпсових зразках

№	Хімічна формула ТД	Назва ТД	ГОСТ, ТУ речовини – ТД
1	-	-	-
2	$Fe_2O_3 \cdot TiO_2$	Концентрат ільменіту	ТУ-У: 14-10-005-98
3	$CoO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Силіко-алюмінат кобальту	-
4	CoO	Оксид кобальту	ГОСТ 18671-73
5	Cr_2O_3	Оксид хрому	ГОСТ 2912-79
6	B_4C	Карбід бору	ГОСТ 5744-85
7	SiC	Карбід кремнію	ГОСТ 26327-84

Результати розрахунку швидкості нагрівання чистого гіпсу і його сумішей з ТД представлені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Швидкість підвищення температури (W) зразків з гіпсу марки Г-22 під дією мікрохвильового випромінювання

Зразок № (див. табл. 6.1)	1	2	3	4	5	6	7
W, °С/хв	7,4	9,0	9,2	9,5	13,6	14,0	25,2

З аналізу даних табл. 6.2 витікає, що повільніше гріється чистий гіпс (7,4 °С/хв), а найшвидше – гіпс з додаванням 1% карбіду кремнію (25,2 °С/хв). З даних роботи [317] відомо, що швидкість нагрівання ПРС при обробці мікрохвильовим випромінюванням в залежності від маси ЛФС становить від 6 до 10 °С/хв. Тобто, з отриманих даних витікає, що в залежності від маси суміші, що структурують, розмірів оснащення, що використовують, потужності мікрохвильового випромінювання з метою попередження виникнення на формах та стрижнях вимоїн, структурування їх сумішей за ПМЗ-процесом доцільно проводити в оснащенні, яке виготовлено з чистого гіпсу Г-22 або гіпсу Г-22 з додаванням в нього відповідної кількості ТД.

Про це, також, свідчить вигляд поверхонь стрижня, виготовленого в контакті з поліпропіленової стіною, з стіною з гіпсу без ТД і гіпсу з ТД, які представлено на рис. 6.19.

а б в г д

Рисунок 6.19 – Вигляд поверхні стрижня (×1,5), яка під час структурування контактувала з поліпропіленовою стіною (а), зі стіною з чистого гіпсу (б), гіпсу з 1% CoO (в), гіпсу з 1% Cr_2O_3 (г), гіпсу з 1% B_4C (д)

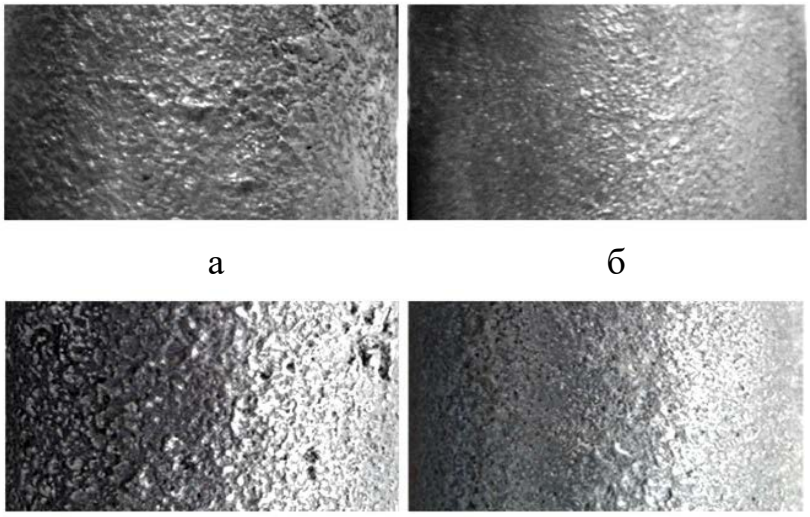
З аналізу зображень на рис. 6.19 витікає, що на поверхні стрижня, який контактував з поліпропіленовою стіною, спостерігаються вимоїни (див. рис. 6.19,а). У той же час на поверхнях, що структурувалися в контакті з закладеними елементами (див. рис. 6.19,б...д) вимоїни відсутні. Тобто, вимоїна на ЛФС з ПРС виникає під час їх структурування в результаті конденсації водяної пари на «холодних» поверхнях оснащення.

Таким чином, для попередження виникнення вимоїн на ЛФС, що структуровані за ПМЗ-процесом, під час структурування необхідно забезпечити швидкість нагрівання оснащення мікрохвильовим випромінюванням більшу ніж швидкість нагрівання суміші. Це можливо досягти, наприклад, використанням оснащення, яке виготовлено з гіпсу марки Г-22 або суміші гіпсу марки Г-22 та відповідних ТД.

6.4 Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння, на структуру, пригар та на шорсткість поверхні виливків

Для якісного визначення впливу типу формувальної суміші на структуру, пригар і якість поверхні виливків ∅32×120 мм, виготовляли форми за Cold-box-amin-процесом з 2% (за масою) сполучної речовини, Resol-CO_2-процесом з 5% сполучної речовини, CO_2-процесом з 5% сполучної речовини і за ПМЗ-процесом з 1% РС. Суміші готували у змішувачі лопатевого типу протягом 5...7 хв. Через 2 години з моменту закінчення виготовлення форми заливали сталлю 30Л. Візуальну оцінку якості поверхні зразків, фрагменти яких представлені на рис. 6.20, проводили після їх очищення металевою щіткою [398].

З аналізу візуальної оцінки якості поверхонь зразків випливає, що з числа випробовуваних сумішей найкраща якість поверхні у зразків, отриманих в формах по Resol-CO_2 (рис. 6.20,б) і ПМЗ-процесу (рис. 6.20,г). Гірша якість поверхні у зразків, відлитих в формах по Cold-box-amin (рис. 6.20,а) і CO_2-процесу (рис. 6.20,в).



а б

в г

Рисунок 6.20 – Вигляд поверхні (×1,5) циліндричних виливків зі сталі 30Л, отриманих в ливарній формі, які виготовлено за Cold-box-amin-процесом (а), Resol-CO_2-процесом (б), CO_2-процесом (в), ПМЗ-процесом (г)

Мікроструктури зразків сталі 30Л, отриманих в різних формах, після їх травлення ніталем, представлені на рис. 6.21.

а б в г

Рисунок 6.21 – Мікроструктура зразків сталі 30Л (×200), які виготовлені в ливарних формах з сумішей за Cold-box-amin-процесом (а), Resol-CO_2-процесом (б), CO_2-процесом (в), ПМЗ-процесом (г)

З рис. 6.21 випливає, що незалежно від виду ливарної форми, мікроструктури всіх зразків подібні і являють собою суміш фериту і перліту. Об'ємний вміст перліту у зразках, отриманих в формах за Cold-box-amin-процесом, складає 48,7...50,5%, за Resol-CO_2-процесом – 58,2...59,9%, за CO_2-процесом – 37,1...39,3% і за ПМЗ-процесом – 49,7...52,1%. Встановлена величина об'ємного вмісту перліту в структурі сталі 30Л опосередковано свідчить про те, що з числа досліджених ливарних форм найбільша швидкість охолодження виливків у формі, виготовленої за Resol-CO_2-процесом, а в формі, виготовленої за CO_2-процесом – найменша. У той же час, швидкість охолодження виливків у формах, виготовлених за ПМЗ-процесом, порівнянна зі швидкістю охолодження виливків у формах за Cold-box-amin-процесом.

Для визначення виду і класифікації пригару за Ф.Д. Оболенцевим, в ливарних формах із ПРС з 1,5% РС, що структуровані за ПМЗ-процесом виготовляли виливки з наступних сплавів: сталь марок 30Л, 20Х27Н18С2Л, сірий чавун СЧ200, бронзи марок БрА9Ж3Л, БрО5Ц5С5, БрО4Ц4С17, алюмінієвий сплав марки АЛ2.

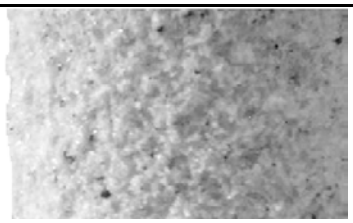
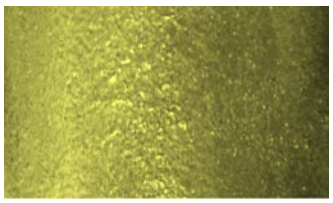
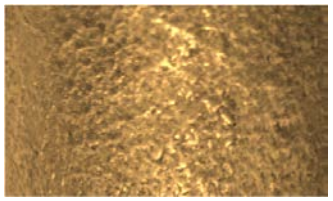
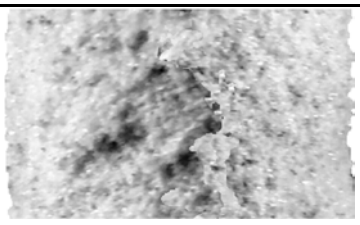
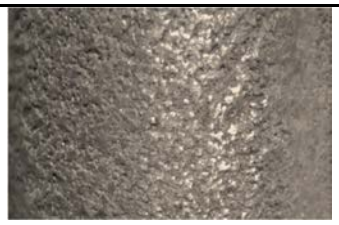
Для заливання всі сплави перегрівали на 100...120 °С вище їх температури ліквідус. Розплави бронзи перед випуском з графітового тигля розкислювали фосфористою міддю. Вигляд поверхонь циліндричних зразків до і після їх механічного очищення надано в табл. 6.3.

Для порівняння в табл. 6.4 надано вигляд поверхонь циліндричних виливків, що виготовлені в формах з ПРС з 5% РС та пройшли сушку при 200 °С впродовж 1 години, де категорія і бал пригара надано за класифікаціями, що були розроблені Ф.Д. Оболенцевим.

З аналізу виду поверхонь (див. табл. 6.3) випливає, що механічний пригар на всіх зразках був відсутній. Виявлений пригар в більшості є термічним про що свідчать результати рентгенофазового складу (див. Додаток З). При цьому шар пригару на сталевих зразках був тендітним і відокремлювався легко вже під час вибивання виливка з форми.

Таблиця 6.3

Вигляд поверхонь циліндричних виливків, що виготовлені за ПМЗ-процесом, категорія і бал пригара за класифікаціями Ф.Д. Оболенцева

Марка сплаву	Вигляд пригару на виливку після його вибивання з форми	Вигляд поверхні виливка після очищення металевою щіткою (для алюмінієвого сплаву – ворсовою щіткою)
Сталь 30Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		
Сталь 20Х27Н18С2Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		
Чавун сірий СЧ200 (пригар слабкий, бал – 2)		
Бронза БрА9Ж3Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		
Бронза БрО5Ц5С5 (пригар слабкий, бал – 2)		
Бронза БрО4Ц4С17 (пригар слабкий, бал – 2)		
Сплав алюмінієвий АЛ2 (пригару немає, бал – 1)		

Таблиця 6.4

Вигляд поверхонь циліндричних виливків, що виготовлені в формах з ПРС з 5% РС, категорія і бал пригара за класифікаціями Ф.Д. Оболенцева

Марка сплаву	Вигляд пригару на виливку після його вибивання з форми	Вигляд поверхні виливка після очищення металевою щіткою
Бронза БрА5 (пригар слабкий, бал – 2)		
Бронза БрА9Ж3л (пригар слабкий, бал – 2)		
Бронза БрО5Ц5С5 (пригар міцний, бал – 3)		
Бронза БрА3О3 (пригар слабкий, бал – 2)		

Пригар на чавунному зразку був пухкий важковидаляємий. Поверхня зразків з бронзи і алюмінієвого сплаву була покрита шаром термічного пригару, що виник в результаті спікання СН в формувальній суміші, прилеглої до поверхні виливків.

Термічний пригар на всіх виливках легко відокремлювався в процесі очищення їх металевою щіткою, при цьому пригар з поверхні виливка зі сплаву АЛ2 видаляли ворсовою щіткою.

В той же час, зображення в табл. 6.4 свідчать, що при литті в форми з ПРС із 5% РС пригар навіть на бронзових виливках стає більш міцнішим по відношенню до пригару на виливках, що виготовлені з використанням ливарних форм, структурованих за ПМЗ-процесом (див. табл. 6.3). Це зумовлено високою кількістю РС (5%) у суміші використаних ливарних форм.

Для визначення шорсткості поверхні зі сплаву АЛ2 виготовляли клиновидні виливки, використовуючи комбіновані ливарні форми з півформ, які були склеєні між собою рідким склом під дією мікрохвильового випромінювання.

Половини таких форм були виготовлені з сумішей, які мали різний вміст РС і структуровані за ПМЗ-процесом. Одна половина такої форми містила 1% РС, інша – 2,5% РС (за масою, понад 100% піску). Вигляд поверхні робочої порожнини форми, форми в зборі після склеювання її половин, форми, що залита розплавом сплаву АЛ2 з різним перегрівом, представлені на рис. 6.22.

В роботі, як було зазначено вище, клиновидні виливки виготовляли не тільки в формах з різним вмістом РС в плакованих шарів, але і заливали розплав при різному перегріві, що витікає з даних табл. 6.5.

а б в

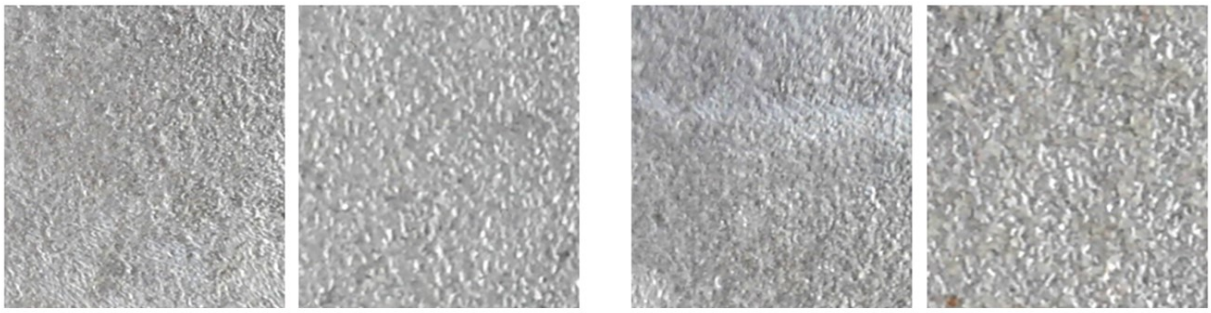
Рисунок 6.22 – Вигляд робочої поверхні форми (а), форма в зборі після склеювання її половин (б), форма залита розплавом сплаву АЛ2 (в)

Таблиця 6.5

Нумерація клиновидних виливків і особливості їх виготовлення

Номер виливка	Масовий вміст РС, що був використано на плакування кварцового піску, %	Температура перегріву розплаву при заливці, °С
1	1	120
2	2,5	
3	1	160
4	2,5	

На отриманих клиноподібних виливках пригар був відсутній. Вигляд литої поверхні клиноподібних виливків з алюмінієвого сплаву АЛ2 представлений на рис. 6.23.



а б в г

Рисунок 6.23 – Вигляд литої поверхні клиноподібного виливка (див. табл. 6.4) №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г), ×7

Результати вимірювання і обчислення параметрів шорсткості поверхні трапецієподібних клиновидних зразків з алюмінієвого сплаву АЛ2 представлені на рис. 6.24 і в табл. 6.6, які свідчать про те, що зі збільшенням вмісту в суміші РС, а також температури перегріву розплаву при заливці в форму, клас шорсткості поверхні виливків збільшується.

В даному випадку шорсткість поверхні змінюється від 5...6 класу за ДСТУ 8981:2020 у зразків, розплав яких при заливці мав перегрів ~120 °С, а пісок був плакований 1% РС, до 10...14 класу у зразків, розплав яких при

заливці мав перегрів ~160 °С, а пісок був плакований 2,5% РС. При цьому, слід зазначити, збільшення перегріву розплаву підвищує шорсткість на 4...6 класів, а збільшення вмісту РС – на 1...3 класів.

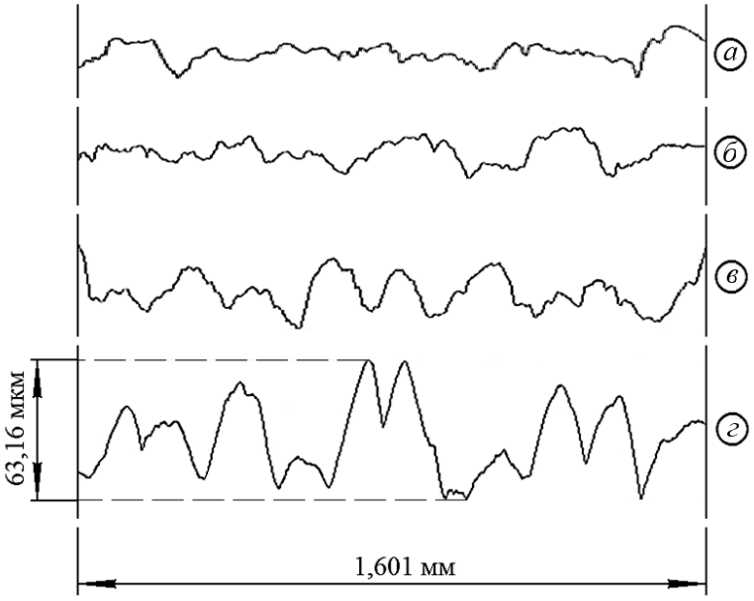


Рисунок 6.24 – Фрагмент комп'ютерного протоколу профілограм поверхонь зразків №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г)

Величини показників шорсткості зразків наведено у табл. 6.6., показники Ra і ступінь точності поверхні відповідно до ДСТУ 8981:2020 циліндричних виливків довжиною від 100 до 250 мм наведено у табл. 6.7. Профілограми поверхні виливків зі сталі 30Л, 40Х24Н18С2Л, сірого чавуну СЧ200, бронзи БрО5Ц5С5, БрА9Ж3Л наведено на рис. 6.25 (див. Додаток Ж).

Тобто, відповідно до даних табл. 6.7 ступінь точності поверхні виливків довжиною від 100 до 250 мм з бронзи, отриманих в форми за ПМЗ-процесом, знаходиться на рівні лиття в оболонкові форми з термореактивних сумішей, а сталевих і чавунних виливків – на рівні лиття під низьким тиском в кокіль без піщаних стрижнів.

Таким чином, з викладеного вище витікає, що якість поверхні виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, не поступається якості поверхні виливків, виготовлених в формах за Cold-box-amin, Resol-CO_2, CO_2-процесом

і знаходиться на рівні якості (за чистотою поверхні) з виливками, що виготовляють в оболонкових формах.

Таблиця 6.6

Величини показників шорсткості зразка

Показник	Розмірність, ISO, ДСТУ	Величина для зразка			
		№1	№2	№3	№4
1	2	3	4	5	6
Вміст РС в ПРС	%мас.	1	2,5	1	2,5
Перегрів розплаву АЛ2 при заливці в форму	°С	120±5	120±5	160±5	160±5
Клас шорсткості	за ISO 1302	9	9-10	10-11	11-12
	ДСТУ 8981:2020	5-6	5-8	9-11	10-14
Середньоарифметичне відхилення (Ra)	мкм	5,19-6,20	6,17-7,52	12,4-20,4	16,6-35,5
Висота нерівності по 10 точкам (Rz)	мкм	22,0-31,2	25,6-27,6	52,5-68,5	77,1-96,2
Максимальна висота нерівностей (Rmax, Ry)	мкм	42,5-32,3	42,1-36,8	85,1-112,0	126,0-191,0
Висота максимального виступу (Rp)	мкм	20,1-10,3	19,4-11,8	47,9-64,5	64,4-101,0
Глибина максимальної западини (Ry, Rm)	мкм	22,1-26,6	20,6-25,0	37,2-47,4	61,7-90,1
Середній крок нерівності (Sm)	мкм	98,6-114,0	135,0-204,0	140,0-186,0	196,0-249,0
Середній крок місцевих виступів (S)	мкм	12,3-14,2	13,6-15,9	17,4-24,6	20,1-31,7

Якщо врахувати, що ПМЗ-процес екологічно безпечніше, ніж Cold-box-amin, Resol-CO_2, і економніше, ніж Cold-box-amin, Resol-CO_2, CO_2-процес, то даний спосіб виготовлення ЛФС, з числа перерахованих способів, при наявності відповідного промислового обладнання та оснащення, є найбільш перспективним для виготовлення дрібного і середнього литва загальномашинобудівного призначення із залізовуглецевих і легкоплавких кольорових сплавів.

Таблиця 6.7

Показник Ra і ступінь точності поверхні відповідно до ДСТУ 8981:2020 циліндричних виливків довжиною від 100 до 250 мм

Сплав виливка	30Л	40Х24Н18С2Л	СЧ200	БрО5Ц5С5	БрА9Ж3Л
Профілограма відповідно до рис. 6.25	а	б	в	г	д
Ra, мкм	12,6	8,7	13,2	10,8	7,6
Ступінь точності поверхні	10	8	10	9	7

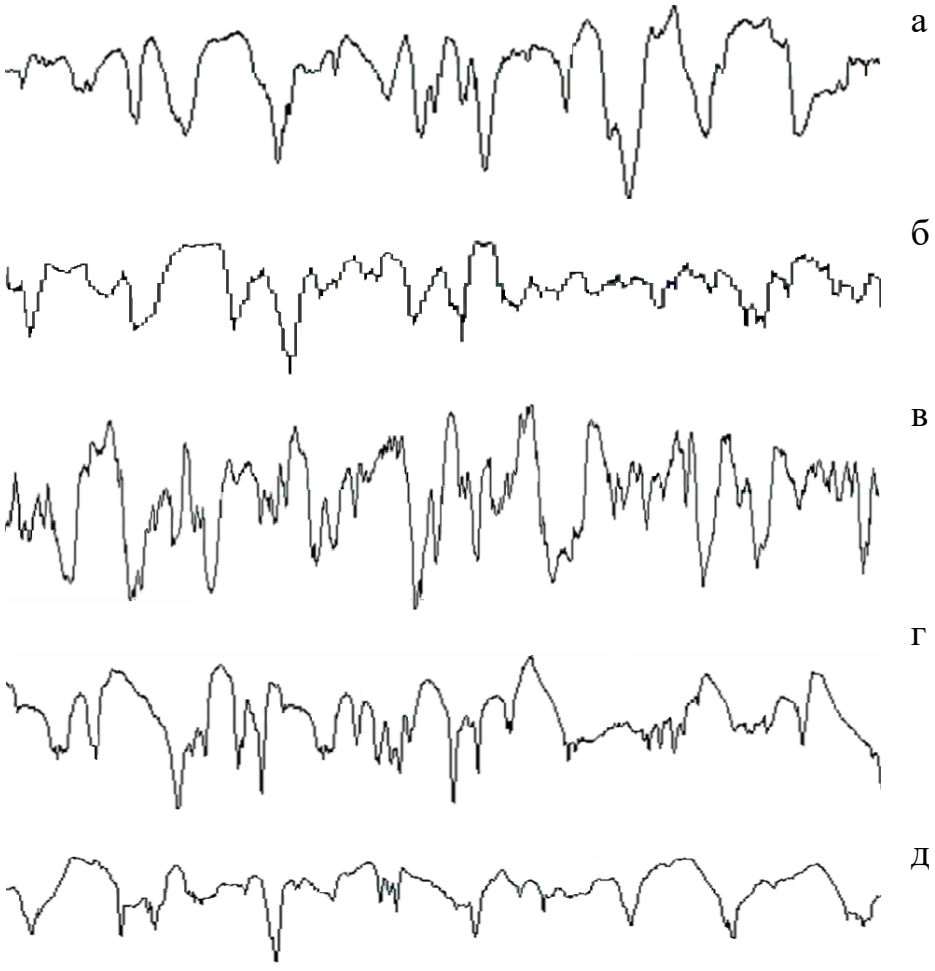


Рисунок 6.25 – Профілограми поверхні виливків зі сталі 30Л (а), 40Х24Н18С2Л (б), сірого чавуну СЧ200 (в), бронзи БрО5Ц5С5 (г), БрА9Ж3Л (д) при довжині траси 3 мм

При цьому ступінь точності поверхні виливків з бронзи, отриманих в форми за ПМЗ-процесом, знаходиться на рівні лиття в оболонкові форми з термореактивних сумішей, а сталевих і чавунних виливків – на рівні лиття під низьким тиском в кокіль без піщаних стрижнів.

6.5 Склеювання форм і стрижнів під дією мікрохвильового випромінювання

Ефект спінювання РС під дією мікрохвильового випромінювання можливо досить ефективно використовувати для склеювання стрижнів, їх частин, стрижнів та ливарних форм, а також ливарних півформ між собою під час їх спарювання при їх використанні без опок. Основною вимогою для склеювання в цьому випадку є змочування поверхонь, що склеюють, водою (РС).

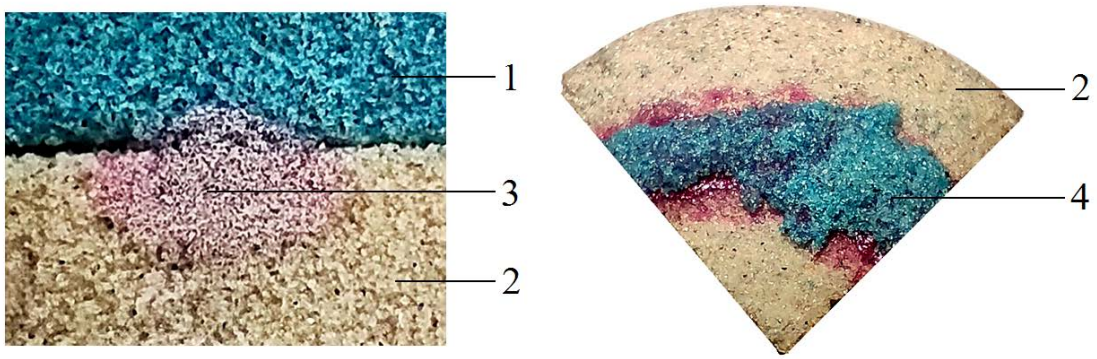
Як такий приклад, на рис. 6.26 представлений вигляд поверхонь склейки піщано-рідкоскляних стрижнів (а, б) та поверхні жовтого стрижня після нанесення на неї підфарбованого червоним пігментом РС (в) [399].

а б в

Рисунок 6.26 – Вигляд поверхні синього (а) і жовтого (б) стрижнів, що склеюються між собою, вигляд поверхні жовтого стрижня після нанесення на неї підфарбованого червоним пігментом РС (в)

На рис. 6.27 представлений вигляд поперечного розрізу клейового шва

з'єднаних між собою стрижнів після їх обробки мікрохвильовим випромінюванням (а) та чверті поверхні жовтого стрижня після руйнування за місцем склейки (б).



а б

Рисунок 6.27 – Вигляд поперечного розрізу клейового шва з'єднаних стрижнів після їх обробки мікрохвильовим випромінюванням (а) і чверті поверхні жовтого стрижня після руйнування за місцем склеювання (б): 1 – синій стрижень; 2 – жовтий стрижень; 3 – клейовий шов; 4 – залишки матеріалу синього стрижня на поверхні клейового шва

Для склеювання на одну зі поверхонь стрижня 2 (див. рис. 6.27,а) наносили РС, зчленовували з відповідною поверхнею стрижня 2 і обробляли мікрохвильовим випромінюванням потужністю 700 Вт протягом 2 хв.

Аналіз зображення на рис. 6.27 показує, що використання РС в якості клею при його мікрохвильовій обробці в складі структурованої ПРС призводить до:

- розчинення в місці просочення стрижня РС манжет між зернами;
- спінювання РС в капілярах суміші та часткового перенесення (на глибину до 5 мм) РС в прилеглий капілярно-пористий простір суміші;
- часткового переміщення зерен суміші в області сполучених поверхонь під дією спіненого РС та дегідратації РС;
- утворення в місці склеювання стрижнів нових, загальних для них піщано-рідкоскляних структур з підвищеним вмістом СН.

За результатами механічних випробувань встановлено, що міцність такого клейового шва на розрив склеєних і цільних зразків, структурованих в результаті конвекційного сушіння при 150 °С протягом 2 годин, в 9,0...9,4 разів нижча за аналогічну міцність самої суміші, що витікає з даних табл. 6.8. (див. співвідношення $\sigma_р/\sigma_{рш}$).

Таблиця 6.8

Міцність ПРС після сушіння та міцність клейового шва після сушіння мікрохвильовим випромінюванням потужністю 900 Вт протягом 2 хв

Вміст РС у суміші, % (за масою, понад 100% піску)	$\sigma_р$, МПа	$\sigma_{рш}$, МПа	$\sigma_р/\sigma_{рш}$
Стрижні після конвекційного сушіння при 150 °С протягом 2 годин			
2	0,45±0,05	0,05±0,02	9,0
4	1,29±0,03	0,14±0,02	9,2
6	1,30±0,02	0,14±0,01	9,3
8	1,31±0,01	0,14±0,01	9,4
Стрижні структуровані за ПМЗ-процесом протягом 4 хв			
0,5	0,34±0,01	≥0,34	≤1
1,5	0,71±0,02	≥0,71	≤1
2,5	1,00±0,05	≥1,00	≤1

З аналізу даних табл. 6.8 витікає, що міцність на розрив клейового шва в суміші, структурованої протягом 4 хв за ПМЗ-процесом, вище аналогічної міцності самої суміші, а глибина проникнення РС в стрижень з боку поверхонь, що склеюють, складає не менше 5 мм.

Слід зазначити, що РС не придатне для склеювання ПРС, структурованих в результаті їх теплового сушіння з підведенням тепла ззовні. Це пояснюється тим, що РС в таких випадках проникає в сполучний стрижень на глибину до 1 мм, так як ПРС, що структурується конвекцією, має вміст РС, зазвичай, від 5%, тобто вся міжпориста структура ЛФС зайнята суцільною плівкою РС та її манжетами між піщинками піску.

Ця обставина не дає змоги клейовому РС просочитися в губ ЛФС на потрібну глибину, що призводить до недостатності створення міцного

клейового з'єднання тіл з таких сумішей.

В даний час при виробництві виливків перед заливкою півформи скріплюють між собою скобами, болтами, вантажами певної маси, зажимами і т.п., або склеюють між собою. Масу вантажу (вантажів) у таких випадках для безстрижневих виливків з урахуванням динамічного удару розплаву при заливці об верхню півформу розраховують за відомою формулою [400, 401]:

$$M_B = k \cdot (H \cdot F \cdot \rho_{Me} - M_{ВП}), \tag{6.13}$$

де k – коефіцієнт, що враховує динамічний удар розплаву при заливці об верхню півформу (k = 1,3...1,5);

H – металостатичний тиск в формі, м (див. рис. 6.28);

F – площа горизонтальної проекції виливка на верхній півформі, м^2;

ρ_{Me} – щільність рідкого металу в формі, кг/м^3;

$M_{ВП}$ – маса верхньої півформи, кг.

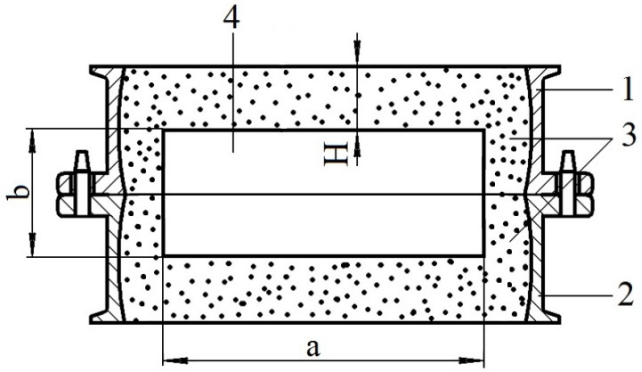


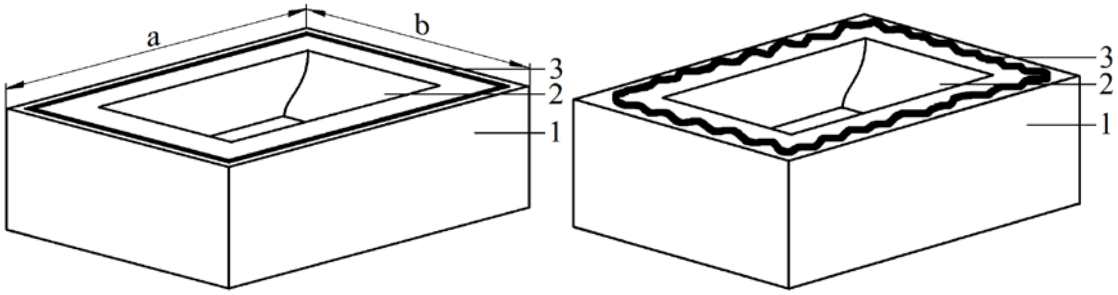
Рисунок 6.28 – Схема для розрахунку маси вантажу для безстрижневого виливка: 1 – верхня опока; 2 – нижня опока; 3 – півформа; 4 – виливок

У цьому випадку величину міцності клейового з'єднання ($\sigma_{РКС}$) при розтягуванні розраховували за формулою:

$$\sigma_{РКС} = \frac{M_B}{F_{КС}}, \tag{6.14}$$

де $F_{КС}$ – площа клейового з'єднання, см^2.

Площу поверхні клейового з'єднання ($F_{КС}$) розраховували, як периметр нанесеного шва 2×(a + b), помножений на його ширину – h (див. рис. 6.29,а). У разі недостатньої міцності клейового з'єднання слід використовувати зигзагоподібний характер нанесення клейового шва, що схематично представлено на рис. 6.29,б.



а б

Рисунок 6.29 – Схема нанесення прямолінійного (а) і зигзагоподібного (б) клейового шва на частини півформ, що сполучаються: 1 – форма; 2 – порожнина для виливка; 3 – клейовий шов

З урахуванням (6.13) і (6.14), прийнявши у формулі (6.13) величину маси верхньої півформи рівною нулю, що припустимо як для оболонкових, так для малих і середніх моноблочних форм, і величину k=1,5, міцність клейового з'єднання розраховували за формулою:

$$\sigma_{РКС} = \frac{k \cdot (H \cdot F \cdot \rho_{Ме})}{2h \cdot (a + b)}, \qquad (6.15)$$

де h – ширина клейового шва, см.

Використовуючи формулу (6.15), побудували номограму для визначення величини мінімально допустимої міцності клейового з'єднання при розтягуванні безстрижневих форм, представлену на рис. 6.30.

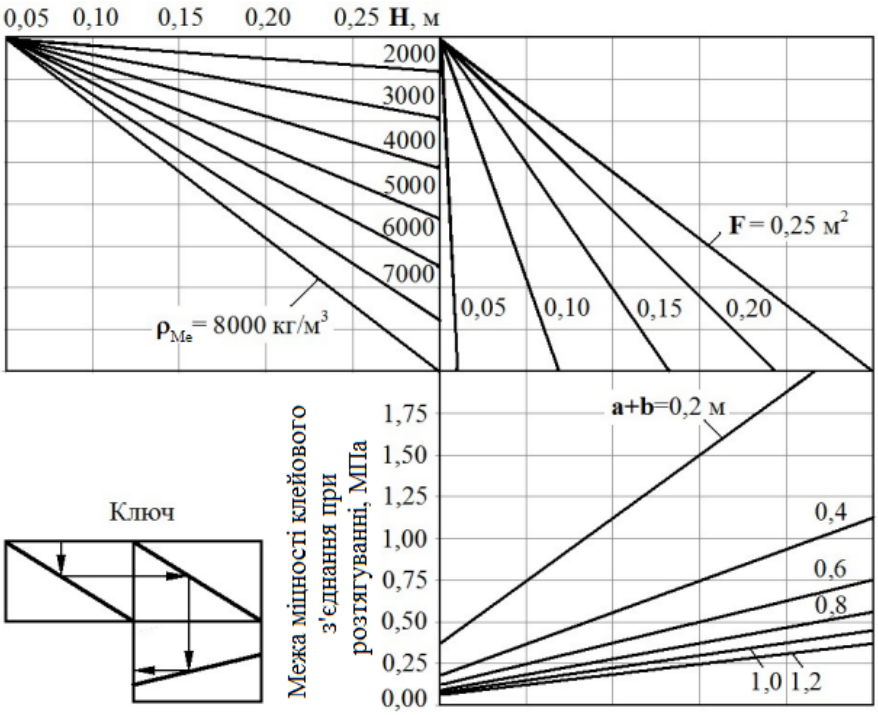


Рисунок 6.30 – Номограма для визначення мінімально допустимої міцності при розтягуванні клейового з'єднання для форм без стрижнів:
H – металостатичний тиск в формі; F – площа горизонтальної проекції виливка на верхній півформі; ρ_{Me} – щільність рідкого металу в формі;
a, b – довжина та ширина ливарної форми

Використовуючи формулу (6.15) або номограму на рис. 6.30, можна в першому наближенні визначити величину мінімально припустимого рівня міцності при розтягуванні клейового з'єднання, що дозволить забезпечити цілісність залитої розплавом форми.

Склеюванням скріплюють не тільки півформи, але також збирають стрижні складної конфігурації, що складаються з окремих частин, стрижні консольного кріплення приклеюють стрижневим знаком до однієї з півформ, щоб уникнути спливання стрижня або його зміщення при заливці (див. рис. 6.31). При формуванні в стрижнях стрижні також можуть склеювати між собою для попередження їх відносного зсуву при заливці і догляду залитого в форму металу по поверхнях сполучення стрижнів [401, 402].

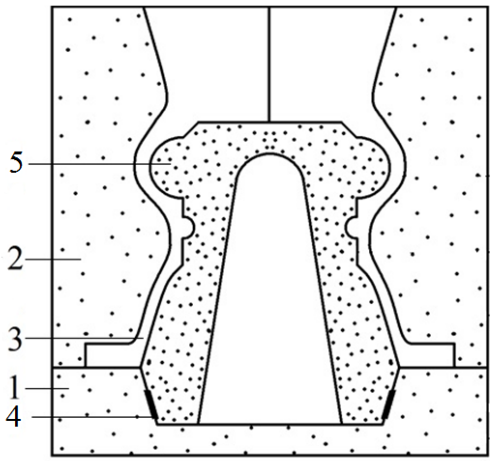


Рисунок 6.31 – Схема форми зі стрижнем: 1 – нижня півформа; 2 – верхня півформа; 3 – порожнина виливка; 4 – клейове з'єднання; 5 – стрижень

Величину міцності клейового з'єднання ($\sigma_{РКС}$) при розтягуванні розраховували за формулою:

$$\sigma_{РКС} = \frac{k \cdot V_{ст} \cdot (\rho_{Ме} - \rho_{ст})}{F_{КС}}, \qquad (6.16)$$

де k – коефіцієнт, що враховує динамічний удар розплаву при заливці о верхню півформу (k = 1,3...1,5);

$V_{ст}$ – об'єм тіла стрижня, м^3;

$\rho_{Ме}$ – щільність рідкого металу в формі, кг/м^3;

$\rho_{ст}$ – щільність стрижня, кг/м^3;

$F_{КС}$ – площа поверхні клейового з'єднання довжиною l та шириною h, см^2.

Використовуючи формулу (6.16), де прийнявши h=1 см^2, а k=1,5, побудували номограму для визначення величини мінімально-допустимої міцності клейового з'єднання при розтягуванні для стрижня, представлену на рис. 6.32.

Таким чином, використовуючи отримані формули або номограми, можна в першому наближенні визначити величину мінімально-допустимої межі міцності на розрив клейового з'єднання, досягнення якої в реальних формах та стрижнях попередить їх руйнування.

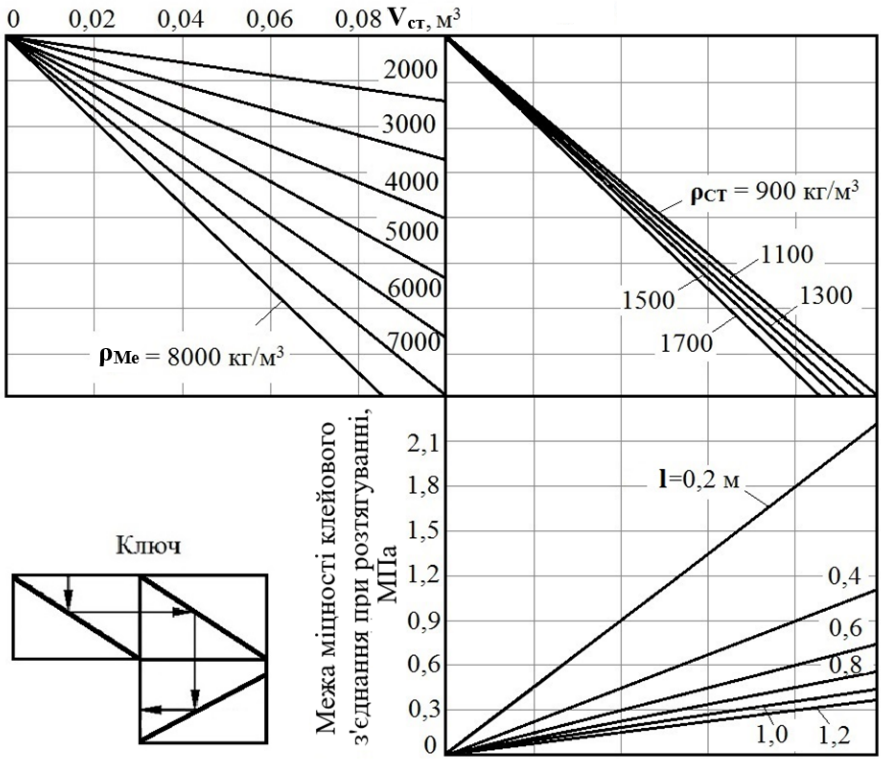


Рисунок 6.32 – Номограма для визначення мінімально допустимої міцності при розтягуванні клейового з'єднання стрижня консольно встановленого у формі: $V_{ст}$ – об'єм тіла стрижня; ρ_{Me} – щільність рідкого металу в формі; $\rho_{ст}$ – щільність стрижня; l – довжина клейового шва

Слід зазначити, що в деяких випадках, відповідно до розділу 4, виливки можливо отримувати в об'ємно-замкнутих ливарних формах, що не потребують склеювання жодних елементів між собою. Для таких ливарних форм потрібно використовувати одноразові моделі із замороженої піщано-водяної суміші.

6.6 Виготовлення ливарних форм за способом паро-мікрохвильового затвердіння за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей

Відповідно до способу ПМЗ вода або ВЗ в робочому просторі стрижневого ящика або оснащення для виготовлення ливарної форми може перебувати в окремій технологічній порожнині, в складі суміші з піском, в замороженій суміші з піском, в пінополіуретановому вкладиші тощо [157,

342]. Різноманітність виконання ВЗ для реалізації способу ПМЗ позначається насамперед на тривалості випаровування води з ВЗ.

В дослідженнях використовували піщано-водяні суміші, які виконували не тільки роль ВЗ, а й моделі виливка (виливків) та його (їх) ливникової системи.

Для визначення меж вмісту води в піщано-водній суміші з сумішей з різним вмістом води (від 3 до 20 г на 100 г кварцового піску марки $1К_2О_202$) виготовляли зразки у вигляді усіченого конусу масою 250 г, які заморожували при температурі -17 °С [343].

Для випробувань зразки під рівень їх більшої підстави засипали кварцовим піском, для плакування якого використовували 1% РС (за масою, понад 100% піску) з питомою щільністю 1,44 г/см^3 і M_{SiO2}=2,9. Після вібраційного ущільнення плакованого піску, короб поміщали в мікрохвильову піч і обробляли в ній зразки мікрохвильовим випромінюванням протягом 7 хв.

Після закінчення мікрохвильової обробки з робочих порожнин виготовлених форм висипали сухий пісок і візуально оцінювали якість їх робочих поверхонь, вигляд яких представлений на рис. 6.33.

Візуальне оцінювання якості поверхонь (див. рис. 6.33) форм показує, що для кварцового піску використаної марки раціональним є вміст води в суміші 5...10% (за масою, понад 100% піску) оскільки при вмісті води в суміші до 5% робоча поверхня ливарної форми обсипається від легкого дотику до неї рукою. При вмісті води в суміші більше 10% робоча поверхня набуває хвилястості, а при 20% на поверхні виникають раковини.

Тобто, з аналізу виконаних досліджень витікає, що існує певна ймовірність реалізації технології виготовлення об'ємно-замкнутих форм за одноразовими замороженим піщано-водяним моделям виливків, де заморожена піщано-водяна модель виливка і його ливникова система виконуватимуть функції ВЗ. При цьому, заморожена модель може як не контактувати (варіант А – див. рис. 6.34, варіант В – див. рис. 6.35), так і контактувати (варіант С – див. рис. 6.36) з відкритою поверхнею ливарної форми.

Схеми етапів виконання ливарної форми за моделлю, що не контактує з відкритою поверхнею представлені на рис. 6.34 та рис. 6.35.

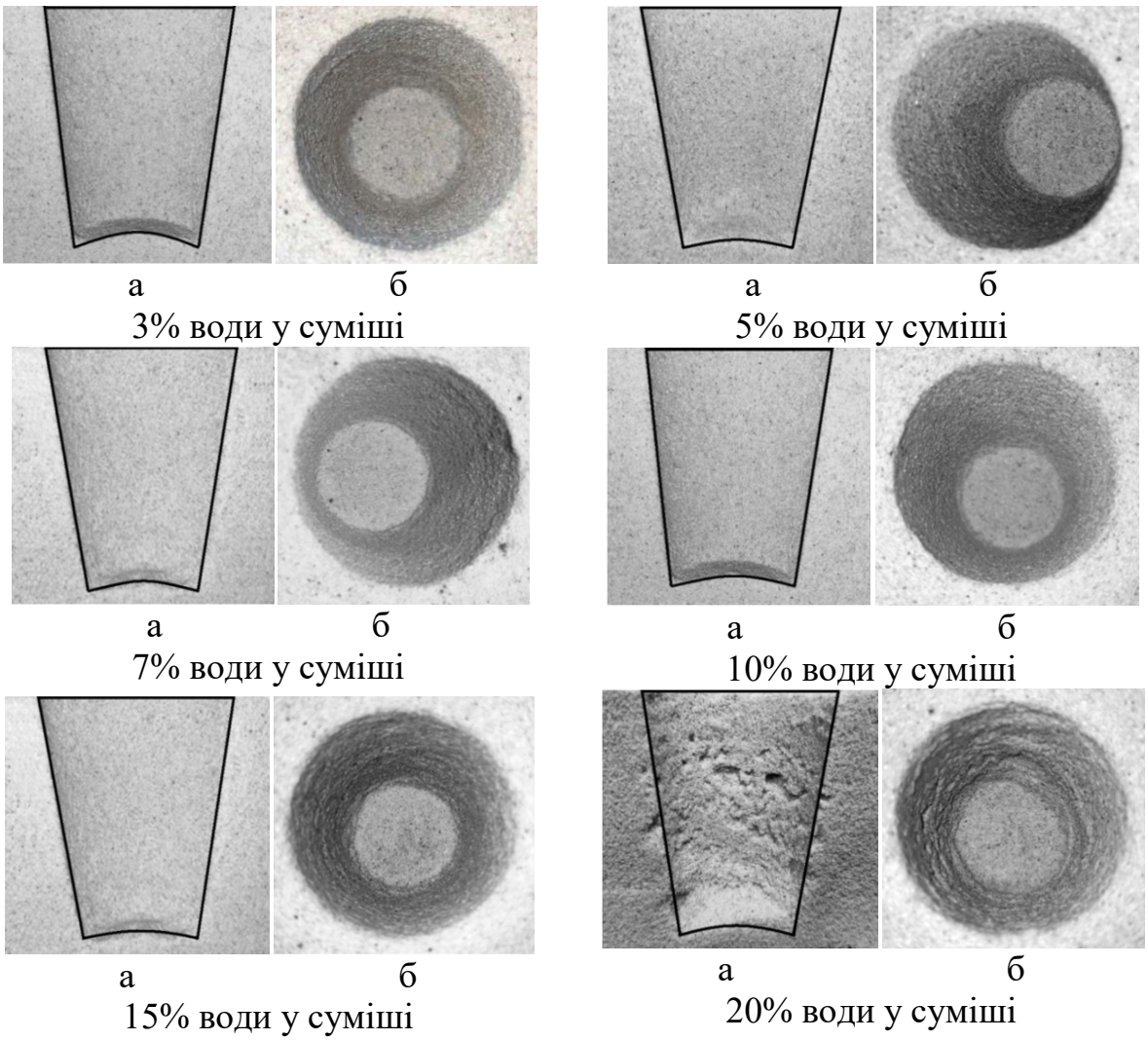


Рисунок 6.33 – Вигляд робочих поверхонь об'ємно-замкнутої ливарної форми в розрізі (а) і зверху (б), виготовлених за моделями з заморожених піщано-водяних сумішей, що містять різну кількість води

Відповідно до рис. 6.34,а заморожену піщано-водяну модель 1, яку попередньо витягли з поліетиленового стрижневого ящика, встановлювали ливниковою лійкою вниз у поліетиленовий короб 2, а простір між стінками короба і моделлю заповнювали плакованим піском 3 (див. рис. 6.34,б).

Ущільнювали плакований пісок 3 вібрацією на вібраційному столі протягом 2 хв при амплітудах коливання від 0,8 до 1,0 мм, з частотою коливань 50 Гц. Зібрану конструкцію обробляли мікрохвильовим випромінюванням з частотою 2,45 ГГц при потужності магнетрону 900 Вт протягом 7 хв. Після мікрохвильової обробки короб кантували на 180° (див.

рис. 6.34,в), оскільки в робочій порожнині сформованої ливарної форми залишився сухий пісок 4 від моделі. Надалі (див. рис. 6.34,г) ливарну форму 5 витягували з короба, а пісок висипали з її робочої порожнини 6.

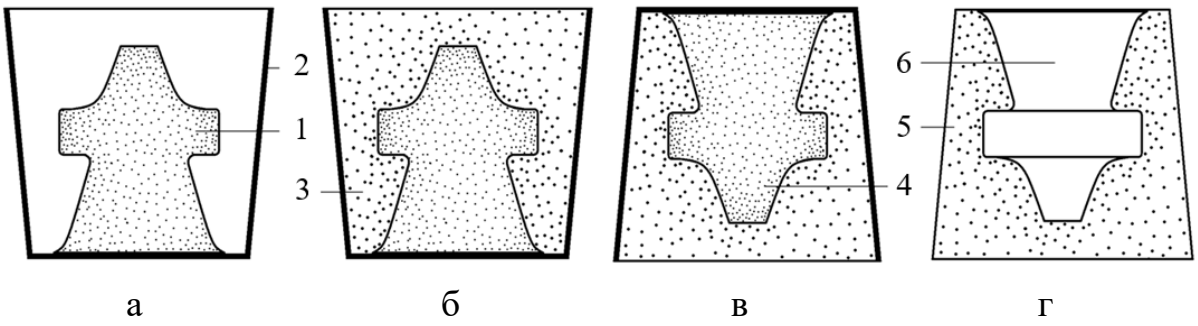


Рисунок 6.34 – Схеми (варіант А) розташування замороженої моделі з закритою поверхнею в поліетиленовому коробі (а), формувальної суміші в коробі на моделі (б), короба після його кантування (в), ливарної форми після видалення з неї зернистого матеріалу моделі (г): 1 – заморожена модель; 2 – поліетиленовий короб; 3 – плакований пісок; 4 – чистий сухий пісок; 5 – ливарна форма (структурований пісок); 6 – робоча порожнина ливарної форми

Різниця отримання ливарної форми за варіантом В від варіанту А полягає в тому, що заморожену модель 1 встановлюють на шар плакованого піску в поліетиленовій опоці 2 (див. рис. 6.35,а), заповнюють плакованим піском простір між моделюю і опокою (див. рис. 6.35,б). Віброущільнення і структурування проводять так само як і в варіанті А. Після структурування форми за ПМЗ-процесом, вирізають отвір 5, який буде надалі служити живильником. Опоку кантують на 180° і через отвір видаляють (висипають) чистий сухий пісок 4 (див. рис. 6.35,в). Після чого ливарна форма (див. рис. 6.35,г) стає придатною для заливання.

Схеми етапів виконання ливарної форми по моделі, що контактує з відкритою поверхнею (варіант С) представлені на рис. 6.36.

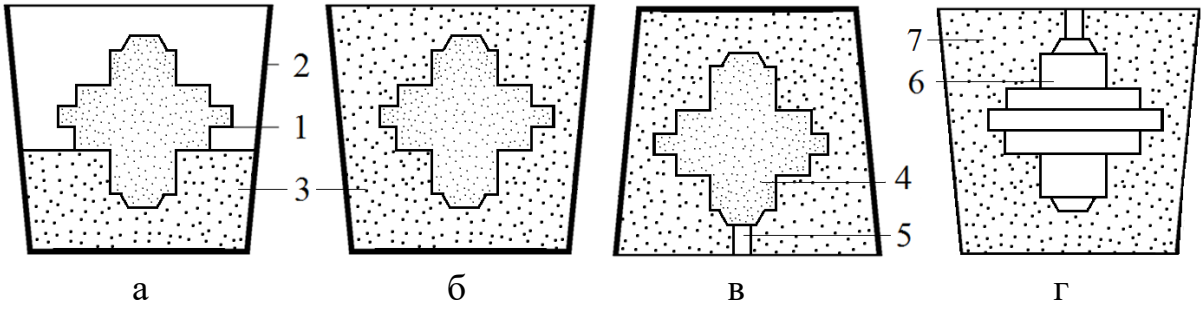


Рисунок 6.35 – Схеми (варіант В) розташування замороженої моделі з закритою поверхнею в поліетиленовому коробі на подушці із плакованого піску (а), формувальної суміші в коробі поверх моделі (б), короба після прорізання отвору в формі та його кантування (в), форми після видалення з неї кварцового піску та повторного кантування (г): 1 – заморожена модель; 2 – поліетиленовий короб; 3 – плакований пісок; 4 – чистий сухий пісок; 5 – отвір (живильник) для видалення піску з форми; 6 – робоча порожнина ливарної форми; 7 – ливарна форма (структурований пісок)

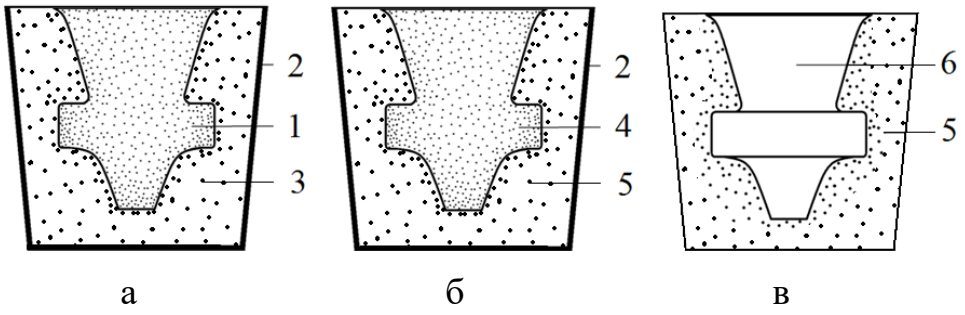


Рисунок 6.36 – Схеми (варіант С) розташування замороженої моделі з відкритою поверхнею в поліетиленовому коробі (а), формувальної суміші в коробі на моделі (б), ливарної форми після видалення з неї зернистого матеріалу моделі (в): 1 – заморожена модель; 2 – поліетиленовий короб; 3 – плакований пісок; 4 – чистий сухий пісок; 5 – ливарна форма (структурований пісок); 6 – робоча порожнина ливарної форми

Відмінність варіанта С від В полягає в тому, що заморожену модель виливка 1 встановлюють на шар плакованого піску 3 в опоці 2 та заповнюють плакованим піском простір між моделлю і опокою (рис. 6.36,а). Після

структурування форми за ПМЗ-процесом (див. рис. 6.36,б), поліетиленовий короб кантують і через ливникову воронку видаляють (висипають) чистий сухий пісок 4 (див. рис. 6.36,в) завдяки чому ливарна форма 5 стає придатною для заливання.

Для оцінки рівня технологічності даного способу, за варіантом В виготовили об'ємно-замкнуту ливарну форму для виливка «Куля». Етапи реалізації процесу виготовлення об'ємно-замкнутої ливарної форми для виливка «Куля» за варіантом В представлені на рис. 6.37.

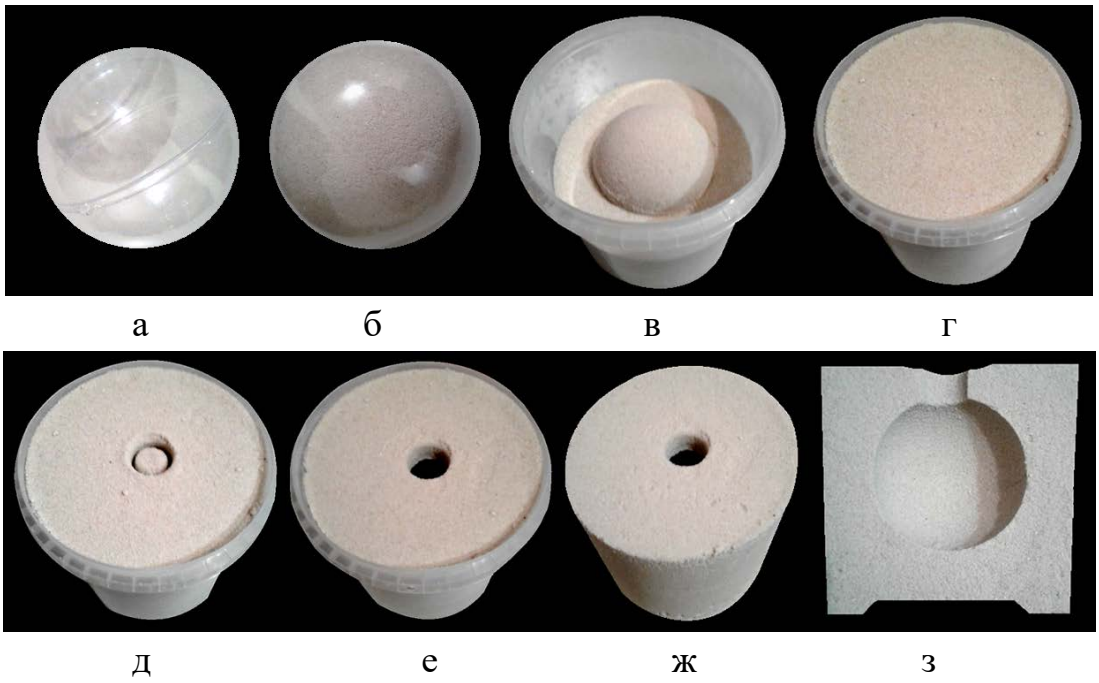


Рисунок 6.37 – Вигляд оснащення і результатів виконання етапів процесу виготовлення об'ємно-замкнутої ливарної форми виливка «Куля» за варіантом В: а – бокс для виготовлення замороженої моделі; б – суміш піску з водою, що ущільнена в боксі; в – частково засипана плакованим піском заморожена модель в опоці; г – повністю засипана плакованим піском заморожена модель; д – прорізаний ливниковий хід; е – ливарна форма в опоці; ж – ливарна форма без опоки; з – розріз об'ємно-замкнутої ливарної форми

Відповідно до рис. 6.37, для виготовлення замороженої моделі виливка, сумішшю піску і води наповнювали пластмасовий бокс ∅60 мм (див. рис.

6.37,а), яку згодом в боксі ущільнювали вручну (див. рис. 6.37,б). Наповнений сумішшю бокс заморожували в морозильній камері.

Після заморожування з боксу витягували модель виливка (маса моделі склала 300 г) встановлювали шар на плакований кварцовий пісок в пластиковій опоці (див. рис. 6.37,в) і засипали плакованим кварцовим піском. Після вібраційного ущільнення суміш обробляли мікрохвильовим випромінюванням протягом 7 хв (див. рис. 6.37,г). Після закінчення обробки мікрохвильовим випромінюванням в структурованій суміші за допомогою тонкостінної сталевої труби проточувати ливниковий хід (див. рис. 6.37,д), через який видаляли сухий пісок моделі (див. рис. 6.37,е). Вигляд об'ємно замкнутої форми, отриманої в результаті цього наведено на рис. 6.37,ж, а її розріз на рис. 6.37,з.

Виготовлені ливарні форми за даним технічним рішенням відразу після виготовлення придатні до використання, оскільки практично не містять вологи і, відповідно, практично не газотвірні [157]. Запропонованим способом можна виготовляти форми будь-якої складності, а їх обмеження за масою і розмірами будуть зумовлені виключно розмірами робочого простору використовуваної морозильної камери та камери мікрохвильового випромінювання [403].

Таким чином, встановлено, що для виготовлення об'ємно-замкнутих форм, заморожені моделі доцільно виготовляти з суміші кварцового піску і 5...10% води (за масою, понад 100% піску). Спосіб виготовлення об'ємно-замкнутих форм по замороженим піщано-водяним моделях за ПМЗ-процесом рекомендується для використання в виробництві дрібних виливків зі сплавів на основі заліза, міді, алюмінію загальномашинобудівного призначення в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва лиття.

6.7 Порівняльна оцінка якості виливків, виготовлених із піщано-рідкоскляної суміші за CO_2-процесом і за способом паро-мікрохвильового затвердіння

Незважаючи на велику кількість факторів (розміри і конфігурація виливка, теплофізичні, структурні і фізико-технологічні особливості його сплаву та ливарної форми і т.п.), що впливають на рівень показників точності будь-якого виливка, одним з визначальних чинників є спосіб лиття [298] і,

відповідно, спосіб структурування ФСС [404].

Зокрема, про це свідчать дані, відповідно до яких при використанні одноразових форм найбільш високу розмірну точність (4...11 клас за ДСТУ 8981:2020) мають виливки, що виготовляють методом лиття за виплавлюваними моделями, найменший клас (7...16) у виливків, що виготовляють в ПГФ. У той же час, точність розмірів виливків, виготовлених в піщано-смоляних формах і піщано-рідкоскляних формах за CO_2-процесом, практично, знаходиться на одному рівні і т.п.

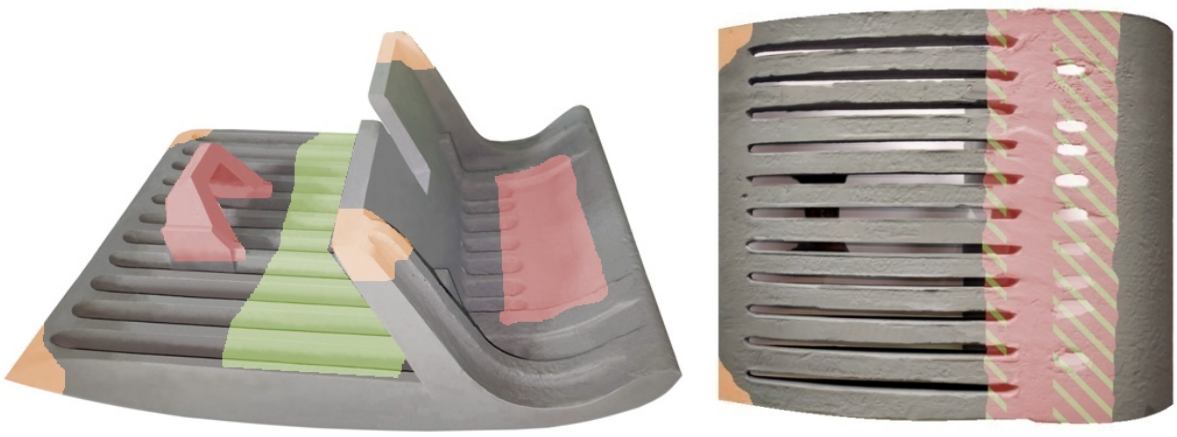
Тобто, точністне налаштування будь-якої технології виробництва виливків в першу чергу визначається способом структурування (затвердіння) їх ФСС, який до тепер для ЛФС, що структуровані за способом ПМЗ, не встановлений.

Аналіз якості виливків «Плита решітки» серійного виробництва підприємства ТОВ «ПК«Перспектива» (м. Дніпро), який було прийнято в якості виливка-представника і виготовляють в ливарні форми формуванням в стрижнях з ПРС структурованої за CO_2-процесом показав, що з числа відомих поверхневих дефектів найбільш часто на поверхні виливків зустрічаються засмічення, спаї і газові раковини. При цьому, близько 50…52% виготовлених виливків піддають ремонту – обробленню і заварюванню поверхневих дефектів, а ~5% виливків остаточно бракують через невідповідність точності їх розмірів вимогам креслення (див. Додаток Е).

Оцінювання впливу способу струкутрування ПРС на точність розмірів виливків проводили на виливку «Плита решітки», неповні креслення якого надано у Дадотку Е [405].

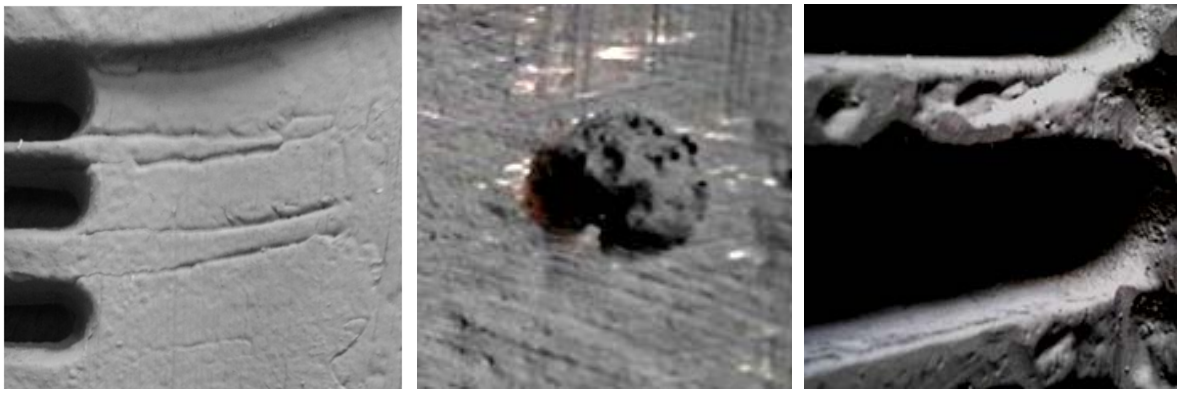
Ймовірною причиною появи поверхневих дефектів на виливку «Плита решітки» є висока обсипальність і газотвірна здатність використовуємих ПРС, а також відносно невисока масова швидкість заливання форми розплавом і хімічні властивості газового середовища в робочій порожнині форми – водяної пари.

Про це, зокрема, свідчить характер розташування ділянок виливка (див. рис. 6.38), які найбільш часто виявляються ураженими даними дефектами, вигляд яких представлений на рис. 6.39.



– засмічення; – спай; – газові раковини

Рисунок 6.38 – Схеми ділянок виливка «Плита решітки», на яких найбільш часто з'являються поверхневі дефекти



а б в

Рисунок 6.39 – Вигляд виправних ливарних дефектів виливків «Плита решітки» промислового виробництва, отриманих у форми, суміш яких була струкутрована за CO_2-процесом: спай (а), газова раковина (б) і засмічення (в)

Для оцінювання впливу способу структурування ПРС на точність розмірів виливка «Плита решітки» в якості показників точності її розмірів були прийняті результати вимірювань (див. Додаток Е) його наступних розмірів l_{301} = 301 мм, l_{108} = $108^{\pm1,5}$ мм , l_{242} = 242^{-2} мм, що схематично представлено на рис. 6.40.

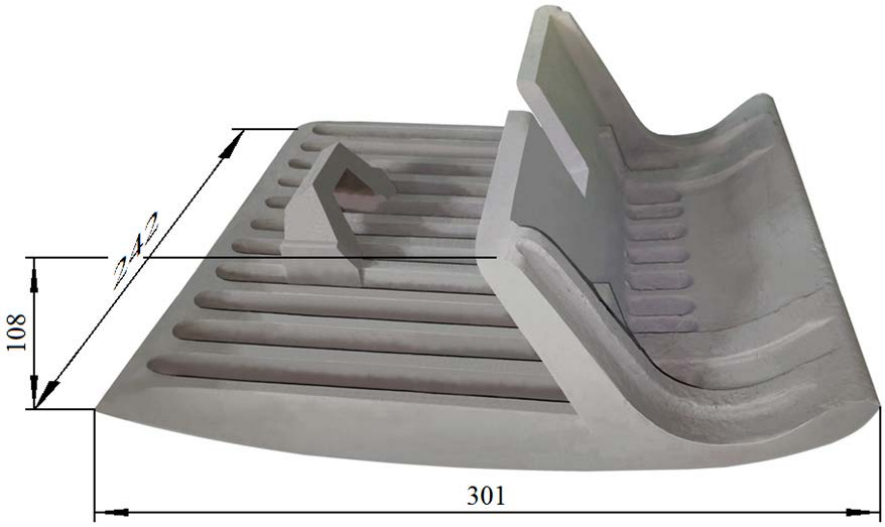


Рисунок 6.40 – Контрольовані розміри виливка «Плита решітки»

Результати визначення контрольних розмірів виливків-представників, отриманих в формах, виготовлених за CO_2-процесом (144 виливка) і ПМЗ-процесом (150 виливків), наведені в табл. 6.9.

Таблиця 6.9

Результати визначення контрольних розмірів виливків, отриманих в формах виготовлених за CO_2-процесом і ПМЗ-процесом

Розмір l_{301}±1, мм	Число виливків (шт), отриманих у формах, виготовлених за процесом		Розмір l_{108}±1,5, мм	Число виливків (шт), отриманих у формах, виготовлених за процесом		Розмір l_{242}-2, мм	Число виливків (шт), отриманих у формах, виготовлених за процесом	
	CO_2	ПМЗ		CO_2	ПМЗ		CO_2	ПМЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
299,4	1	0	107,0	2	1	239,8	1	0
299,6	3	0	107,2	3	2	240,0	1	0
299,8	3	2	107,4	9	4	240,2	1	4
300,0	11	5	107,6	13	8	240,4	6	11
300,2	19	8	107,8	17	16	240,6	12	20
300,4	28	17	108,0	22	26	240,8	21	67
300,6	26	34	108,2	32	38	241,0	37	32
300,8	17	56	108,4	19	22	241,2	38	9
301,0	10	15	108,6	12	18	241,4	15	3

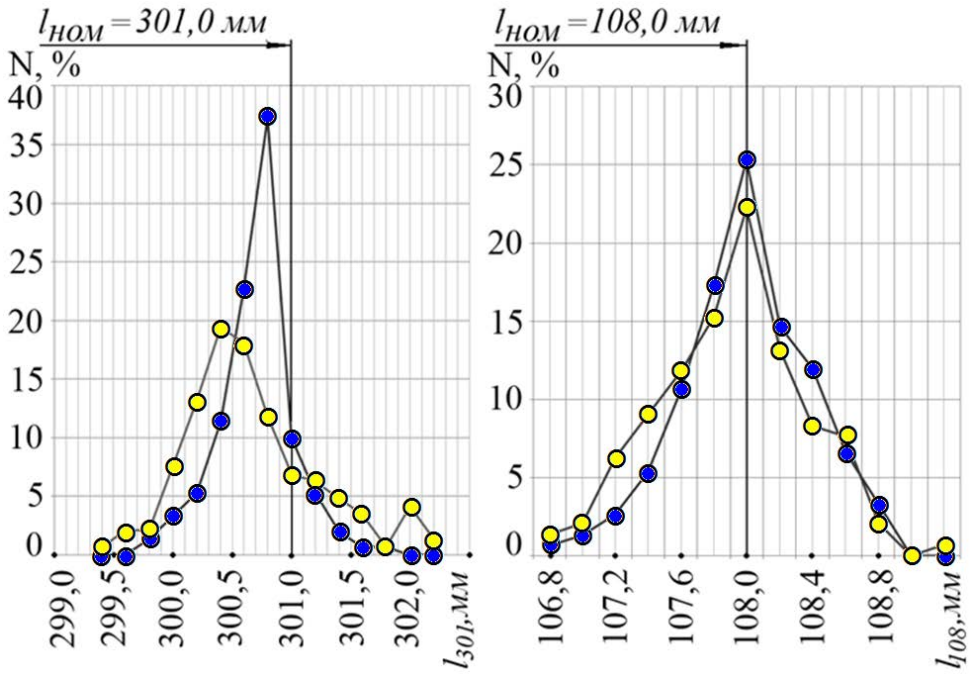
продовження табл. 6.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
301,2	9	8	108,8	11	10	241,6	6	3
301,4	7	3	109,0	3	5	241,8	5	1
301,6	5	1	109,2	0	0	242,0	0	0
301,8	1	1	109,4	1	0	242,2	3	0
302,0	6	0						
302,2	2	0						

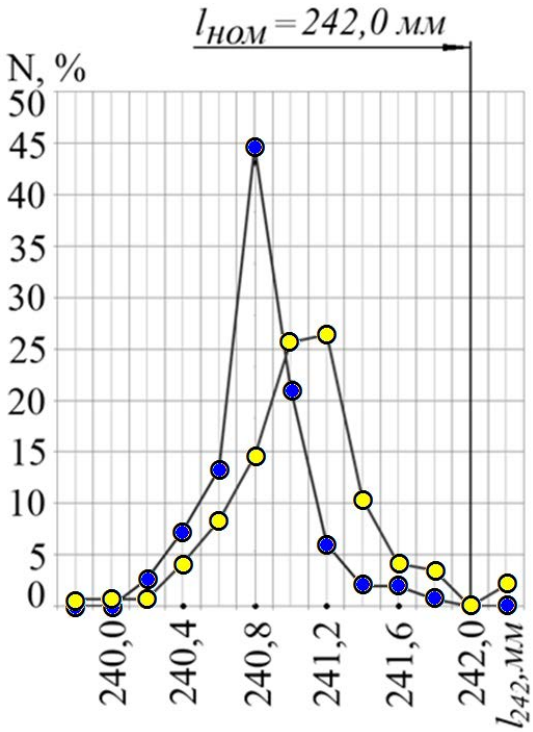
Результати порівняльного аналізу результатів вимірювань контрольних розмірів виливків (див. табл. 6.9), виготовлених в різних формах, показують, що точність контрольованих розмірів виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом дещо вища, ніж виливків, виготовлених в формах за CO_2-процесом. При цьому (див. Додаток Г) остаточний брак по невідповідності розмірів виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, склав 1,3%, а за CO_2-процесом – 4,9%. У той же час виправний брак виливків за ПМЗ-процесом склав 7%, а за CO_2-процесом – 52%. Величина, «розкиду» відхилень контрольних розмірів у виливків за ПМЗ-процесом менше, ніж у виливків за CO_2-процесом, про що свідчать криві розподілу розмірів виливків, представлені на рис. 6.41.

Слід зазначити, що у виливків, які були виготовлені в формах за ПМЗ-процесом, дефекти типу спаїв і газових раковин практично були відсутні, а засмічення мало локальний точковий характер.

З отриманих результатів витікає, що точність контрольованих розмірів сталевих виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом вище, ніж виливків, виготовлених в формах за CO_2-процесом. При цьому остаточний брак по невідповідності розмірів і виправний брак по поверхневим дефектам виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, у рази нижче, ніж за CO_2-процесом, а «розкид» величин контрольних розмірів у виливків за ПМЗ-процесом менше, ніж у виливків за CO_2-процесом.



а б



в

Рисунок 6.41 – Розподіл контрольованих розмірів виливків «Плита решітки» l_{301} (а), l_{108} (б) и l_{242} (в), виготовлених в піщано-рідкоскляних формах, які були структуровані за CO_2-процесом і ПМЗ-процесом:

– CO_2-процес, – ПМЗ-процес

Слід зазначити, що в період з 17.08.2020 по 31.08.2020 року в ливарному цеху ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир) з позитивним результатом (див. Додаток Б) було проведено промислове опробування технології виготовлення ливарних стрижнів за ПМЗ-процесом для чого була виготовлена дослідно-промислова партія виливків «Важіль» масою 2,2 кг в кількості 55 шт зі сталі 35ХГСЛ та «Кришка» масою 3,5 кг в кількості 27 шт з сірого чавуну СЧ200.

В ливарному цеху ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) у виробництво сталевих виливків «Запобіжник замка автозчеплення» (103.01.006) та «Замкодержак» (106.01.003-3) технологія виготовлення піщано-рідкоскляних стрижнів за способом паро-мікрохвильового затвердіння була впроваджена з 01.07.2020 року (див. Додаток В).

Результати досліджень, що викладені в дисертації, використовують в начальному процесі за спеціалізацією 136 – Металургія в Національній металургійній академії України з 28.10.2021 року (див. Додаток Д).

6.8 Висновки

1. Вперше досліджено кінетику карбонізації частково дегідратованого РС в тонкому шарі на повітрі, з якої витікає, що зі збільшенням відносної вологості повітря інтенсивність карбонізації РС та, відповідно, маса карбонату і гідрокарбонату, що утворилася в тонких плівках РС, зростають. Зберігання приготованих ПРС слід проводити в тарі, що герметично закривається, з використанням наважки їдкого натру.

2. Для структурування ПРС за способом ПМЗ слід використовувати свіжоприготовлений плакований 0,5...2,5% РС кварцовий пісок з температурою 20...26 °С, який після сушіння на повітрі до сипучого стану додатково був просушений впродовж 3...5 хв в мікрохвильовому випромінюванні.

3. Для попередження появи внутрішніх тріщин в ЛФС структурування їх ПРС за ПМЗ-процесом слід проводити при безперервному режимі їх обробки мікрохвильовим випромінюванням.

4. Поверхневий дефект вимоїна на ЛФС з ПРС є наслідком конденсації водяної пари з ВЗ на «холодних» робочих поверхнях модельно-стрижневого оснащення під час мікрохвильової обробки суміші. Для попередження виникнення вимоїн на ЛФС, що структурують за ПМЗ-процесом, рекомендовано використовувати оснащення з гіпсу марки Г22 або суміші гіпсу марки Г22 та відповідних ТД.

5. Пригар на виливках носить термічний характер і за класифікацією відноситься до легковидаляємого.

6. Якість поверхні виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, не поступається якості поверхні виливків, виготовлених в формах за Cold-box-amin, Resol-CO_2, CO_2-процесом і знаходиться на рівні якості (за чистотою поверхні) з виливками, що виготовляють в оболонкових формах.

7. Ефект спінювання РС під дією мікрохвильового випромінювання супроводжується не тільки переносом РС в капілярах сумішей, але і частками їх вогнетривкого матеріалу, що дозволяє використовувати РС, як самостійний матеріал для з’єднання шляхом склеювання як самих ЛФС, так і їх елементів.

8. Розроблено аналітичні залежності та на їх основі побудовані номограми, за якими можна в першому наближенні визначити величину мінімально допустимого рівня міцності при розтягуванні клейового з'єднання, реалізації результатів розрахунку дозволить забезпечити цілісність залитої розплавом форми, а також клейового з'єднання між стрижнем і формою або між стрижнями.

9. Для виготовлення об'ємно-замкнутих форм, заморожені при -17 °С моделі виливків та їх ливникових систем доцільно виготовляти з суміші кварцового піску і 5...10% води (за масою, понад 100% піску).

10. Ступінь точності поверхні виливків з бронзи, сталі та чавуну, отриманих в форми, що виготовлені за ПМЗ-процесом, знаходиться на рівні шорсткості поверхні виливків, що виготовляють в оболонкових формах, яку регламентує ДСТУ 8981:2020.

11. Точність контрольованих розмірів виливків-представників,

виготовлених в формах за ПМЗ-процесом вище, ніж виливків, виготовлених в формах за CO_2-процесом.

12. Використання ливарних форм, що виготовлені за ПМЗ-процесом, замість ливарних форм за CO_2-процесом, на виливку-представнику дозволило в умовах підприємства ТОВ «ПК «Перспектива» знизити остаточний брак по невідповідності розмірів виливків з 4,9 до 1,3%, а виправний брак з 52% до 7%.

13. Результати роботи з позитивним результатом пройшли промислове випробування на ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир), впроваджені в ливарних цехах ТОВ «ПК «Перспектива» (м. Дніпро), ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) та в учбовий процес Національної металургійної академії України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичні та технологічні узагальнення в рамках вирішення науково-технічної проблеми створення екологічно безпечних ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом, для виливків загальномашинобудівного призначення, шляхом визначення закономірностей формування властивостей і кінетики структурування суміші, оптимізації її складу та реалізації результатів досліджень у виробництві, що зумовлює підвищення екологічної безпеки та санітарно-гігієнічних умов виробництва, скорочення циклу та енергоємності процесу виготовлення виливків, підвищення їх якості та, відповідно, зниження їх собівартості. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень в області технології виготовлення ливарних форм та стрижнів були знайдені нові наукові та технологічні рішення, отримані практичні результати і зроблені наступні висновки:

1. За результатами аналізу науково-технічної та патентної літератури, сучасних умов поточного виробництва виливків в ливарних цехах України, відомих способів виробництва, сполучних матеріалів та якості виливків загально-машинобудівного призначення, встановлено, що робота, яка спрямована на розробку наукових і технологічних основ структурування в паро-мікрохвильовому середовищі піщано-рідкоскляних сумішей з метою встановлення механізму, кінетики та закономірностей структурування в паро-мікрохвильовому середовищі сипучого кварцового піску, плакованого рідким склом, і результату його застосування на властивості ливарних форм та стрижнів, якість дрібних виливків загальномашинобудівного призначення є актуальною.

2. Реальна потужість мікрохвильового випромінювання, що генерується в мікрохвильових печах зі стоячею хвилею при частоті випромінювання 2,45 ГГц і номінальною потужністю магнітрону 700...1200 Вт на вісі обертового столу в резонаторі становить χ=0,40...0,72 від номінальної потужності магнетрону мікрохвильової печі та з віддаленням від неї знижується за статечним

законом і на відстані більше ~60 мм знижується до χ=0,29...0,36. При цьому, швидкість підвищення температури матеріалу, що нагрівають, прямо пропорційна його відносної діелектричної проникності, яка (для мінералів) залежить виключно від його хімічного складу і при $\varepsilon \leq 10$ з точністю, прийнятною для інженерних розрахунків, може бути визначена за правилом адитивності на основі масового вмісту в ньому елементарних речовин (оксидів) та величини їх діелектричної проникності.

3. Згідно з розробленим описом механізму масопереносу рідкого скла в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання, його перенесення в капілярі проходить в результаті багаторазового повторення етапів виникнення та руйнування капсул рідкого скла за схемою подібною ланцюговій реакції.

4. Згідно з розробленим описом механізму структурування піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом, манжети з рідкого скла є наслідком конденсації водяної пари з водяного заряду на плакованій поверхні піщинок піщано-рідкоскляної суміші, розчинення та гідратації рідкого скла в плакованих шарах у конденсаті, спінювання рідкого скла, яка насичена водою, часткове випаровування води зі спіненого рідкого скла, спадання піни рідкого скла та його плівкова течія по поверхням піщинок до точок їх контакту між собою під дією капілярних сил з остаточною дегідратацією рідкого скла в манжетах.

5. За результатами визначеної кінетики структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом встановлено, що при ПМЗ-процесі виділення води з піщано-рідкоскляної суміші, що структурують, проходить в три етапи. Перший етап – при ~100 °С, другий – при 109...118 °С, третій – при 119...128 °С. При цьому переніс рідкого скла в піщано-рідкоскляній суміші, проходе за наступними механізмами:

- при 109...118 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його спінювання, яке виникає за рахунок інтенсивного випаровування з нього води з величиною енергії активації $E_П$ = 23,9 кДж/моль;

- при 119...128 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його в'язкої течії з величиною енергії активації $E_П$ = 49,3 кДж/моль.

6. Для структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом доцільно використовувати кварцовий пісок з середнім розміром піщинок 0,16...0,25 мм та вмістом глини до 0,1% (за масою), який плаковано 0,5...2,5% (за масою) рідким склом, що при масі водяного заряду 1 г дозволяє структурувати від 2400 до 500 г суміші протягом 8...4 хв. При цьому, маса структурованої піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом збільшується зі зменшенням маси рідкого скла, що використане на плакування піску, та за законом квадратного кореня зі збільшенням часу структурування.

7. Для виготовлення ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом оптимальним є сухий кварцовий пісок, плакований рідкм склом, який пройшов крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого рідкого скла (M_{SiO2}=2,8…3,0, $ρ_2$=1,42….1,44 г/см^3) у кількості 1,5% (за масою, понад 100% піску). Структурування піщано-рідкоскляної суміші оптимізованого складу за ПМЗ-процесом при раціональному рівні його технологічних параметрів забезпечить ливарним формам та стрижням наступний рівень властивостей: $σ_{СТ}$=2,9...3,0 МПа, Ос=0,26…0,30 %, К=150…155 од, Г=3…5 см^3/г, $А_{20}$=92…100 Дж, ρ=1720…1730 кг/м^3 , $Δ_ε$=0,32%, для сплаву Al+8,5%Mg b_2=850…750 (Вт·с^{0,5})/(м^2·град), для сірого чавуну СЧ200 b_2=1000…1100 (Вт·с^{0,5})/(м^2·град), що відповідає сучасним вимогам до ливарних форм та стрижнів. В той же час структурована за ПМЗ-процесом піщано-рідкоскляної суміші з кварцового піску, плакованого тим же рідким склом у кількості 2,5% та розміром конгломератів 0,315...0,63 мм, відносно вище наведеної піщано-рідкоскляної суміші, може бути використана в ливарній формі як теплоізоляційна.

8. Встановлено функціональні залежності між обсипальністю, крихкістю, міцністю, роботою вибивання виливків з форм і стрижнів з виливків і рядом параметрів і властивостей структурованих формувальних та

стрижневих сумішей, які визначають на зразках за стандартними і загальноприйнятими методиками.

9. Для піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована за ПМЗ-процесом і містить кварцовий пісок, плакований 0,5...3,0% рідким склом, та після вібраційного ущільнення має уявну щільність від 1380 до 1758 кг/м^3, відносно алюмінієвого сплаву і сірого чавуну, встановлено інтегрально-ефективні значення її теплофізичних властивостей.

10. За результатами дослідження кінетики карбонізації частково дегідратованого рідкого скла в тонкому шарі на повітрі встановлено, що інтенсивність карбонізації рідкого скла при нормальній температурі, зростає зі збільшенням відносної вологості повітря. Тому, зберігання кварцового піску, плакованого рідким склом, слід проводити в тарі, що герметично закривається, з використанням наважки їдкого натру або в закритій тарі впродовж не більше 1 доби.

11. Робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей, що містять від 0,5% до 2,5% (за масою, понад 100% піску) рідкого скла, і структуровані за ПМЗ-процесом, зі збільшенням температури попереднього нагріву структурованої піщано-рідкоскляної суміші, знижується з 185…15 Дж до нуля при температурі попереднього нагріву від 800 до 1100 °С. Вибивання стрижнів або їх частин, у яких після контакту з залитим в ливарну форму розплавом не перевищила 600 °С, рекомендовано здійснювати шляхом занурення виливків у воду.

12. Характер механічного руйнування суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, не залежить від вмісту рідкого скла, яке пішло на плакування кварцового піску, але залежить від тривалості процесу ПМЗ зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного (до 2 хв) до змішаного (2...4 хв) і когезійного (понад 4 хв).

13. Для попередження появи внутрішніх тріщин в ливарних формах та стрижнях, структурування їх піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом треба проводити в безперервному режимі обробки мікрохвильовим

випромінюванням. Поверхневий дефект вимоїна є наслідком конденсації водяної пари з водяного заряду на «холодних» робочих поверхнях модельно-стрижневого оснащення під час мікрохвильової обробки суміші. Пригар на виливках носить термічний характер і відноситься до легковидаляємого.

14. Ступінь точності поверхні виливків з бронзи, сталі та чавуну, отриманих в форми, що виготовлені за ПМЗ-процесом, відповідає 7...10 класу, а виливків з алюмінієвих сплавів – 5...14 класу відповідно до ДСТУ 8981:2020.

15. Результати роботи з позитивним результатом пройшли промислове випробування на ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир), впроваджені в ливарних цехах ТОВ «ПК «Перспектива» (м. Дніпро), ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) та в учбовий процес Національної металургійної академії України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пономаренко О.И., Евтушенко Н.С. Технологический процесс получения холоднотвердеющих смесей на основе олигофурфурилоксисилаксановых связующих. *Литьё и металлургия*. 2016. №2 (83). С. 33-38.

2. Жудро О.М., Юрченко Л.А., Денисов В.А., Меринов И.В. Жидкие самотвердеющие смеси на основе огнеупорных наполнителей. *Литейное производство*. 1981. №7. С. 10-118.

3. Solonenko L., Prokopovitch I., Repyakh S., Sukhoi K., Dmytrenko D. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*. 2019. Issue 1 (57). Pp. 90-98.

4. Statistics World Foundry Indastry 2016 [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.caef.eu/en/statistics/.

5. Кушталов В.П. Холоднотвердеющие смеси повышенной живучести и термостойкости с синтетическими смолами: дис. ... канд. тех. наук: 05.16.04 / Киевский ордена Ленина политехнический институт имени 50-летия Великой октябрьской социалистической революции. Киев, 1984. 165 с.

6. Яшина С.А., Клюквина Т.Д. Изучение механизма осыпаемости самотвердеющих смесей (обзор). *Труды ВИАМ*. 2018. № 6 (66). С. 110-118.

7. Евстифеев Е.Н., Смирнова В.Н., Бессарабов В.С., Котова Л.А., Журавлев А.В. Экологически чистая технология изготовления холоднотвердеющих фосфатных смесей. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2011. № 6. С. 41-43.

8. Овчинников В.В. Об экологических проблемах в литейном производстве. *Литейное производство*. 1990. № 2. С. 5.

9. Болдин А.Н., Жуковский С.С., Поддубный А.Н. Экология литейного производства. Брянск: Изд-во БГТУ, 2001. 316 с.

10. Соляков Д.А., Болдин А.Н., Яковлев А.И. Процессы газовыделения из стержней горячего и холодного отверждения. М.: Машиностроение-1, 2004. 200 с.

11. Колтыгин А.В. Экологические проблемы литейного производства. М.: МИСиС, 2003. 99 с.
12. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 183 с.
13. Расчет количественных характеристик выбросов вредных веществ в атмосферу от основных видов технологического оборудования предприятий отрясли ММ 1.4.1038-82. Научно-исследовательский институт технологий и организации производства НИАТ, 1981. 136 с.
14. Охрана окружающей среды от выбросов литейного производства: методические указания для студентов специальностей ЛП, ОЛП / сост. Н.М. Глиняная. Краматорск: ДГМА, 2012. 60 с.
15. Кукуй Д.М., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства формовочные материалы и смеси. Искусственная сушка горных пород: Учебн. пособие. Мн.: БНТУ, 2005. 360 с.
16. Сушко Т.И., Кучер А.Т. Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве: учеб. пособие. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. 179 с.
17. Шинский О.И., Марукович Е.И., Шалевская И.А., Шинский В.О., Клименко С.И. Экономика, экология, организация производств литья по газифицируемым моделям. *Литьё и металлургия*. 2017. № 4 (89). С. 53-59.
18. Феклин Н.Д. Анализ условий возникновения дефектов литья при вакуумно-пленочной формовке и известные способы их устранения. *Литье Украины*. 2017. №11. С. 19-32.
19. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: Профессионал, 2007. 408 с.
20. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспоминая забытые технологии: изготовление отливок в сухих песчано-глинистых формах. *Библиотечка литейщика*. 2016. №5. С. 23-28.
21. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Физико-механические характеристики песчано-глинистых смесей (ПГС).

Библиотечка литейщика. 2016. № 6. С. 11-19.

22. Солоненко Л.И., Усенко Р.В., Белый А.П., Репях С.И. Характеристика некоторых способов литья и смесей одноразовых форм и стержней для отливок массой до 300 кг. *Perspectives of world science and education*: *Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (Osaka, 2-4 October. 2019).* Osaka, 2019. Pp. 202-210.

23. Солоненко Л.І. Теоретичні та технологічні основи виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів в екологічно безпечні низькотемпературні кварцові форми: дис. ... канд. тех. наук: 05.16.04 / Національна металургійна академія України. Дніпро, 2018. 144 с.

24. Грузман В.М., Иконников В.Я., Синицын Е.Я. Исследование температурных полей замороженных форм. *Литейное производство*. 1975. №5. С. 21.

25. Голотенков О.Н. Формовочные материалы: Учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 164 с.

26. Вдовин К.Н., Косарева Є.А. Эффективность применения жидкостекольных смесей в литейном производстве. *Теория и технология металлургического производства*. 2012. С.108-117.

27. Гурлев В.Г. Анализ физико-химических процессов формирования структуры жидкостекольных формовочных и стержневых смесей при производстве отливок получаемых в разовых формах. *Вестник ЮУрГУ*. 2012 №15. С 11-19.

28. Осипенко І.О., Солоненко Л.І., Білий О.П. Системне використання пилу техногенного походження у складі фосфатних холоднотвердіючих сумішей. *Системні технології*. 2018. № 5. С. 97-104.

29. Солоненко Л.И., Репях С.И., Усенко Р.В., Баца И.В. Технологические добавки в песчано-жидкостекольных смесях. *Topical issues of the development of modern science*: *Abstracts of II International Scientific and Practical Conference (Sofia, 16-18 October. 2019).* Sofia, 2019. Pp. 62-68.

30. Знаменский Л.Г., Ивочкина В.О., Варламов А.С. Вакуумно-ультрозвуковая обработка самотвердеющих суспензий в художественном

литье. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».* 2015. Т.15. № 3. С. 105-109.

31. Полонейчик Н.М. Формовочные материалы, применяемые в стоматологии (Часть 1). Материалы для дублирования гипсовых моделей. *Современная стоматология*. 2016. № 2. С. 82-84.

32. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.

33. Пашнина О.М. Наливные цементные формы для литья по выплавляемым моделям: дис .... канд. тех. наук: 05.16.04/ Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, 2009. 198 с.

34. Лютый Р.В., Гурия И.М., Шаповалова Д.В., Кеуш Д.В. Образование связующих композиций на основе ортофосфорной кислоты и солей металлов в формовочных смесях. *Литейное производство*. 2013. № 5. С. 17-20.

35. Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Петров Н.В., Журавлев А.Ф., Моляков А.А., Макаров С.Г. Металлофосфатные связующие и смеси, особенности их отверждения. *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева*. 2017. № 4. С. 79-85.

36. Илларионов И.Е. Применение технологии получения металлофосфатных связующих, стержневых и формовочных смесей на их осове. *Черные металлы*. 2018. №4. С. 13-19.

37. Осипенко И.А., Белый А.П. Перспективы применения высокодисперсных отходов производства силикомарганца в литейном производстве. *Литье. Металлургия. 2014: Материалы X Международной научно-практической конференции (Запорожье, 27-29 мая 2014).* Запорожье, АА Тандем. С. 96-97.

38. Кукуй Д.М., Скворцов В.А., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства: учебник. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. 384с.

39. Жуковский С.С., Лясс А.М. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. М: Машиностроение, 1976. 224 с.

40. Глебов С.М. Разработка способа изготовления керамических форм и стержней замораживанием для литья ответственных деталей центробежных насосов. Автореферат на соискание научной степени кандидата технических

наук. 05.16.04. С-Пб, 2008. 18 с.

41. Варламов А.С. Технологии ускоренного изготовления оболочковых и монолитных керамических форм. *Вестник ЮУрГУ*. 2019. № 13. С. 64-66.

42. Могилев В.К., Лев О.И. Справочник литейщика: Справочник для профессионального обучения рабочих на производстве. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

43. Боровский Ю.Ф., Шацкий М.И. Формовочные и стержневые смеси. Л.: Машиностроение, 1980. 86 с.

44. Добротворский М.М., Разумова М.С. Справочник по приемке и испытанию формовочных материалов и смесей. М.-С.: Машгиз, 1957. 219 с.

45. Смесь для литейных форм: а.с. 1256844 СССР: МКл В22 С1/00,С1/02. №3851355/22-02; заявл. 31.01.85; опубл. 15.09.86, Бюл. №34. 3 с.

46. Смесь для литейных форм и стержней: а.с. 372014 СССР: МКл В22 С1/00. №1294117/22-2; заявл. 06.01.69; опубл. 01.03.73, Бюл. №13. 1 с.

47. Смесь для изготовления литейных форм и стержней CO_2-процессом: а.с. 1215824 СССР: МКл В22 С1/18. №3734319/22-02; заявл. 03.05.84; опубл. 07.03.86, Бюл. №9. 4 с.

48. Смесь для изготовления литейных форм и стержней по CO_2-процессу: а.с. 1260102 СССР: МКл В22 С1/18, 1/02. № 3883135/22-02; заявл. 10.04.85; опубл. 30.09.86, Бюл. №36. 3 с.

49. Жидкостекольная смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1072978 СССР: МКл В22 С1/02. № 3385808/22-02; заявл. 21.01.82; опубл. 15.02.84, Бюл. №6. 3 с.

50. Состав смеси для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1227309 СССР: МКл В22 С1/02. № 3847025/22-02; заявл. 21.11.84; опубл. 30.04.86, Бюл. № 16. 4 с.

51. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2224619 РФ: МПК В22 С1/18. №2002120026/02; заявл. 27.07.2002; опубл. 27.02.2004, Бюл. №3. 4 с.

52. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2703637 РФ: МПК В22 С1/00. № 2019106201; заявл. 05.03.2019; опубл. 22.10.2019, Бюл. №30. 7с.

53. Stachowicz M., Granat K., Nowak D. Effect of hardening method and structure of linking bridges on strength of water glass moulding sands. *Archives of foundry engineering*. 2010. № 2. Pp. 141-146.

54. Granat K., Nowak D., Pigiel M., Stachovicz M., Wikiera R. Determination of application possibilities of microwave heating in the curing process of water glass molding sands with fluid esters. Part 1. *Archives of foundry engineering*. 2009. № 1. Pp. 45-50.

55. Stachowicz M., Granat K. Long-term effects of relative humidity on properties of microwave hardened moulding sand with sodium silicate. *Archives of foundry engineering*. 2017. № 3. Pp. 127-132.

56. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2425732 РФ: МПКВ22 С1/02. №2010130970/02; заявл. 23.07.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. 6 с.

57. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 923046 СССР: МКл В22 С1/02. №3002425/22-02; заявл. 11.11.80; опубл. 23.04.84, Бюл. № 15. 5 с.

58. Борсук Л.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.

59. Дорошенко С.П., Ващенко К.И. Наливная формовка: монография. Киев: Вища школа, 1980. 176 с.

60. Смесь наливная с повышенной термохимической устойчивостью для изготовления объемных форм при производстве отливок по выплавляемым моделям: пат. 2427441 РФ: МПК В22С 1/18. № 2010119734/02; заявл. 17.05.10; опубл. 27.08.11, Бюл. №24. 7 с.

61. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1776585 СССР: МПК В22С 1/02, 1/18. № 4853254/02; заявл. 60.05.90; опубл. 23.11.92, Бюл. № 43. 3 с.

62. Смесь наливная формовочная с повышенной газопроницаемостью для получения отливок из цветных сплавов: пат. 2383410 РФ: МПК В22С 1/18. № 2008142654/02; заявл. 27.10.2008; опубл. 10.03.2010, Бюл. №7. 6 с.

63. Гипсовая смесь: а.с. 1738773 СССР: МКл С04 В11/00. № 4816216133;

заявл. 19.02.90; опубл. 07.06.92, Бюл. № 21. 63 с.

64. Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Петрова Н.В., Журавлев А.Ф., Моляков А.А. Некоторые вопросы и особенности применения металлофосфатных смесей для получения отливок из черных металлов и сплавов. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2012. № 4 (97). С. 262-265.

65. Илларионов И.Е., Петрова Н.В., Решетников А.В., Стрельников И.А., Применение металлофосфатных связующих и смесей в литейном производстве. *Литье и металлургия*. 2013. № 3 (72). С. 54-57.

66. Фосфаты и фосфатные смеси [электронный ресурс]. Режим доступа: https://studfile.net/preview/2592231/page:11/

67. Ткаченко С.С., Колодий Г.А., Знаменский Л.Г., Ермоленко А.А. Холоднотвердеющие смеси на неорганическомсвязующем: состояние и перспективы развития (неорганика против органики). *Литьё и металлургия*. 2018. № 2 (91). С. 16-22.

68. Лютий Р.В., Тишковець М.В., Люта Д.В. Дослідження процесів зміцнення стрижневих сумішей з ортофосфорною кислотою і алюмовмісними матеріалами різного класу. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2020. Т. 21. № 1. С. 176-184.

69. Скирденко М.В, Кеуш Д.В., Лютий Р.В.. Технологічні властивості стрижневих сумішей, які зміцнюються при взаємодії ортофосфорної кислоти з компонентами наповнювача. Нові матеріали і технології в машинобудуванні. 2017. №2. С. 9-12.

70. Солоненко Л.И., Усенко Р.В., Репях С.И. Связующие материалы неорганического происхождения, отверждаемые физическими способами. *The 12th International conference "Science and society" (June 7, 2019).* Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada. 2019. С.18-22.

71. Chate G.R., Chate G.C., Manjunath P., Bharath Bhushan S.N., Mahesh B.P., Anand S.D. Comprehensive moudeling, analysis and optimization of furan resin-based moulding sand system with sawdust as an additive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019. № 4. Pp. 1-24.

72. Major-Gabryś K., Mosadyna-Kondracka M., Grabarczyk A. Selection of hardening technology of moulding sand with hydrated sodium silicate binder devoted to aluminum alloys ablation casting. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2019. № 1. Pp. 359-364.

73. Юрасов В.В., Сильченко Т.Ш., Кидалов Н.А. Разработка жидкостекольного связующего для смесей литейного производства из нанодиспергированных ударно-волновой обработкой щелочных силикатов натрия. *Литейщик России.* 2011. № 2. С. 42-46.

74. Афонаскин А.В., Быстров М.В., Чуркин Б.С., Брусницын С.В. Составы смесей, обеспечивающие высокую податливость и выбиваемость стержней. *Литейное производство*. 2011. № 3. С. 8-10.

75. Кукарцев В.А., Дроздова Т.Н., Кукарцев В.В., Атрошенко А.В. Использование отвалов отработанной жидкостекольной смеси при изготовлении форм. *Литейное производство*. 2015. № 5. С. 6-8.

76. Иванова Л.А., Наумов В.И., Чернышов Е.А., Кузнецов С.А. Свойства жидкостекольных смесей при модифицировании жидкого стекла ПАВ. *Литейное производство*. 2015. № 8. С. 6-9.

77. Иванова Л.А., Чернышов Е.А., Кузнецов С.А. Влияние комплексного модификатора на остаточную прочность жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 2016. № 11. С. 16-18.

78. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 258 с.

79. Дан Л.А., Трофимова Л.А., Шепилов В.А., Дан Е.Л. Повышение прочностных свойств сырых песчано-глинистых формовочных смесей путем электромагнитной обработки воды. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2012. № 24. С. 143-147.

80. Фесенко А.Н., Фесенко М.А., Федоров Н.Н. Влияние влажности и зернистости песка на основе кварца на свойства песчано-глинистой формовочной смеси. *Научный вестник ДГМА*. 2017. №1 (22). С. 104-111.

81. Рагимова К.Э. Промышленное испытание противопригарных свойств

формовочных и стержневых смесей с техногенными отходами. *Системные технологии*. 2015. № 4(99). С. 49-55.

82. Илларионов И.Е., Петрова Н.В. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2011. № 2(87). С.208-213.

83. Гуляев Б.Б. Формовочные процессы. Л.: Машиностроение, 1987. 264 с.

84. Глыбов Д.С., Выков П.Г., Гуляев Б.Б. Применение плакированных песчано-смоляных смесей в литейных цехах НРБ. *Литейное производство*. 1987. №1. С. 8-9.

85. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие смеси. *Литейное производство*. 1980. №2. С. 20-22.

86. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.

87. Бречко А.А., Великанов Г.Ф. Формовочные смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982. 216 с.

88. Марков В.А., Нефедов К.Е. Метод определения выбиваемости жидкостекольных смесей. *Ползуновский альманах*. 2003. № 4. С. 50-51.

89. Жуковский С.С., Иванов А.А. Упрочнение и выбиваемость жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 1987. №1. С. 9-11.

90. Жуковский С.С. Проблемы прочности формовочных смесей. *Литейное производство*. 1985. №5. С. 5-7.

91. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 329 с.

92. Васин Ю.П., Васина З.М. Адгезионные свойства поверхности зёрен кварцевого песка. *Вопросы теории и технологии литейных процессов.* Челябинск: ЧПИ, 1981. С.3-6.

93. Великанов Г.Ф., Бречко А.А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982. 214 с.

94. Зыков А.П., Минаев Г.И. Механизм формирования прочностных свойств песчано-смоляных образцов из горячеплакированных смесей. *Литейной производство*. 1984. №1. С. 15-16.

95. Жуковский С.С., Кузнецов Д.А. Упрочнение холоднотвердеющих смесей силанами. *Литейное производство*. 1984. №9. С. 18-19.

96. Требования, предъявляемые к формовочным смесям и формам. [электронный ресурс]. Режим доступа: https://extxe.com/326/trebovanija-i-tehnologicheskie-svojstva-formovochnyh-smesej-i-form/

97. Комиссаров В.А., Тепляков С.Д. Технологические особенности применения жидкостекольных ХТС с жидкими отвердителями. *Литейное производство*. 1984. №12. С. 5-8.

98. Дорошенко С.П. Совершенствование технологии изготовления форм и стержней из жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 1983. №1. С. 14-15.

99. Харченко В.Д., Жудро О.М., Рубановская У.Ф. Применение самотвердеющих смесей в индивидуальном производстве оливок. *Литейное производство*. 1982. №2. С. 24-25.

100. Гаилов Е.С., Серебряков В.В., Малык В.Ф. Высокоогрнеупорные холоднотвердеющие связующие и смеси. *Литейное производство*. 1981. №12. С. 18-20.

101. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е. Вспомним забытые технологи: стержни и формы из жидкостекольных смесей, упрочняемые порошковыми отвердителями. *Литье Украины*. 2016. №4. С. 24-27.

102. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л., Белобров К.Е. Вспомним забытые технологии: отверждение стержней и форм из жидкостекольных смесей воздушно-углекислой смесью. *Литье Украины*. 2017. № 12. С. 23-31.

103. Илларионов И.Е., Васин Ю.П. Формовочные материалы и смеси. Чебоксары: Изд-во при Чуваш.ун-те, 1995. Ч. 2. 288 с.

104. Джизжев Д., Таринский И, Иванова Д. Структурно-морфологические исследования силикагеля из жидкого стекла и коагулянтов. *Труды 48-го Международного конгресса литейщиков*. Варна, 1986. С. 1-4.

105. Корнеев В.И., Данилов В.В. Растворимое и жидкое стекло. СПб: Стройиздат, 1996. 216 с.

106. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: формы из жидкостекольных смесей, отверждаемые на воздухе и при помощи переносных колпаков или электровентиляторных сушил. *Литье Украины*. 2016. № 2 (186). С. 20-23.

107. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: отверждение форм и стержнем из жидкостекольных смесей теплом в камерных сушилах. *Литье Украины*. 2016. № 3 (187). С. 18-24.

108. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е., Белобров К.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: упрочнение литейных форм инфракрасными и переносными электрическими сушилами. *Литье Украины*. 2019. № 4. С. 24-27.

109. Deodorizing method in cold box molding and deodorant used forint: pat. 110550 Japan: B 22 C 9/12. № 61-9945 statement 22.06.84, publ. 17.01.86.

110. Восковец В.Г., Литвиненко О.Н. Вакуумная сушка жидкостекольной смеси. *Вестник Харьковского политехнического института.* 1981. №182. С. 45-47.

111. Григорьев П.Н., Матвеев М.А. Растворимое стекло. М.: Промстройиздат, 1956. с. 443.

112. Dahiya J.N., Roberts J.A. Dielectric Behavior of $SRTIO_3$ and $YIBA_2CU_3O_x$ at 10.6 Ghz Using a Microwave Resonant Cavity as a Probe. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy.* 2000. Vol. 35. Issue2.Pp. 105-109.

113. Opyd D., Granat K. The influence of sand grains properties on electrical properties of moulding sand with inorganic binder. *Archives of foundry engineering*. 2015. № 3. Pp. 43-46.

114. Плановский А.Н., Рамм В.М., Коган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 4-е, стереотипное. М.: Химия, 1967. 848 с.

115. Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппаратура нефтегазоперегонки и нефтехимии: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 677 с.

116. Дорошенко С.П., Ващенко К.И., Прилуцкий М.И. Исследование процесса твердения стержневых смесей в электрическом поле токов высокой частоты.

Формовочные материалы и формообразование. Киев: ИПЛ АН УССР, 1975.
117. Ледян Ю.П., Кукуй Д.М., Дмитрович А.М. Состояние и перспективы использования электронно-ионной технологии в литейном производстве. Обзорная информация. Минск, 1978. 55 с.
118. Маслов К.А., Леушин И.О., Субботин А.Ю. Теоретические аспекты некоторых методов повышения технологичности жидкостекольных стержневых смесей, отверждаемых по CO_2-процессу. *Литейщик России*. 2010. № 6. С. 36-38.
119. Способ изготовления литейных стержнем из жидкостекольных смесей в нагреваемой оснастке «Термо-шок-CO_2-процессом»: пат. 2630399РФ: МПК B22 C9/10, 9/12. № 2015156533; заявл. 28.12.2015; опубл. 07.09.2017, Бюл. №25. 9 с.
120. Бегма В.А. Разработка и внедрение технологии изготовления стержней из смесей на высокомодульном жидкостекольном связующем: дис.…канд. техн. наук: 05.16.04 / Курган, 2001. 211 с.
121. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: стержни и формы из жидкостекольных смесей, упрочняемых порошковыми отвердителями. *Литье Украины*. 2016. №4 (188). С. 25-27.
122. Хабибулин Ш.А. Разработка составов и технологи получения модифицированного жидкостекольного вяжущего и композиционных материалов на его основе. дис. …. канд. тех. наук: 05.17.11. / Национальный исследовательский томский политехнический университет. Томск, 2015. 137 с.
123. Бессонова В.П., Иванченко О.Е. Хром в окружающей среде. *Питання біоіндикації та еколог*ії. 2011. Вип. 16, № 1. С. 1-8.
124. Илларионов И.Е., Стрельников И.А. О применении техногенных отходов в литейном производстве. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. №4. С. 36-41.
125. Самотвердеющая смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 92010502/02РФ: МПК B22 C1/02, 1/10, 1/18. № 92010502/02; заявл. 07.12.1992; опубл. 27.06.1995. 8 с.
126. Способ приготовления жидкостекольной холоднотвердеющей смеси: пат. 2033882 РФ: МПК B22 C5/04, 1/10, 1/18. № 4948105/02; заявл. 24.06.91;

опубл. 30.042.95, Бюл. №15. 5 с.

127. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1611544СССР: МКл В22 С1/02, 1/18. № 460080/31-02; заявл. 20.09.88; опубл. 07.12.90, Бюл. №45. 2 с.

128. Пономаренко О.И., Каратеев А.М., Евтушенко Н.С., Берлизива Т.В. Опыт изготовления оливок на основе жидкого стекла с использованием АЦЭГ. *Металл и литье Украины*. 2010. №11. С. 20-23.

129. Белобров Е.А., Карпенкова О.А., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологи: стержни и формы из жидкостекольных смесей, упрочняемых жидкими отвердителями. *Литье Украины*. 2016. №5 (189). С. 17-21.

130. Походня И.Т., Лихачев Л.И., Чмеленко В.Д. Жидкостекольные смеси на ощелаченных песках. *Литейное производство*. 1969. № 10. С. 35.

131. Stachowicz M., Granat K., Pałyga Ł. Effect of Sand Wetting on Physically Hardened Moulding Sands Containing a Selected Inorganic Binder. Part 2. *Archives of foundry engineering*. 2016. Vol. 16, Issue 1. Pp. 79-84.

132. Иванов Н.Х. Упрочнение смесей ультразвуком при изготовлении стержней. *Литейное производство*. 1975. № 9. С. 26.

133. Классен В.И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1982. 296 с.

134. Вишняков Х.И. Жидкостекольные самотвердеющие смеси с омагниченным связующим. *Литейное производство*. 1976. № 2. С. 21.

135. Писаренко И.Н., Юрченко Н.П. Магнитная обработка композиции феррохромовый шлак – жидкое стекло – вода. *Литейное производство*. 1975. № 10. С. 21.

136. Крутилин А.Н., Гуминский Ю.Ю., Русевич О.А., Кульбицкая Л.В. Повышение эффективности использования жидкостекольных смесей. Ч. 2. Электрофизические способы воздействия. *Литьё и металлургия*. 2018. №2 (91). С. 50-56.

137. Юрасов В.В., Сильченко Т.Ш., Кидалов Н.А. Исследование растворения силикат-глыбы, активированной ударно-волновой обработкой. *Литейщик России*. 2008. № 10. С. 33-35.

138. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2425732 РФ: МПК B22 C1/02. № 2010130970/02; заявл. 23.07.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. №22. 6 с.

139. Смесь для изготовления литейных форм и стержней в нагреваемой оснастке: пат. 2058211 РФ: МПК B22 C1/18, 1/02, 1/10. № 4908652/02; заявл. 05.02.91; опубл. 20.04.96. 7 с.

140. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1159715 СССР: МКл B22 C1/02. № 3661539/22-02; заявл. 015.11.83; опубл. 07.06.85, Бюл. №21. 7 с.

141.Состав смеси для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1222390 СССР: МКл B22 C1/00, 1/02. № 37598482/22-02; заявл. 26.06.84; опубл. 07.04.86, Бюл. № 13. 4 с.

142. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1547936 СССР: МКл B22 C1/02, 1/18. № 4436202/23-02; заявл. 06.06.88; опубл. 07.03.90, Бюл. № 9. 2 с.

143. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1611544 СССР: МКл B22 C1/02, 1/18. № 4600801/31-02; заявл. 20.069.88; опубл. 07.12.90, Бюл. № 45. 2 с.

144.Скворцов В.А. Разработка и исследование легковыбиваемых жидкостекольных смесей: дис. … канд. техн. наук. / Минск, 1985. 222 с.

145. Кукуй Д.М., Мыльникова Н.Д., Есепкин В.А. Влияние полифосфата натрия на свойства модифицированного силикатного связующего. *Металлургия*. 1986. № 20. С. 58-60.

146. Крутилин А.Н., Гуминский Ю.Ю., Русевич О.А., Кульбицкая Л.В. Повышение эффективности использования жидкостекольных смесей. Обзорная информация. Ч. 1. Модифицирование. *Литьё и металлургия*. 2018. №1 (90). С. 47-54.

147. Хайко Г. Разработка модифицированных многоатомными спиртами жидкостекольных связующих материалов и смесей на их основе, отверждаемых сложными эфирами: автореф. дис. … канд. техн. наук. / Минск, 1989. 14 с.

148. Кукуй Д.М., Милов А.М., Дмитрович А.М. Исследование процессов получения и использования органоминеральных материалов на основе

жидкого стекла. *Литейное производство*. 1980. № 8. С. 10-11.

149. Кукуй Д.М., Шевчук В.В., Корженевич М.Н. Автоклавное модифицирование жидкого стекла высокомолекулярными соединениями. *Литейное производство*. 1989. № 2. С. 10-11.

150. Васин Ю.П., Бортников М.М., Крюкова И.В., Гурлев В.Г. Применение модифицированного жидкостекольного связующего в целях улучшения условий труда выбивщиков. *Литейное производство*. 1987. №1. С. 29-30.

151. Кукуй Д.М., Мыльникова Н.Д., Шевчук В.В., Есепкин В.А. Модифицирование жидкого стекла фосфорсодержащими неорганическими полимерами. *Литейное производство*. 1988. №1. С. 17-18.

152. Жуковский С.С., Зибельман Е.Н., Шувалов В.Г., Наволокина Р.А. Модифицирование жидкостекольных смесей акриловыми полимерами. *Литейное производство*. 1982. №8. С. 14-15.

153. Гобрис С., Антонович В. Влияние добавок на свойства жидкостекольных композиций. *Литейное производство*. 2002. №8. С. 22-24.

154. Леушин И.О., Кошелев О.С., Маслов К.А., Титов А.В. Оценка применимости разупрочняющих добавок в практике производства литейных стержней. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2020. Т.18. №3. С. 25-33.

155. Smyksy K., Kmita A., Hutera B., Drozynski D., Stypula B., Hajos M., Starowicz M. Cohesion and adhesion properties of modified water glass with colloidal solution of ZnO. *Metalurgija (Zagreb)*. 2014. Vol. 53. №. 4. Pp. 459-462.

156. Леушин И.О., Кошелев О.С., Маслов К.А., Титов А.В. Оценка применения разупочняющих добавок в практике производства литейных стержней. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2020. Т.18. №3. С. 25-33.

157. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідко скляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № a 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7с.

158. Анализ различных типов оборудования и технологий сушки [электронный ресурс]. Режим доступа:

http://hipzmag.com/tehnologii/hranenie/analiz-razlichnyh-tipov-oborudovaniya-i-tehnologij-sushki/

159. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. М.: «Пищевая промышленность», 1973. 528 с.

160. Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов: справочное пособие. Москва: ДеЛи, 2000. 294 с.

161. Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов. М.: «Пищевая промышленность», 1976. 248 с.

162. Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденберг Я.М. и др. Сушка пищевых растительных материалов. М: «Пищевая промышленность», 1971. 440 с.

163. Антипов С.Т. Тепло- и массообмен при конвективной сушке в движущемся слое продукта. Модернизация существующего и разработка новых видов оборудования для пищевой промышленности: *Сборник научных трудов, Воронежская государственная технологическая академия*. Воронеж, 2003. № 13. С. 6-9.

164. Антипов С.Т., Валуйский В.Я., Меснянкин. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном. Воронеж: ВГТА, 2001. 308 с.

165. Клямкин Н.К. ИК-сушка перспектива развития сушильной отрасли. *Техника и оборудование для села*. 1999. № 523. С. 20-21.

166. Лыков А.В. Теория сушки. М.: «Энергия», 1968. 472 с.

167. Антипов С.Т. Влияние значений напряженности электромагнитного поля на процесс диэлектрической сушки семян кориандра. *Хранение и переработка сельхоз сырья*. 2002. № 9. С. 50-51.

168. Явчуновский В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка: физиче-ские основы, технологии и оборудование. Саратов: изд-во Сарат. ун-та, 1999. 213 с.

169. Морозов О., Каргин А., Савенко Г., Требух В., Воробьев И. Промышленное применение СВЧ-нагрева. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2010. №3. С. 2-6.

170. Гапоненков И.А., Федорова О.А. Сферы использования электромагнитного поля сверхвысокочастотного диапазона в современном мире. *Проблемы региональной экологии*. 2018. №1. С. 120-126.

171. Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор). *Лесной журнал*. 2017. № 2. С. 173-187.

172. Гульмалиев Э.А., Третьяков В.Ф. Талышинский Р.М., Борисов В.П., Мовсумзаде Э.М. Химические аспекты развития технологии СВЧ. *История и педагогика естествознания*. 2015. № 2. С. 59-68.

173. Королев А.А., Тюрина С.Б., Тришканева М.В. Анализ применения микроволнового излучения в технологиях стерилизации растительного сырья. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств*». 2019. № 3. С. 81-91.

174. Иванова А.П., Барсукова С.О., Халимендик А.В., Чумак А.Н. Анализ и перспективы исследований влияния СВЧ-излучения на строительные растворы и бетоны. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2019. № 3. С. 121-129.

175. Кувалдин А.Б. Диэлектрический нагрев. Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1969-1978.

176. Глуханов Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. 64 с.

177. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 480 с.

178. Донской А.В. Высокочастотная электротермия. Справочник. М.-Л., 1965. 564 с.

179. Брицин Н.Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты. М., Л.: Машиностроение, 1965. 186 с.

180. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. М.: Энергия, 1968. 310 с.

181. Бондаренко С.В. СВЧ-устройства для бытового и промышленного применения: учебное пособие. М.: Издательскийдом МЭИ, 2010. 36 с.

182. СВЧ-Энергетика. Т. 1. Генерирование. Передача. Выпрямление. Под ред. Э. Окресса, Э.Д. Шлифера; пер. с англ. В.Г. Алыбина. М.: Мир, 1971. 463 с.

183. Рущиц А.А., Щербаков Е.И. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. 2014. Т.2. №1. С. 9-15.

184. Четвериков Е.А., Лягина Л.А., Моисеев А.П. Микроволновое и инфракрасное излучение в технологиях сушки продукции растительного происхожде-ния: монография. ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». Саратов: Амирит, 2016. 186с.

185. Шутюк В.В. Застосування мікрохвильового випромінювання для сушіння харчових продуктів. *Наукові праці НУХТ*. 2015. Т. 21. № 3. С. 133-40.

186. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000. 264 с.

187. Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1976. 210 с.

188. Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 199 с.

189. Толстов В.А., Архангельский Ю.С. Эффективность электротехнологических установок. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.

190. Архангельский Ю.С., Гришина Е.М., Лаврентьев В.А., Слепцова С.К. СВЧ модификация полимеров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

191. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

192. Репях С.И., Андреева А.В. Оценка равномерности нагрева графитсодержащих формовочных смесей и тел СВЧ-излучением. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 29-32.

193. Саулов А.Ю. Современные микроволновые печи. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. 192 с.

194. Римар Т.Е. Розробка наукових основ НВЧ-технології композиційних матеріалів для теплоізоляції на основі рідинного скла. дис. ... докт. тех. наук: 05.23.05 / Український державний університет залізничного транспорту. Харків, 2021. 415 с.

195. Чернушенко А.М., Меланченко Н.Е., Малорацкий Л.Г., Петров Б.В. Конструкции СВЧ устройств и экранов: Учебное пособие для вузок. М.:

Радио и связь, 1983. 400 с.

196. Бердоносов С.С. Микроволновая химия. *Соросовский образовательный журнал*. 2001. Т.7. №1. С. 32-38.

197. Dawson T.W., Stuchly M.A., Caputa K., Sastre A., Shepard R.B., Kavet R. Pacemaker interference and low-frequency electric induction in humans by external fields and electrodes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2000. V. 9. № 47. Pp. 1211-1218.

198. Dawson T. W., Caputa K., Stuchly M.A., Shepard R.B., Kavet R., Sastre A. Pacemaker interference by magnetic fields at power line frequencies. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2002. V. 3. № 49. Pp. 254-262.

199. Pozar D.M. Microwave engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 17 p.

200. Thostenson E.T., Chou T.W. Microwave processing: fundamentals and applications. Composites Part A: *Applied Science and Manufacturing*. 1999. V. 9. № 30. Pp. 1055-1071.

201. Oh J.H., Oh K.S., Kim C.G., Hong C.S. Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges. *Composites Part B: Engineering*. 2004. V. 1. № 35. Pp. 49-56.

202. Shen G., Xu Z., Li Y. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on W-type La-doped ferrite and carbon fiber composites. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2006. № 2. Pp. 325-330.

203. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопи. Казань, 2008. 112 с.

204. Ashby M.F., Jones D.R.H. Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann, 2005. 464 p.

205. Солоненко Л.І. Нагрівання діелектричних матеріалів мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 131-135.

206. Пархомерноко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.

207. Mujumdar S.A. Handbook of Industrial Drying. GB: Taylor& Francis Group. LLC, 2006. 1312 p.

208. Kowalski S.J. Drying of porous materials. *Transport in Porous Media*. 2007. № 66 (1-2). 235 p.

209. Матюха М.В., Костикова Е.И., Усенко Р.В., Репях С.И. Содержание воды в силикате натрия песчано-жидкостекольной смеси после её тепловой и СВЧ-сушки. *Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріалиі обладнання у ливарному виробництві», 26-28 вересня 2017 р*. Краматорськ: ДДМА, 2017. С. 90.

210. Солоненко Л.І. Структурування піщано-рідкоскляних сумішей мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 127-131.

211. Granat K., Nowak D., Pigiel M., Stachowicz M., Wikiera R. The influence of microwave curing time and water glass kind on the properties of molding sands. *Archives of foundry engineering*. 2007. № 4. Pp. 79-82.

212. Granat K., Nowak D., Piligiel M., Stachowicz M., Wikiera R. The influence of water glass on the properties of microwave cured molding sands. *Archives of foundry*. 2008. № 1. Pp. 123-126.

213. Stachowicz M., Granat K., Nowak D. Studies on the possibility of more effective use of water glass thanks to application of selected methods of hardening. *Archives of foundry engineering*. 2010. № 2. Pp. 135-140.

214. Stachowicz M., Granat K., Nowak D. Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands. Part 2. *Archives of foundry engineering*. 2011. № 2. Pp. 143-148.

215. Малявский Н.И. Щелочно-силикатные утеплители – химические основы производства. *Российский химический журнал*. 2003. № 4.С. 39-45.

216. Кудяков А.И., Зиновьев А.А., Дворянинова Н.В. Морозостойкие кладочные растворы пониженной плотности с добавками микоркремнезема и омыленного талового пека. *Вестник ТГАСУ*. 2008. № 4. С. 99-105.

217. Торубриев Б.Д. Строительные материалы на основе силикатнатриевых композиций. М.: Стройиздат, 1988. 208 с.

218. Кудяков А.И., Свергунова Н.А. Исследование процесса получения зернистого теплоизоляционного материала на основе высокомодульной жидкостекольной композиции из микоркремнезема. *Вестник ТГАСУ*. 2008. № 1. С. 130-137.

219. Генеролав Б.В., Крифукс О.В., Малявский Н.И. Бисипор – новый эффективный минеральный утеплитель. *Строительные материалы*. 1999. № 1.С. 7-8.

220. Рыжков И.В., Толстой В.С. Физико-химические основы формирования свойств смесей с жидким стеклом. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1975. 136 с.

221. Лазарев А.Н. Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах. М.: Наука, 1965. 233 с.

222. Кудяков А.И., Свергунова Н.А, Иванов М.Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография / под ред. А.И. Кудякова. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 204 с.

223. Кутугин В.А. Управление процессами термической поризации жидкостекольных композиций при получении теплоизоляционных материалов: автореф. дис. на здобуття наук.ступення канд. техн. наук: Томск, 2008. 25 с.

224. Заболоцкая А.В. Технология и физико-химические свойства пористых композиционных материалов на основе жидкого стекла и природных силикатов: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.17.11, 02.00.01. Томск, 2003. 22 с.

225. Лотов В.А., Кутугин В.А. Технология материалов на основе силикатных дисперсных систем: учеб. пособ. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 202 с.

226. Рымар Т.Э. Исследования структуры теплоизоляционных материалов на основе жидкого стекла в зависимости от количества газообразующего агента. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського*. *Серія: технічні науки. Хімічнітехнології.* 2018. Т. 29 (68). Ч. 2. № 6. С. 77-81.

227. Мамишев В.А., Шинский О.И., Соколовская Л.А. Пути ускорения процессов затвердевания и кристаллизации в песчаных формах. *Материалы XII Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия-2016»*. Запорожье, 2016. С. 159-161.

228. Анисович А.Г., Андрушевич А.А. Структуры металлов и сплавов в технологических процессах машиностроения. Минск: Беларуская навука, 2018. 134 с.

229. Котлярский Ф.М., Дука В.М. Комплексное влияние водородного рафинирования и скорости затвердевания на структуру и механические свойства сплава АК7. *Процессы литья*. 2016. № 2 (116). С. 9-22.

230. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976. 552 с.

231. Флемингс М. Процессы затвердевания / Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 423 с.

232. Kostryzhev A.G., Slater C.D., Marenych O.O., Davis C.L. Effect of solidification rate on microstructure evolution in dual phase microalloyed steel. *Scientific Reports*. 2016. № 6. Pp. 1-7.

233. Cai Z., Zhang C., Wang R., Peng C., Qiu K., Wang N. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al – Si alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016. Vol. 26. No. 4. Pp. 391-397.

234. Brionne G., Loucif A., Zhang C.P., Lapierre-Boire L.P., Jahazi M. 3D FEM simulation of the effect of cooling rate on SDAS and macrosegregation of a high strength steel. *Materials Science Forum*. 2018. № 941. Pp. 2360-2364.

235. Ali M., Porter D., Kömi J., Eissa M., El Faramawy H., Mattar T. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2019. № 26. Pp. 1350-1365.

236. Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Том 63. № 5. С. 327-334.

237. Barkhudarov M.R.. Computer Modelling of Solidification of Pure Metalsand Alloys, 1995. 291 p.

238. Shahane S., Aluru N., Ferreira P., Kapoor S.G., Vanka S.P. Finite volumes imulation frame work for diecasting with uncertainty quantification. *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 74. Pp. 132-150.

239. Hirata N., Anzai K. Heat transfer and solidification analysis using adaptive resolution particle method. *Materials Transactions.* 2019. Vol. 60. № 1. Pp. 33-40.

240. Krajewski P.K., Buraś J., Piwowarski G. Thermal Properties of Foundry Mould Made of Used Green Sand. *Archives of Foundry Engineering*.2016. № 16(1). Pp. 29-32.

241. Lagiewka M. Determination of Thermo Physical Properties for Selected Molding Sands. *Acta Physica Polonica*. 2019. № 136 (6). Pp. 992-995.

242. Krajewski P.K., Piwowarski G. Range Of Thermal Conductivity Changes of Wet Green Foundry Sand During Casting Solidification. *Archives of Metallurgy and Materia*ls. 2015. № 60 (3). Pp. 2391-2395.

243. Krajewski P.K., Piwowarski G., Krajewski W.K., Suchy J.S.High Temperature Thermal Properties of Bentonite Foundry Sand. *Archives of Foundry Engineerin*g. 2015. № 15(2). Pp. 47-50.

244. KrajewskiP.K., PiwowarskiG., BurasJ., Krajweski W.K. Thermo-Physical Properties of Selected Inconel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. № 59(3). Pp. 1055-1058.

245. Рабочие свойства смесей [электронныйресурс]. Режим доступа: http://industrial-wood.ru/tehnologiya-liteynogo-proizvodstva/10547-rabochie-svoystva-smesey.html (дата: 05.11.2018).

246. Думанский А.В. Учение о коллоидах. М.,Л.: Госэнергоиздат, 1948. 455 с.

247. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. М., Л.: Сельхозгиз, 1930. 278 с.

248. Сегалова Е.Е., Конторович С.И., Ребиндер П.А. Особенности кинетики пересыщения в водных суспензиях окиси кальция.*Докл. АН СССР*. 1958. С. 509-512.

249. Казанский М.Ф. Анализ форм связи и состояния влаги, поглощённой дисперсным телом с помощью кинетических кривых сушки. *ДАН СССР*. 1960. Т. 30. №5. С. 12-14.

250. Алексеев Г.В., Егорова О.А., Леу А.Г., Дерканосова А.А. Особенности

сушки порошковых пищевых продуктов в псевдоожиженном режиме. *Вестник Южно-Уральского государственного университета.* 2017. №4. С. 34-40.

251. Кодылев А.В., Лозинов А.Н., Садыков Р.А. Кинетика конвективной сушки сыпучих и дисперсных строительных материалов в сушильной установке с рекуперацией теплоносителя. *Известия КазГАСУ*. 2016. № 4 (38). С. 308-313.

252. Кундас С.П., Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Адамович А.Л. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярнопористых средах. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2007. 292 с.

253. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 480 с.

254. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.,

255. Тепло- и массоперенос. Том IV. Тепло- и массоперенос в процессах сушки. Под ред А.В. Лыкова и Б.М. Смольского. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 398 с.

256. Антипов С.Т., Торопцева В.В., Мартеха А.Н., Берестовой А.А., Юрова И.С. Кинетика процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем слое. *Вестник ВГУИТ*. 2019. Т.81. №4. С. 17-21.

257. Ефримов Г.И., Геллер Ю.А. Моделирование кинетики сушки материалов для строительной керамики. *Вестник Московского информационно-технологического университета – Московского архитектурно-строительного института***.** 2018. №1. С. 14-19.

258. Гаврилова Н.Д., Малышкина И.А. Влияние изменений в структуре сетки водородных связей воды на электрофизические свойства систем «матрица-вода» при ступенчатом нагреве. *Вестник московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2018. № 6. С. 74-80.

259. Кинетика сушки [электронный ресурс]. Режим доступа: https://studbooks.net/1979778/tovarovedenie/kinetika_sushki

260. Саломатов В.В., Карелин В.А., Саломатов В.В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией. II. Стадия постоянной

скорости сушки. *Известия Томского университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 12. С. 119-125.

261. Курбанова М.Ж., Додаев К.О., Курбанов Ж.М. Исследование процесса сушки плодов яблок СВЧ-конвективным способом. *Пищевая промышленность*. 2015. № 10. С. 19-21.

262. Мелеков В.И., Шульгин В.А. Контроль процесса сушки пиломатериалов в СВЧ-лесосушильной камере резонаторного типа. Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2016. №1 (344). С 122-130.

263. Казарцев Д.А., Журавлев А.В., Юрова И.С., Бородина А.В. Исследование кинетики сушки семян расторопши в вехривой камере с СВЧ-энергопроводом. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2015. №4. С. 32-37.

264. Wang Jina, Fan Zitian, Zan Xiaolei. Properties of sodium silicate bonded sand hardened by microwave heating. *China Foundry*. 2009.№ 6. Pp. 191-196.

265. Мулев Ю.В., Смирнов С.Н. Расчет диэлектрической проницаемости воды до 923 К и 1 ГПа. *Теплофизика високих температур.* 1992. Т.30. № 1. С. 58-62.

266. Мулев Ю.В., Арефьев К.М., Беляев О.В., Мулев М.Ю., Заяц Т.А. Обобщение данных диэлектрической проницаемости жидкой и паровой фаз воды с целью определения паросодержания двухфазных состояний. Электронный ресурс. Точка доступа: http://docplayer.com/76680953-Obobshchenie-dannyh-po-dielektricheskoy-pronicaemosti-zhidkoy-i-parovoy-faz-vody-s-celyu-opredeleniya-parosoderzhaniya-dvuhfaznyh-sostoyaniy.html

267. Гримзин И.А., Пономаренко О.И., МариненкоД.В., Евтушенко Н.С. Исследование процесса сушки гипсовых форм. *Металл и литье Украины*. 2017. № 2-3 (285-286). С. 41-44.

268. Дворкін Л.Й. Будівельні в’яжучі матеріали. Рівне: НУВГП, 2019. 622 с.

269. Мазурак Т.А. Наномодифіковані портландцементні композиції та швидкотверднучі бетони на їх основі. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 /Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2017. 213 с.

270. Крутилин А.Н., Гуминский Ю.Ю., Русевич О.А. Повышение

эффективности использования жидкостекольных смесей. Ч. 4. Комбинированное упрочнение. *Литье и металлургия*. 2018. №4 (93). С. 38-44.

271. Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Титунин А.А., Свиридов А.В. Исследование влияния стабилизаторов на свойства карбамидоформальдегидного связующего и фанеры ФК. *Лесотехнический журнал*. 2020. № 1. С. 136-143.

272. Демчук Ю.Я. Бітуми, модифіковані смолами, одержаними з фенольної фракції кам'яновугільної смоли. дис. ... докт. филос.: 161 – хімічні технології та інженерія 16 – хімічна та біоінженерія / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2020. 213 с.

273. Ищенко С.С., Придатко А.Б., Новикова Т.И., Лебедев Е.В. Взаимодействие изоцианатов с водными растворами силикатов щелочных металлов. *Высокомолекулярные соединение. Серия А*. 1996. Т. 38, № 5. С. 786-791.

274. Скачкова В.К., Грачев А.В., Шаулов А.Ю., Берлин А.А. Неорганические полимеры на основе силикатов натриевого жидкого стекла. Особенности поликонденсации силикатов. *Химическая физика*. 2019. Т. 38. № 9. С. 78-82.

275. Леонович С.Н., Щукин Г.Л., Беланович А.Л., Савенко В.П., Карпушенков С.А. Особенности получения щелочно-силикатных теплоизоляционных материалов. *Наука и техника*. 2012. № 6. С. 45-50.

276. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машиностроение, 1979. 210 с.

277. Илларионов И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2011. №1. С. 233.

278. Илларионов И.Е., Шалунов Е.П., Стрельников И.А., Королев А.В., Моисеева О.В. Формирование качества поверхности литейной формы и отливок. *Материалы II Республиканской НПК «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии»*. Чебоксары: Чуваш.гос. ун-т, 2016. С. 44-51.

279. Romero A.R., Toniolo N., Boccaccini A. R., Bernardo E. Glass-Ceramic Foams from «Weak Alkali Activation» and Gel-Casting of Waste Glass / Fly Ash Mixtures. *Materials*. 2019. № 12 (588). Pp. 1-14.

280. Wattanasiriwech D., Nontachit S., Manomaivibool P. , Wattanasiriwech S. Foam glass from municipal waste as a lightweight aggregate for cement mortar. *IOP Conferens Series: Earth and Environmental Science.* 2019. № 351. Pp.1-6.

281. Васин Ю.П., Иткис З.Я. Смеси для изготовления стержней по нагреваемой и ненагреваемой оснастке. Челябинск: ЧПИ, 1977. 35 с.

282. Жуковский С.С., Анисович Г.А., Давидов Н.И. Формовочные материалы и технологии литейной формы: Справ. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.

283. Жуковский С.С. Смеси холодного отверждения для крупносерийного и массового производства. *Литейное производство*. 1974. № 1. С. 1-3.

284. Белобров Е.А., Чернявский В.В., Вдовенко В.Г. Отверждение жидкостекольных смесей разбавленным углекислым газом. *Литейное производство*. 1987. № 2. С. 14-16.

285. Семик А.П., Степаненко А.В., ЦветковА.Э. Специальные формовочные смеси с регулируемыми технологическими свойствами. *Литейное производство*. 1996. № 2. С. 22.

286. Исаев Г.А. Современные жидкостекольные смеси для форм и стержней. *Литейное производство*. 2004. № 2. С. 16.

287. Иткис З.Я., Никифорова М.В., Никифорова А.П. Изготовление стержней из жидкостекольной смеси в нагреваемой оснастке. *Литейное производство*. 1995. № 4. С. 37.

288. Иткис З.Я., Никифорова М.В. Повышение скорости отверждения жидкостекольных смесей в нагреваемой оснастке. Теория и технология литейного производства: сб. науч. тр. Челябинск: ЧГТУ, 1996. С. 114-118.

289. Иткис З.Я., Никифорова М.В. Формирование прочности жидкостекольных смесей при нагреве. Теория и технология литейного производства: сб. науч. тр. Челябинск: ЧГТУ, 1996. С. 107-113.

290. Маслов К.А., Леушин И.О., Миронычев А.Е. Пути повышения технологичности жидкостекольных смесей. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 2. С. 8-11.

291. Маслов К.А., Леушин И.О., Плохое С.В. К вопросу о методах

повышения технологичности жидкостекольных смесей. *Литейщик России*. 2010. № 2. С. 26-29.

292. Илларионов И.Е., Петрова Н.В. Особенности применения жидкостекольных смесей. *Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева*. 2010. № 4 (68). С.62-70.

293. Мариенбах Л.М. Сушка и химическое твердение форм и стержней. М.: НТО Машпрома, 1958. 248 с.

294. Новые материалы в машиностроении. Под ред. Л.Я. Попилова. Л.: Машиностроение, 1967. 428 с.

295. Долгопалов Л.Б., Скурихин А.В., Шаповалов А.Н. Анализ брака литых чугунных валков (часть 1). *Литейное производство*. 2014. №1. С. 53-56.

296. Одарченко И.Б., Прусенко И.Н. Процессы взаимодействия жидкого метала и литейного стержня при формирования качества внутренних полостей оливок. *Литье и металлургия*. 2015. №4. С. 33-37.

297. Одарченко И.Б., Прусенко И.Н. Управление качеством литейных стержней и внутренних поверхностей оливок. *Литье и металлургия*. 2015. №1. С. 12-16.

298. Орендарчук Ю.В., Мариненкр Д.В., Борисенкр С.В., Лоек И.О., Ананьин В.С. Мониторинг качества отливок для использования с системах автоматизированного проектирования технологий литейного производства. *Science Rise*. 2017. № 4. С. 48-52.

299. Тринева Т.Л. Обеспечение размерной точности формообразующих поверхностей литейной оснастки, изготовленной с помощью технологий быстрого прототипирования (Rapidprototyping). *Процессы литья*. 2009. №3. С. 31-35.

300. Каратеев А.М., Пономаренко О.И., Берлизева Т.В. Современные тенденции применения смесей на жидком стекле с эфирными отвердителями. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2018. №2 (204). С. 70-72.

301. Коваленко В.С. Металлографические реактивы. М.: Металлургия, 1981. 120 с.

302. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления. Справочное издание. Перевод с нем. М.: Металлургия, 1988. 400 с.

303. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. Текучесть порошков композиционных цементов (ТМЦ и ЦНВ) и их минеральных компонентов.

Известия КГЛСУ. 2012. № 4 (22). С. 356-361.

304. Афонин Ю.С., Дубровин В.И. Моделирование составов смесей методом симплексных решёток. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2004. №2. С. 60-63.

305. Анисович Г.А. Затвердевание отливок.Минск: Наука и техника, 1979. 232 с.

306. Теплофизические свойства металлов и сплавов (таблица) [электронный ресурс]. Режим доступа: https://infotables.ru/materialy/489-teplofizicheskie-svojstva-metallov-i-splavov

307. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М. Энергия, 1977. 344 с.

308. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины. Справочник; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

309. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

310. Метод гідростатичного зважування [электронный ресурс]. Режим доступа: http://manualsem.com/book/611-fizika-ta-fizichni-metodi-doslidzhennya-materialiv/36-353-metod-gidrostatichnogo-zvazhuvannya.html.

311. Репях С.И., Андреева А.В. Особенности нагрева графитсодержащих формовочных смесей и тел СВЧ-излучением. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6. С. 38-41.

312. Белай Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента: учеб.пособие. Изд. 2-е, доп. СПб.: СЗТУ, 2010. 225 с.

313. Грачёв Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. М.: ДеЛипринт, 2005. 296 с.

314. Репях С.И., Соценко О.В., Жегур А.А. О типичных ошибках при обработке экспериментальных данных (памятка для начинающих исследователей). *Литьё Украины*. 2011. №11. С. 18-30.

315. Фык М.И., Горелик С.И., Раевский Я.А. Петрофизика нефтегазовых коллекторов и флюидоупоров: учебное пособие для студентов образовательно-

квалификационного уровня магистр направления «Геология» и «Добыча нефти и газа».Под ред. И.М. Фыка. Харьков: ТО Эксклюзив, 2015. 186 с.

316. Комаренко В.В., Никиченков А.Н., Молоков В.Ю. О применении СВЧ-печи для определения влажности грунтов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. №11. С. 60-74.

317. Solonenko L.I., Bilyi O.P., Repiakh S.I., Kimstach T.V., Uzlov K.I. Heating rate of granular inorganic materials by microwave radiation. *Naukoyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychoho Universytetu*. 2020. №2. Pp. 37-41.

318. Первунина А.А. О вещественном составе титаноциркониевых россыпей Малышевского месторождения. *Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.* 2012. № 50 (91). С. 52-55.

319. Диэлектрическая постоянная [электронный ресурс]. Режим доступа: https://ua.krohne.com/ru/servis/diehlektricheskaja-postojannaja

320. Левченко Е.Н. Влияние вещественного состава на технологические свойства титано-циркониевых россыпей. *Разведка и охрана недр*. 2004. № 11. С. 44-48.

321. Балкевич В.Л. Техническая керамика. Учеб. пособие для втузов. 2-2 изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

322. Муллитовая и муллито-корундовая керамика [электронный ресурс]. Режим доступа: https://vuzlit.com/426902/mullitovaya_mullito_korundovaya_keramika

323. Диэлектрическая проницаемость - База знаний [электронный ресурс]. Режим доступа: https://info.rusautomation.ru

324. Крючков Ю. Н., Лепорский А. Н. Измерение диэлектрической проницаемости диэлектриков при одностороннем доступе к изделию. *Дефектоскопия*. 1977. № 5. С. 134-136.

325. Поплавко Ю.М. Фізика твердого тіла: підручник. В 2-х томах. Том 2: Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 379 с.

326. Диэлектрическая проницаемость различных веществ, в т.ч. основных диэлектриков [электронный ресурс]. Режим доступа: https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnethism/DEPLiquids/Diel

ectricConstanVarious
327. Солоненко Л.И. Некоторыеособенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения. *Метал та лиття України*. 2020. №1. С. 69-78.
328. Романов В.В., Прохорова А.И., Копылова О.А. Экспериментальное исследование теплообмена при испарении капли воды с теплонапряженной поверхности. *Молодой ученый*. 2016. № 20. С. 185-188.
329. Боришанский В.М. Теплопередача к жидкости, свободно растекающейся по поверхности, нагретой выше температуры кипения. М.-Л.: Госэнергоздат, 1953. 350с.
330. Солоненко Л.И., Репях С.И. Оценка реального уровнямощности СВЧ-излучения в рабочей камере СВЧ-печи. *The 1st International scientific and practical conference "Priority directions of science development" (October 28-29, 2019) SPC "Sci-conf.ua", Lviv, Ukraine*. 2019. Pp. 122-125.
331. Солоненко Л.І., Реп´ях С.І. Вплив розмірів та положення наважок води на обертовому столі мікрохвильової печі на тривалість їх випаровування. *Modern science: innovations and prospects. The 3rd International scientific and practical conference (December 5-7, 2021).* SSPGPublish, Stockholm, Sweden. 2021. Pp. 296-300.
332. Крауфорд. Ф.С. Берклеевский курс физики. Том 3. Волны. М.: Наука, 1984. 512 с.
333.Солоненко Л.І., Реп´ях С.І., Узлов К.І. Випаровування малих мас води при їх обертанні в області стоячих хвиль мікохвильового випромінювання. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. № 1. С. 57-67.
334. Солоненко Л.І., Реп´ях С.І., Мазорчук В.Ф. Тривалість нагріву та випаровування води з парних навісок масою до 100 г мікрохвильовим випромінюванням. *Modern science: innovations and prospects. The 3rd International scientific and practical conference (December 5-7, 2021).* SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. Pp. 301-305.
335. Солоненко Л.І. Нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі у присутності матеріалів різної природи. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в*

машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 176-179.

336. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І. Структурування формувальних та стрижневих сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №2. С. 23-31.

337. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І. Структурування плакованого кварцового піску паро-мікрохвильовим затвердінням. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-практичної конференції, 28…29 квітня 2021 р., М. Київ.* Київ: КПІ імю І. Сікорського, 2021. С.168-169.

338. Солоненко Л.І., Узлов К.І., Реп'ях С.І. Новий спосіб виготовлення форм та стрижнів для виробництва залізничного транспорту. *81 Міжнародна науково-практична конференція: Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту, 22-23 квітня 2021 р.* Дніпро: ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна, 2021. С. 233-235.

339. Солоненко Л.І. Деякі особливості процесу структурування піщано-рідкоскляної суміші у паро-мікрохвильовому середовищі. *Процеси лиття*. 2022. №1. С. 57-66.

340. Солоненко Л.І. Дослідження можливості структурування піщано-рідкоскляної суміші у мікрохвильовому випромінювання. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022 р., м. Київ.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 171-172.

341. Реп'ях С.І., Солоненко Л.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Узлов К.І. Властивості і структури компонентів піщано-рідкоскляних формувальних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2019. №1. С. 81-92.

342. Спосіб виготовлення ливарних форм за одноразовими замороженими моделями: пат. 125146 України. № а 201910047; заявл. 27.09.2019; опубл. 19.01.2022, Бюл . № 3. 6 с.

343. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І. Виготовлення ливарних форм паро-

мікрохвильовим затвердінням за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей. *Метал та лиття України*. 2021. № 1. С.38-45.

344. Солоненко Л.И., Репях С.И. Влияние СВЧ-излучения на распределение влаги в песке, находящемся в емкости трубчатого типа. *Литво. Металургія. 2019: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (21-23 травня 2019 р., м. Запоріжжя).* Запоріжжя, ААТандем. С. 190-192.

345. Liutyi R.V., Solonenko L.I., Osipenko I.O., Fedorov M.M., Morozov B.I. Physicochemical structure features of refractory compositions with inorganic binders. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. Т. 23. № 3. Pp. 612-619.

346. Solonenko L.I., Usenko R.V., Dziubina A.V., UzlovK.I.,RepiakhS.I. Sodium silicate solute foaming in a flat slot-type capillary under microwave radiation influence. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychogo Universytetu*. 2020. № 6. Pp. 34-40.

347. Айлер Р. Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: в 2 ч.; пер. сангл. Л. Ч. 1. М.: Мир, 1982. 416 с.

348. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Біцлий О.П., В'юнник І.В. Масопренос силікату натрію в капілярах щілинного типу. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-практичної конференції, 28…29 квітня 2021 р., м. Київ.* Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2021. С.165-167.

349. Solonenko L.I., Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Kimstach T.V., Bilyi O.P. Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychogo Universytetu*. 2021. № 1. Pp. 68-76.

350. Симаков И.Г., Доржин Г.Б. Дисперсия диэлектрической проницаемости в адсорбционном слое воды. *Исследования вобласти молекулярной физики: Сб. Трудов ИЕНБНЦСОРАН. Улан-Удэ*. 1994. С. 43-48.

351. Мокроусов Г.М., Горленко Н.П. Физико-химические процессы в магнитном поле. Томск: Издательство ТГУ, 1988. 127 с.

352. Гапочка Л.Д., Гапочка М.Г. Воздействие электро-магнитного излучения КВЧ- и СВЧ-диапазонов на жидкую воду. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия.* 1994. Т. 35. № 4. С. 71.

353. Шипунов Б.П., Селиков К.В. Исследование воздействия постоянного магнитного поля на некоторые свойства воды и водных растворов. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2005. № 9. С. 50-54.

354. Masumi Yamashita, Chris Duffield, William A. Tiller direct current magnetic field and electromagnetic field effects on the pH and oxidation-reduction potential equilibration rates of water. 1. Purified water. *Langmuir*. 2003. Issue. 19. Pp. 51-56.

355. Стась И.Е., Бессонова А.П. Влияние электромагнитного поля на кристаллизацию хлорида кобальта из водных растворов. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53, вып. 1.

356. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І. Уявна енергія активації рідкого скла на плакованому піску в паром ікро-хвильовому середовищі. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 164-170.

357. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І. Матеріальний баланс системи «водяна пара-пористе тіло» при атмосферному тиску. *Advances of science: Proceeding of articles the international scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv, 5 April 2019*. 2019. С. 27-30.

358. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І. Кінетика структурування піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням. *Теорія і практика металургії*. 2019. №4. С. 50-60.

359. Takata M., Molinelli J.E., Towozawa M., Watson E.B. Dielectric characteristics of $Na_2O{\cdot}3SiO_2$ glasses with high water contents. *Journal of the American Ceramic Society*. 1984. V.67 (2). Pp. 106-106.

360. Мулёв Ю.В., Арефьев К.М., Беляева О.В., Мулёв М.Ю., Заяц Т.А. Универсальная одно параметрическая зависимость диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от отношения плотности к

температуре. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2011. № 3. С. 50-58.

361. Порхоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.

362. Towozawa M., Takata M., Acocella J., Watson B., Takamori T. Thermal properties of $Na_2O{\cdot}3SiO_2$ glasses with high water content. *Journal of Non–Crystalline Solids*.1983. V. 56 (1–3). Pp. 343-348.

363. Takata M., Tomozawa M., Acocella J., Molinelli J., Erwin C., etal. Effect of water content on properties of $Na_2O{\cdot}3SiO_2$ glasses. *Journal de Physique Colloques*. 1982. №43 (C9). Pp. 455-458.

364. Солоненко Л.І. Газотвірність піщано-рідкоскляних формувально-стрижневих сумішей. *Процеси лиття*. 2021. № 3 (145). С. 44-52.

365. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В. Вибиваємість з виливків піщано-рідкоскляних сумішей, структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння. Теорія і практика металургії. 2021. №1. С. 37-45.

366. Solonenko L.I. , Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Bilyi O.P., Kimstach T.V. Water resistance of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №4. Pp. 41-46.

367. Солоненко Л.І.,Реп’ях С.І., Узлов К.І., Усенко Р.В. Міцність піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2019. №6. С. 33-39.

368. Шинский О.И., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Влияние состава, дисперсности и температуры охлаждения формовочных материалов на прочностные свойства низкотемпературных форм. *Металл и литье Украины*. 2016. № 11-12. С. 19-23.

369. Холоднотвердеющая смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2187405РФ: МПК B22C 2/16. № 2000127346/02; заявл. 01.11.200; опубл. 20.08.2002, Бюл. № 15. 3 с.

370. Суспензия для изготовления керамических форм: пат. 2241571 РФ: МПК B22C 1/16. № 2005108433/02; заявл. 25. 03.2005; опубл. 20.09.2006, Бюл. № 26. 4 с.

371. Solonenko L., Repiakh S., Uzlov K., Kimstach T. Crushing character of sand-sodium-silicate mixtures structured by steam-microwave treatment. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*. 2020. № 3(62). Pp. 5-13.

372. Stachowicz M., Granat K., Palyga L. Influence of sand preparation on properties of chromite moulding sands with sodium silicate hardened with selected methods. *Archives of metallurgy and materials.* 2017. № 62. Pp. 379-383.

373. Stachowicz M. Preliminary testing of microwave-cured joints made of adhesives based on hydrated sodium silicate and quartz sand. *Transactions of the foundry research institute*. 2018. № 58. Pp. 295-308.

374. Великанов Г.Ф., Примак И.Н., Бречко А.А. Прочность форм из ХТС. *Литейное производство*. 1988. № 1. С. 8-10.

375. Жуковский С.С., Борсук П.А. Перспективы применения смесей с жидким стеклом в литейном производстве. *Литейное производство*. 1983. № 1. С. 12-14.

376. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.

377. Тепляков С.Д., Сафронов В.А., Задов А.Е., Ольшовски Т., Вилкош Б. Отверждение ХТС с жидкими отвердителями на основе ацетатов этиленгликоля. *Литейное производство*. 1990. № 1. С. 11-12.

378. Солоненко Л.І., Реп′ях С.І., Узлов К.І. Оптимізація зернового складу піщано-рідкоскляних сумішей для структурування способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 28-38.

379. Солоненко Л.І., Білий О.П., Узлов К.І. Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2018. №6. С. 93-100.

380. Солоненко Л.И., Репях С.И. Осыпаемость жидкостекольных форм и стержней. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XIМіжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 178-179.

381. Солоненко Л.И., Репях С.И. Хрупкость структурированных смесей литейных форм и стержней. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня.2019)*. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С. 192-194.

382. Солоненко Л.И., Репях С.И. Работа выбивки песчано-жидкостекольных стержневых смесей из отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019).* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 173-177.

383. Solonenko L.I., Repiakh S.I., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Abramov S.O. Sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment effective values of the rmo-physical properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №6. Pp. 66-71.

384. Вейник А.И. Тепловые основы теории лиття. М: Машгиз, 1953. 383 с.

385. Сапожников М.Я., Булавин И.А. Машины и апараты силикатной промышленноси. Изд. 2-е, прерраб. и допол. М.: Промстройиздат, 1995. 424 с.

386. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. Изд. 4-е. Л.: ГХИ, 1963. 638 с.

387. Ciesielski M., Mochnacki B. Comparison of approaches to the numerical modelling of pure metals solidification using the control volume method. *International Journal of Cast Metals Research.* 2019. Vol. 32. № 4. Pp. 213-220.

388. Svidró J., Diószegi A., Svidró J.T. The origin of thermal expansion differences in various size fractions of silica sand. *International Journal of Cast Metals Research*. 2020. Vol. 33. № 6. Pp. 242-249.

389. Вейник А.И.Теория затвердения отливки. М.:Машгиз, 1960, с. 435.

390. Солоненко Л.І, Реп′ях С.І., Узлов К.І., Мазорчук В.Ф. Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків і якість їх поверхні. *Металл и литье Украины*. 2022. № 2. С. 59-71.

391. Фиговский О.Л., Кудрявцев П.Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых

композиционных материалов. *Эл.науч. журн. Инженерный вестник Дона*. 2014. Т. 29. №2. Режим доступа: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448

392. Кремнивые кислоты [электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_1813.html

393. Solonenko L.I., Usenko R.V., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Repiakh S.I. Carbonization and crushability of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 5. Pp. 40-46.

394. Солоненко Л.І., Реп´ях С.І. Міцність піщано-рідкоскляних сумішей, що структурували паро-мікрохвильовою обробкою. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 3. С. 39-47.

395. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І. Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2021. № 2. С. 52-59.

396. Солоненко Л.І. Вимоїни на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2022. № 1. С. 54-61.

397. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Издательство МЭИ, 1999. 168 с.

398. Солоненко Л.І., Реп´ях С.І.,Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих паро-мікрохвильовим затвердінням, на пригар і шорсткість поверхні виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №3. С. 50-61.

399. Солоненко Л.І. Досліджування спінювання рідкого скла під дією мікрохвильового випромінювання в структурованій піщано-рідкоскляній суміші. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 173-175.

400. Солоненко Л.И., Репях С.И., Усенко Р.В., Бежанова А.Н. Скленивание безопочных полуформ для производства бесстержневых отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 28-29 квітня. 2020)*. Київ, 2020. С. 114-116.

401. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І., Іванова Л.Х. Склеювання рідким склом структурованих піщано-рідкоскляних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2021. №3. С. 48-55.

402. Солоненко Л.И., Репях С.И., Белый А.П., Гуцу Т.А. Расчет минимально-допустимой прочности клеевых соединений литейных стержнем. *Литво. Металургія. 2020*: *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, 2020. С. 140-142.

403. Солоненко Л.І., Реп´ях С.І., Усенко Р.В., Кириченко Р.Д. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням по заморожених піщано-водяних моделях. *Литво. Металургія. 2021*: *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (18-20 вересня 2021 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, 2021. С. 190-192.

404. Куликов В.Ю., Квон С.С., Ковалева Т.В., Щербакова Е.П. Влияние режимов формообразования песчано-смоляных оболочек на качество изготовленных в них отливок. *Литьё и металлургия*. 2019. №2. С. 13-18.

405. Солоненко Л.І., Реп´ях С.І.,Узлов К.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних формувально-стрижневих сумішей, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння, на якість дрібних виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №4 (327). С. 64-74.

406. Stachowicz M., Pigiel M., Nowak D. Evaluation of electromagnetic absorbing capacity of materials in foundry industry. *Archives of foundry engineering*. 2010. № 10. Pp. 237-242.

407. Stachowicz M., Granat K. Pochłanianie mikrofal przez nieutwardzone masy formierskie ze szkłem wodnym. *Archives of foundry engineering*. 2013. № 13. Pp. 169-174.

408. Stachowicz M., Mazulis J., Granat K., Janus A. Influence of molding and core sand matrix on the microwaves absorption. Metalurgija. 2014. № 3. Pp. 317-319.

409. Holtzer M. Światowe tendencje rozwojowe w zakresie mas formierskich i rdzeniowych pod kątem oddziaływania na środowisko. *Przegląd Odlewnictwa*. 2011. № ¾. Pp. 112-121.

410. Granata K., Nowaka D., Pigiela M., Stachowicza M., Wikierab R.

Microwaves energy in curing process of water glass molding sands. *Archives of foundry engineering*. 2007. № 7. Pp. 183-188.

411. Stachowicz M., Granat K., Pałyga Ł. Effect of Sand Wetting on Physically Hardened Moulding Sands Containing a Selected Inorganic Binder. Part 1. *Archives of foundry engineering*. 2016. № 16. Pp. 73-78.

412. Stachowicz M., Granat K. Research on reclamation and activation of moulding sands containing water-glass hardened with microwaves. *Archives of foundry engineering*. 2014. № 14. Pp. 105-110.

413. Stachowicz M., Granat K., Nowak D. Dielectric hardening method of sandmixes containing hydrated sodium silicate. *Metalurgija*. 2013 № 52. Pp. 169-172.

414. Granat K., Opyd B., Nowak D., Stachowicz M., Jaworski G. Usefulness of foundry tooling materials in microwave heating process. *Archives of foundry engineering*. 2013. № 58. Pp. 919-922.

415. Борсук П.А. Смеси с жидкими отвердителями. *Литейное производство*. 1990. №2. С. 15-17.

416. Винокуров В.В., Иоговский В.А., Мармонтов Е.А. Улучшение выбиваемости жидкостекольных смесей из отливок. *Литейное производство*. 1966. №2. С. 25-27.

417. Вишняков Х.И. Улучшение выбиваемости жидкостекольных смесей добавками доменного шлака. *Литейное производство*. 1976. №11. С.42.

418. Грузман В.М. Улучшение выбиваемости жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 1999. №6. С. 30-31.

419. Дорошенко С.П., Макаревич А.П. Состояние и перспективы применения жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 1990. №2. С. 14-15.

420. Климкин А.В. Смеси улучшенной выбиваемости. *Литейное производство*. 1990. №2. С. 25.

421. Лясс А.М., Валисовский И.В. Пути улучшения выбиваемости смеси с жидким стеклом. *Труды ЦНИИТМАШ*. 1960. №6. С. 81-95.

422. Лясс А.М., Валисовский И.В. Об улучшении выбиваемости смесей с жидким стеклом. *Литейное производство*. 1961. №9. С. 15-17.

423. Кидалов Н.А. Использование отходов металлургических и химических производств при разработке ресурсосберегающих технологий для изготовления стальных отливок. Диссертация на соискание науч. ст. докт. техн. наук, 05.16.04.: Москва, 2006, 308 с.

424. Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Кизина О.А., Гринчик Н.Н., Кундас С.П. Моделирование тепловлагопереноса при конвективной и микроволновой сушке древисины. *Вестник полоцкого государственного университета*. *Серия В*. 2010. №8. С. 79-85.

425. Васильев П.Н., Будников Д.А., Васильев А.А. Экспериментальные исследования влияния режимов работы магнетрона на энергоемкость и производительность обработки зерна. *Вестник аграрной науки Дона*. 2015. Т. 2. №30. С. 41-48.

426. Солоненко Л.І. Спінювання силікату натрію плакованого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 139-138.

427. Солоненко Л.І., Реп′ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Білий А.П., Іванова Л.Х. Прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Теорія і практика металургії*. 2021. №5. С. 70-77.

428. Венгер Е.Ф., Гончаренко А.В., Дмитрук М.Л. Оптика малих частинок і дисперсних середовищ. Київ: Наук.думка, 1999. 348 с.

429. Головко Д.Б., Скрипник Ю.О. Методи та засоби частотно-дисперсійного аналізу речовини та матеріалів. Київ: ФАДА, 2000. 200 с.

430. Кричевский Е.С. Контроль влажных твердых и сыпучих материалов. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.

431. Федюнин П.А., Дмитриков Д.А., Воробовьев А.А, Чернышов В.Н. Микроволновая термовлагометрия. Москва: Машиностроение, 2004. 208 с.

432. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. Москва: Наука, 1986. 192 с.

433. Бирчак Дж. Р., Гарднер К. Дж., Хипп Дж., Виктор Дж. М. Определение влажности грунта с помощью СВЧ-датчиков из диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью. *ТИИЭР*. 1974. Т. 62. № 1. С. 115-121.

434. Bottcher C. J. F., Bordewijk P. Theory of electric polarization, vol. 2. *Elsevier scientific publishing company*. 1978. 561 p.

435. Криворучко Я.С. Визначення ефективної діелектричної проникності гетерогенних середовищ та оцінка вмісту вологи в ґрунтах. *Поверхность*. 2011. № 3(18). С. 22-28.

436. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: КГУ, 2008. 112 с.

437. Ponomarenko O., Yevtushenko N., Lysenko T., ***Solonenko L.***, Shynsky V. A new technology for producing the polystyrene foam molds including implants at foundry industry. *Lecture notes in mechanical engineering. DSMIE 2019*. 2019. Pp. 430-437.

438. Іванов В.Г., Крилова Л.О, Каргінов В.П., Кудін В.В, Матвейшин М.В. Використання спеціальних добавок для покращення вибивання рідкоскляних формувальних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2021. №5. С. 58-67.

439. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І., Іванова Л.Х. Склеювання рідким склом структурованих піщано-рідкоскляних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2021. №3. С. 48-55.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. ***Solonenko L.I.***, Bilyi O.P., Repiakh S.I., Kimstach T.V., Uzlov K.I. Heating rate of granular inorganic materials by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 2. Pp. 37-41.

2. ***Solonenko L.I.***, Usenko R.V., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Repiakh S.I. Carbonization and crushability of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 5. Pp. 40-46.

3. ***Solonenko L.I.***, Usenko R.V., Dziubina A.V.,Uzlov K.I., Repiakh S.I. Sodium silicate solute foaming in a flat slot-type capillary under microwave radiation influence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. Pp. 34-40.

4. ***Solonenko L.I.***, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Kimstach T.V., Bilyi O.P. Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №1. Pp. 68-77.

5. ***Solonenko L.I.***, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Bilyi O.P., Kimstach T.V. Water resistance of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 4. Pp. 41-46.

6. ***Solonenko L.I.***, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Abramov S.O. Sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment effective values of thermo-physical properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 6. Pp. 66-71.

7. Liutyi R.V., ***Solonenko L.I.***, Osipenko I.O., Fedorov M.M., Morozov B.I. Physicochemical structure features of refractory compositions with inorganic binders. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. T. 23. № 3. Pp. 612-619.

8. Ponomarenko O., Yevtushenko N., Lysenko T., ***Solonenko L.***, Shynsky V. A new technology for producing the polystyrene foam molds including implants at foundry industry. *Lecture notes in mechanical engineering. DSMIE 2019.* 2019. Pp. 430-437.

9. ***Солоненко Л.И.*** Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения. *Металл и литье Украины*. 2020. №1 (320). С. 69-78.

10. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І., Узлов К.І. Кінетика структурування піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням. *Теорія і практика металургії*. 2019. №4. С. 44-56.

11. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Усенко Р.В. Міцність піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2019. №6. С. 41-48.

12. ***Солоненко Л.І***., Реп´ях С.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Узлов К.І. Властивості і структури компонентів піщано-рідкоскляних формувальних сумішей. *Теорія та практика металургії*. 2019. № 1. С. 81-92.

13. ***Solonenko L.***, Prokopovitch I., Repyakh S., Sukhoi K., Dmytrenko D. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles*. 2019. № 1 (57). Pp. 90-98.

14. Осипенко І.О., ***Солоненко Л.І.***, Білий О.П. Системне використання пилу техногенного походження у складі фосфатних холоднотвердіючих сумішей. *Системные технологии*. 2018. № 5 (118). С. 97-104.

15. ***Солоненко Л.І.***, Білий О.П., Узлов К.І. Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 93-100.

16. ***Solonenko L.***, Repyakh S., Uzlov K., Kimstach T. Crushing character of sand-sodium-silicate mixtures structured by steam-microwave treatment. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles*. 2020. № 3 (62). Pp. 5-13.

17. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І. Міцність піщано-рідкоскляних сумішей, що структурували паро-мікрохвильовою обробкою. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 3. С. 39-47.

18. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І. Випаровування малих мас води при їх обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №1. С. 57-67.

19. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей. *Метал та лиття України*. 2021. №1 (324). С. 38-45.

20. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І. Оптимізація зернового складу піщано-рідкоскляних сумішей для структурування способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 28-38.

21. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І. Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2021. №2 (325). С. 52-59.

22. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В. Вибиваємість з виливків піщано-рідкоскляних сумішей, структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 37-45.

23. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Білий А.П., Іванова Л.Х. Прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Теорія і практика металургії*. 2021. №5. С. 70-77.

24. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих паро-мікрохвильовим затвердінням, на пригар і шорсткість поверхні виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №3 (326). С. 50-61.

25. ***Солоненко Л.І.*** Газотворність піщано-рідкоскляних формувально-стрижневих сумішей. *Процеси лиття*. 2021. №3 (145). С. 44-52.

26. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Іванова Л.Х. Склеювання рідким склом структурованих піщано-рідкоскляних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2021. №3. С. 48-55.

27. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних формувально-стрижневих сумішей, структурованих за

способом паро-мікрохвильового затвердіння, на якість дрібних виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №4 (327). С. 64-74.

28. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І. Структурування формувальних та стрижневих сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №2. С. 23-31.

29. ***Солоненко Л.І.*** Деякі особливості процесу структурування піщано-рідкоскляної суміші у паро-мікрохвильовому середовищі. *Процеси лиття*. 2022. №1. С. 57-66.

30. ***Солоненко Л.І.*** Вимоїни на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2022. № 1. С. 54-61.

31. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Карпова Т.П. Характер механічного руйнування піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані у паро-мікрохвильовому средовищі. *Теорія і практика металургії*. 2022. №1. С. 43-49.

32. ***Солоненко Л.І,*** Реп′ях С.І., Узлов К.І., Мазорчук В.Ф. Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків і якість їх поверхні. *Метал та лиття України*. 2022. № 2. С. 59-71.

33. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № a 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7 с.

34. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 123068 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № a 201901348; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.02.2021, Бюл. № 6. 3 с.

35. Спосіб виготовлення ливарних форм за одноразовими замороженими моделями: пат. 125146 Україна: МПК B22C 9/04, 9/02, 7/02. № a 201910047; заявл. 27.09.2019; опубл. 19.01.2022, Бюл. № 3. 6 с.

36. Спосіб виготовлення комбінованої ливарної форми із сухої суміші: пат. 149146 Україна: МПК B22C 9/12. № u 202102879; заявл. 31.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42. 4 с.

37. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И., Усенко Р.В., Баца И.В. Технологические

добавки в песчано-жидкостекольных смесях. *Topical issues of the development of modern science: Abstracts of II International Scientific and Practical Conference (Sofia, 16-18 October. 2019)*. Sofia, 2019. Pp. 62-68.

38. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Осыпаемость жидкостекольных форм и стержней. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 178-179.

39. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Работа выбивки песчано-жидкостекольных стержневых смесей из отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 173-177.

40. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Хрупкость структурированных смесей литейных форм и стержней. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня. 2019)*. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С. 192-194.

41. ***Солоненко Л.И***., Усенко Р.В., Репях С.И. Связующие материалы неорганического происхождения, отверждаемые физическими способами. *Science and society*: *12th International conference (Canada, June 7. 2019)*. Canada 2019. Pp. 18-22.

42. ***Солоненко Л.И.***, Усенко Р.В., Белый А.П., Репях С.И. Характеристика некоторых способов литья и смесей одноразовых форм и стержней для отливок массой до 300 кг. *Perspectives of worlds cience and education*: *Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (Osaka, 2-4 October. 2019)*. Osaka, 2019. Pp. 202-210.

43. ***Солоненко Л.И***., Репях С.И. Оценка реального уровня мощности СВЧ-излучения в рабочей камере СВЧ-печи. *Priority directions of science development*: *Abstracts of International Scientific and Practical Conference (Lviv, 28-29 October. 2019)*. Lviv, 2019. Pp. 122-125.

44. ***Солоненок Л.І.***, Реп'ях С.І. Матеріальний баланс системи «водяна пара-пористе тіло» при атмосферному тиску. *Advance of science*: *Proceeding of Articles*

the International Scientific Conference (Czech Republic, 5 April. 2019). Czech Republic, 2019. Pp. 27-30.

45. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И. Влияние СВЧ-излучения на распределение влаги в песке, находящемся в емкости трубчатого типа. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня. 2019)*. Запоріжжя, 2019. С. 190-192.

46. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И., Усенко Р.В., Бежанова А.Н. Склеивание безопочных полуформ для производства бесстержневых отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: *матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 28-29 квітня. 2020)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 114-116.

47. ***Солоненко Л.И.***, Репях С.И., Белый А.П., Гуцу Т.А. Расчет минимально-допустимой прочности клеевых соединений литейных стержней. *Литво. Металургія. 2020*: *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, АА Тандем, 2020. С. 140-142.

48. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І., Білий О.П., В'юнник І.В. Масоперенос силікату натрію в капілярах щілинного типу. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2021 р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 165-167.

49. ***Солоненко Л.І.***, Реп'ях С.І. Структурування плакованого кварцового піску паро-мікрохвильовим затвердінням. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2021 р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 168-169.

50. ***Солоненко Л.І.***, Реп´ях С.І., Усенко Р.В., Кириченко Р.Д. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням по заморожених піщано-водяних моделях. *Литво. Металургія. 2021*: *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (18-20 вересня 2021 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, АА Тандем, 2021. С. 190-192.

51. ***Солоненко Л.І.***, Узлов К.І., Реп′ях С.І. Новий спосіб виготовлення форм та стрижнів для виробництва виливків залізничного транспорту. *Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.*: *матеріали 81 Міжнарод. наук.-практ. конф., 22–23 квіт. 2021 р. Дніпров. нац. ун-т. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2021. С. 233-235.

52. ***Солоненко Л.І***., Реп′ях С.І., Мазорчук В.Д. Тривалість нагріву та випаровування води з парних наважок масою до 100 г мікрохвильовим випромінюванням. *The 3 rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7, 2021)*.SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. С. 301-305.

53. ***Солоненко Л.І***., Реп′ях С.І. Вплив розмірів наважок води на обертовому столі мікрохвильової печі на тривалість їх випаровування. *The 3 rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7, 2021)*.SSPGPublish, Stockholm, Sweden. 2021. С.296-300.

54. ***Солоненко Л.І.*** Нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі у присутності матеріалів різної природи. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 176-179.

55. ***Солоненко Л.І.*** Дослідження можливості структурування піщано-рідкоскляної суміші у мікрохвильовому випромінювання. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 171-172.

56. ***Солоненко Л.І.,*** Реп'ях С.І. Уявна енергія активації рідкого скла на плакованому піску в паро-мікрохвильовому середовищі. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 164-170.

57. ***Солоненко Л.І.*** Досліджування спінювання рідкого скла під дією

мікрохвильового випромінювання в структурованій піщано-рідкоскляній суміші. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28…29 квітня 2022р., м*. Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 173-175.

58. ***Солоненко Л.І.*** Структурування піщано-рідкоскляних сумішей мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 127-131.

59. ***Солоненко Л.І***. Нагрівання діелектричних матеріалів мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 131-135.

60. ***Солоненко Л.І.*** Спінювання силікату натрію плакованого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі. *Литво. Металургія. 2022*: *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 139-138.

ДОДАТОК Б

АКТ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ПП «БУД-МАШ»
_____ В.В. Платовський
"3" вересня 2020 р.

АКТ
дослідно-промислових випробувань технології виготовлення стрижнів по способу паро-мікрохвильового затвердження

Ми, що нижче підписалися, головний інженер ПП «БУД-МАШ» Мартинюк С.П., інженер-технолог ливарної дільниці ПП «БУД-МАШ» Лукашук Д.О. та к.т.н., доцент кафедри технології та управління ливарними процесами Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Солоненко Л.І., склали цей акт в тому, що з 17.08.2020 по 31.08.2020 року в ливарному цеху підприємства ПП «БУД-МАШ» за технологію виготовлення ливарних стрижнів по ПМЗ-процесу була виготовлена дослідно-промислова партія виливків «Важіль» масою 2,2 кг в кількості 55 шт. зі сталі 35ХГСЛ та виливків «Кришка» масою 3,5 кг в кількості 27 шт. з чавуну СЧ20.

Стрижні виготовляли з сухого кварцового піску попередньо плакованого 1% натрієвого рідкого скла з силікатним модулем 2,89 і питомою щільністю 1447 кг/м³. Затвердіння ущільненого вібрацією сухого плакованого кварцового піску проводили в гіпсових стрижневих ящиках шляхом їх обробки надвисокочастотним випромінюванням потужністю 900 Вт і частотою 2,45 ГГц протягом 3...4 хвилин в середовищі насиченої водяної пари.

Аналіз якості виготовлених виливків показав, що на всіх виливках був відсутній пригар, якість виливків відповідала вимогам, що пред'являються до них. Стрижні з внутрішніх порожнин виливків повністю видалялися в результаті ударної дії на їх ливникову систему.

Від ПП «БУД–МАШ»:

Головний інженер
_____ С.П. Мартинюк

Інженер-технолог
_____ Д.О. Лукашук

Від ОНПУ:

Доц. кафедри ТУЛП, к.т.н.
_____ Л.І. Солоненко

ДОДАТОК В

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Голова правління
ПрАТ "Одеський машинобудівний завод"
_____ В.А. Чередник
"_01_" _____ 2020 р.

АКТ
впровадження у виробництво литих деталей технології
виготовлення піщано-рідкоскляних стрижнів,
затверділих паро-мікрохвильовим способом

Ми, що нижче підписалися, головний металург ПрАТ "Одеський машинобудівний завод» Тищенко В.П., заступник начальника ливарного цеху з технології ПрАТ "Одеський машинобудівний завод" Хмелевський Б.В. та к.т.н., доцент кафедри технології та управління ливарними процесами Одеського національного політехнічного університету Солоненко Л.І, склали цей акт в тому, що з 1.07.2020 року в ливарному цеху підприємства у виробництво стальних виливків "Запобіжник замка автозчеплення" (106.01.006) та "Замкодержак" (106.01.003-3) була впроваджена технологія виготовлення піщано-рідкоскляних стрижнів, затверділих паро-мікрохвильовим способом, яка була розроблена за результатами досліджень Солоненко Л.І.

Стрижні виготовляли з сухого кварцового піску попередньо плакованого 1,5% натрієвого рідкого скла з силікатним модулем 2,89 і питомою щільністю 1447 кг/м^3. Затвердіння ущільненого вібрацією сухого плакованого кварцового піску проводили в гіпсових стрижневих ящиках шляхом їх обробки надвисокочастотним випромінюванням потужністю 0,9 кВт і частотою 2,45 ГГц протягом 2...5 хвилин в середовищі насиченої водяної пари.

Головний металург
ПрАТ "Одеський
машинобудівний завод" В.П. Тищенко

Заступник начальника ливарного цеху
з технології ПрАТ "Одеський
машинобудівний завод" Б.В. Хмелевський

К.т.н., доцент кафедри технології
та управління ливарними процесами,
Одеський національний
політехнічний університет Л.І. Солоненко

ДОДАТОК Г

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Генеральний директор
ТОВ «ПК «Перспектива» м. Дніпро
Д.О. Гаврилюк
" 27" серпня 2021 р.

М.П.

АКТ
впровадження у виробництво рекомендацій щодо технології виготовлення стрижнів за способом паро-мікрохвильового затвердіння піщано-рідкоскляних сумішей, для виливка «Плита решітки»

Ми, що підписалися нижче, начальник виробництва ТОВ «Промислова компанія «Перспектива» Колесник Д.С., технічний контролер ливарного цеху Пашинов С.І., доцент кафедри «Технології та управління ливарними процесами» ОНПУ, к.т.н. Солоненко Л.І., начальник науково-дослідної частини НМетАУ, д.т.н. Реп'ях С.І. склали цей акт в тому, що в ливарному цеху підприємства для виливка «Плита решітки» зі сталі 40Х24Н18С2Л, форму для якого виготовляли в стрижнях з піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за CO_2-процесом, були впроваджені у виробництво рекомендації щодо технології виготовлення піщано-рідкоскляних стрижнів за способом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ-процес), розроблених доцентом Л.І. Солоненко.

Відповідно до рекомендацій виготовлення стрижнів за способом ПМЗ проводили з плакованого рідким склом кварцового піску. Для плакування кварцового піску використовували 1,2...1,5% натрієвого рідкого скла з силікатним модулем 2,8...3,0 та щільністю 1,42...1,45 г/см^3 (понад 100% кварцового піску, за масою) з послідуючим сушінням піску на повітрі і в

мікрохвильовій печі впродовж 2...3 хвилин до сипучого стану, та просіюванням через сито з осередком 0,315 мм. Структурування суміші проводили у гіпсовому оснащенні з використанням 2...4 водяних зарядів з вмістом в них води 1...2 г в кожному. Паро-мікрохвильову обробку сумішей проводили протягом 12...17 хвилин в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрону 1,0 кВт і частотою мікрохвильового випромінювання 2,45 ГГц.

Результати порівняльного аналізу вимірювань контрольних розмірів 144 виливків поточного виробництва (суміш структурована за CO_2-процесом) і 150 виливків, виготовлених в стрижнях, суміші яких були структуровані відповідно до рекомендацій за ПМЗ-процесом, показали, що залишковий брак по невідповідності розмірів виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, склав 1,3%, а за цеховим CO_2-процесом – 4,9%. У той же час виправний брак виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, склав 7%, а за CO_2-процесом – 52% від загальної кількості отриманих контрольних виливків. При цьому, величина відхилень контрольних розмірів від номінальних значень у виливках, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, менше, ніж у виливків за CO_2-процесом, дефекти типу спаїв і газових раковин на виливках за ПМЗ-процесом, практично, були відсутні, а засмічення мали локальний точковий характер і не потребували ремонту виливків.

Начальник виробництва
ТОВ «ПК«Перспектива» Д.С. Колесник

Технічний контролер
ливарного цеху С.І. Пашинов

Доцент кафедри «Технології
та управління ливарними процесами»
ОНПУ, к.т.н. Л.І. Солоненко

Начальник НДЧ НМетАУ, д.т.н. С.І. Реп'ях

ДОДАТОК Д

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

«Затверджую»
Перший проректор НМетАУ
д.т.н., проф. В.П. Іващенко
«28» жовтня 2021 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес дисертаційної роботи на тему:
«Теоретичні та технологічні основи паро-мікрохвильового структурування піщано-рідкоскляних сумішей для виготовлення виливків»

Комісія в складі: начальника учбової частини В.Б. Пульпінського, декану електрометалургійного факультету д.т.н., проф. В.Ю. Селівьорстова, завідувача кафедри ливарного виробництва д.т.н., проф. В.Є. Хричикова, склали даний акт про наступне.

Результати дисертаційної роботи на тему: «Теоретичні та технологічні основи паро-мікрохвильового структурування піщано-рідкоскляних сумішей для виготовлення виливків», що виконана докторантом кафедри ливарного виробництва Л.І. Солоненко з 1 вересня 2021 р. впроваджено в навчальний процес Національної металургійної академії України і використовуються при виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів.

Начальник учбової частини Володимир ПУЛЬПІНСЬКИЙ

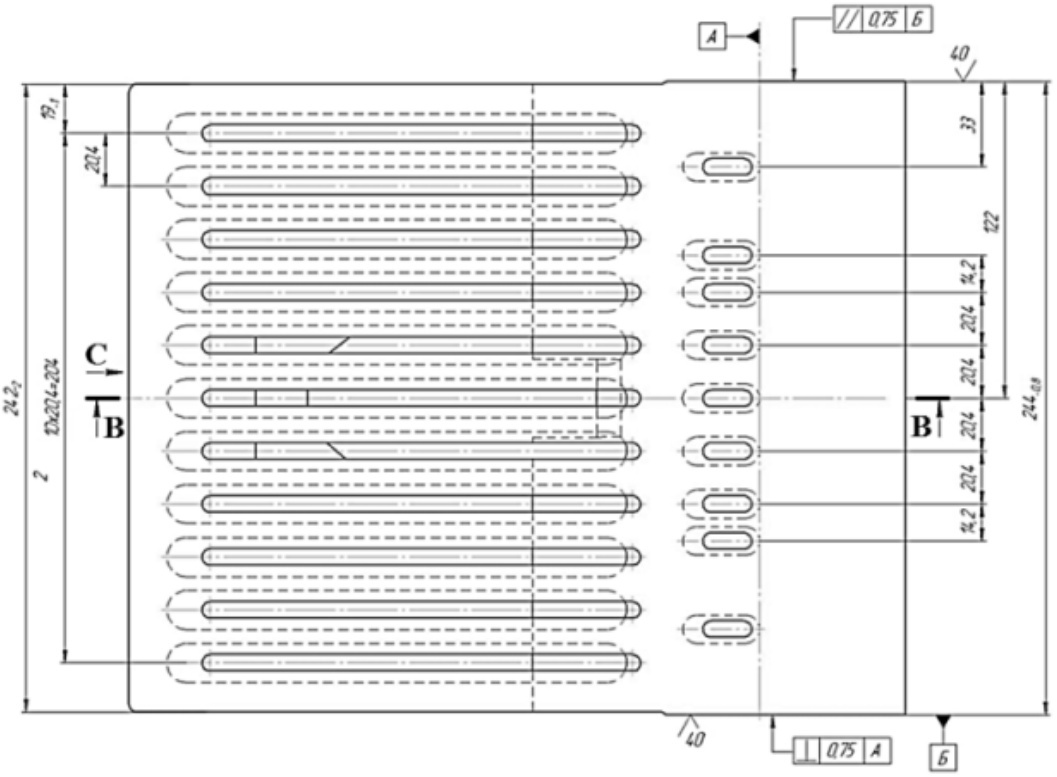
Декан факультету електромеханіки та електрометалургії, д.т.н., проф. Вадим СЕЛІВЬОРСТОВ

Завідувач кафедри ливарного виробництва, д.т.н., проф. Валерій ХРИЧИКОВ

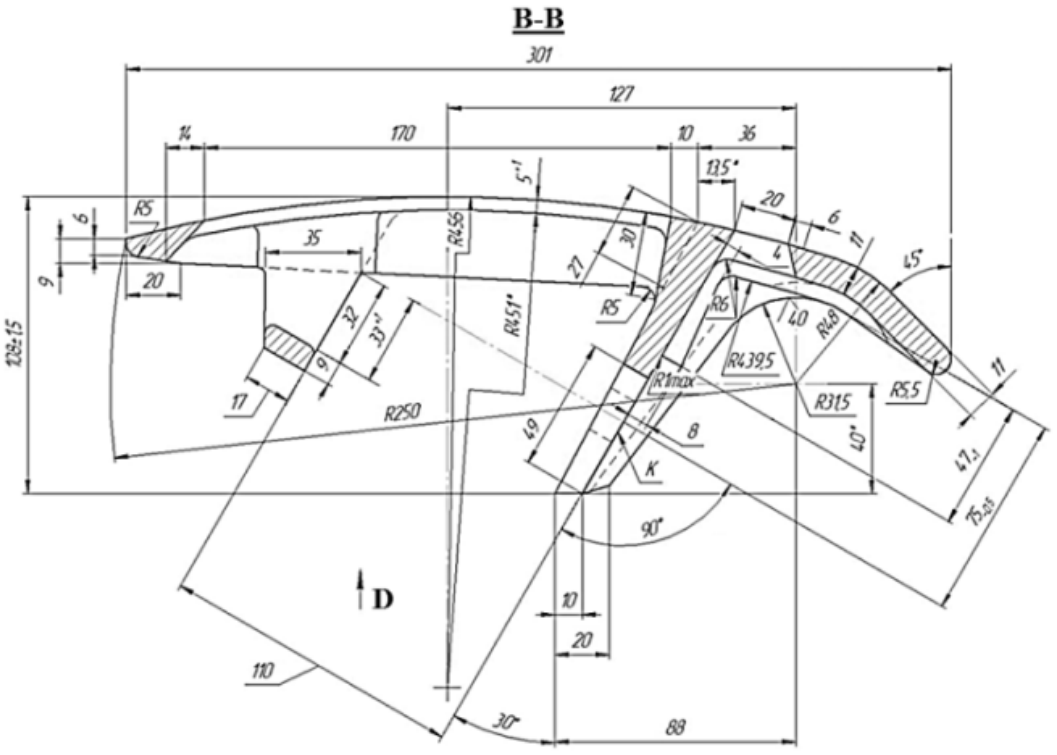
ДОДАТОК Е

КРЕСЛЕННЯ ВИЛИВКА «ПЛИТА РЕШІТКИ»:

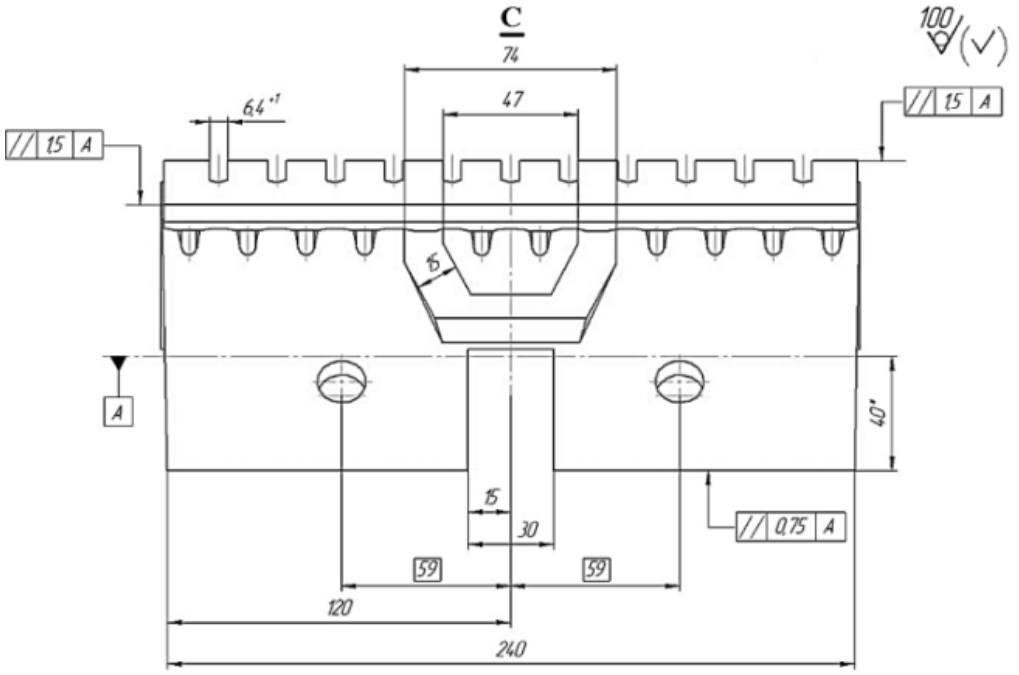
основний вид (а), перетин В-В (б), вид «С» (в), вид «D» (г)



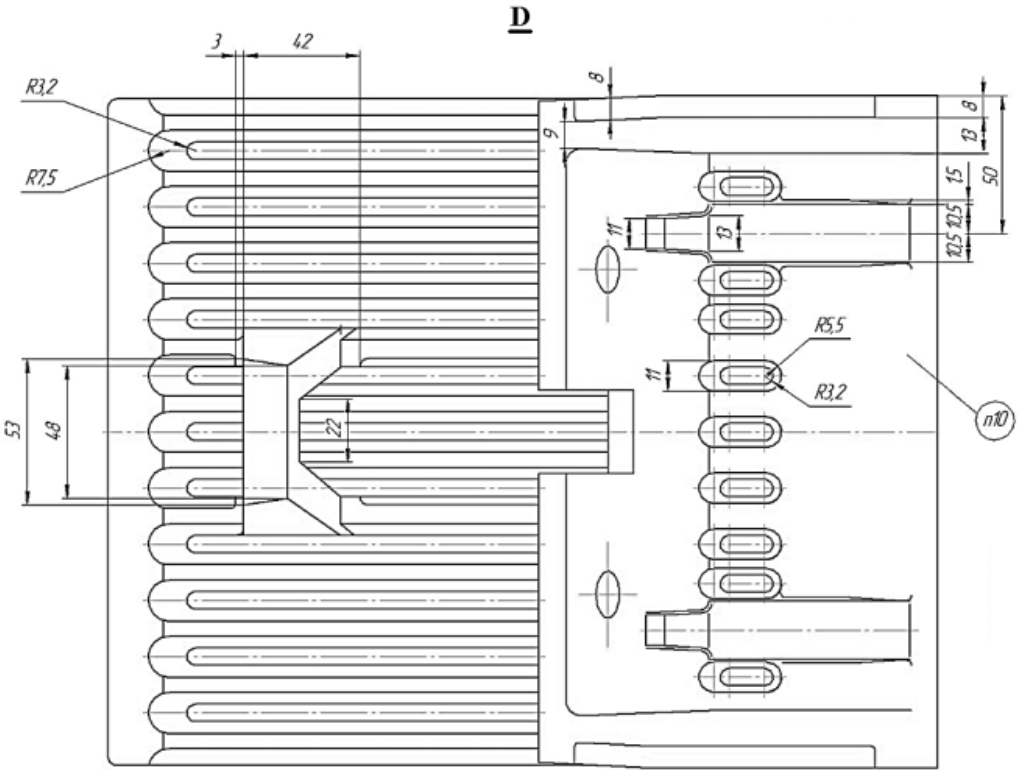
а



б


C
74
47
6,4 +1
15 A
15 A
100
15
A
40*
15
30
59
59
0,75 A
120
240

В


D
3
4,2
R3,2
R7,5
8
9
8
13
15
50
10,5
10,5
11*
13
R5,5
R3,2
11
n10
53
48
22

Г

ДОДАТОК Ж

СХЕМА ТРАСИ ТА ПРОТОКОЛИ ВИМІРЮВАНЬ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ВИЛИВКІВ

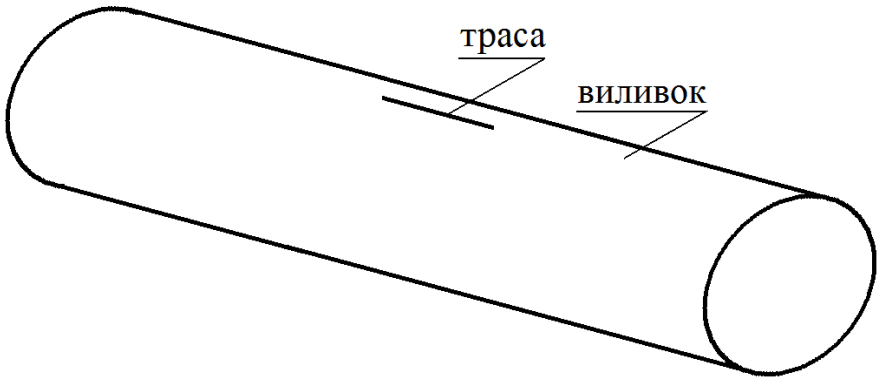
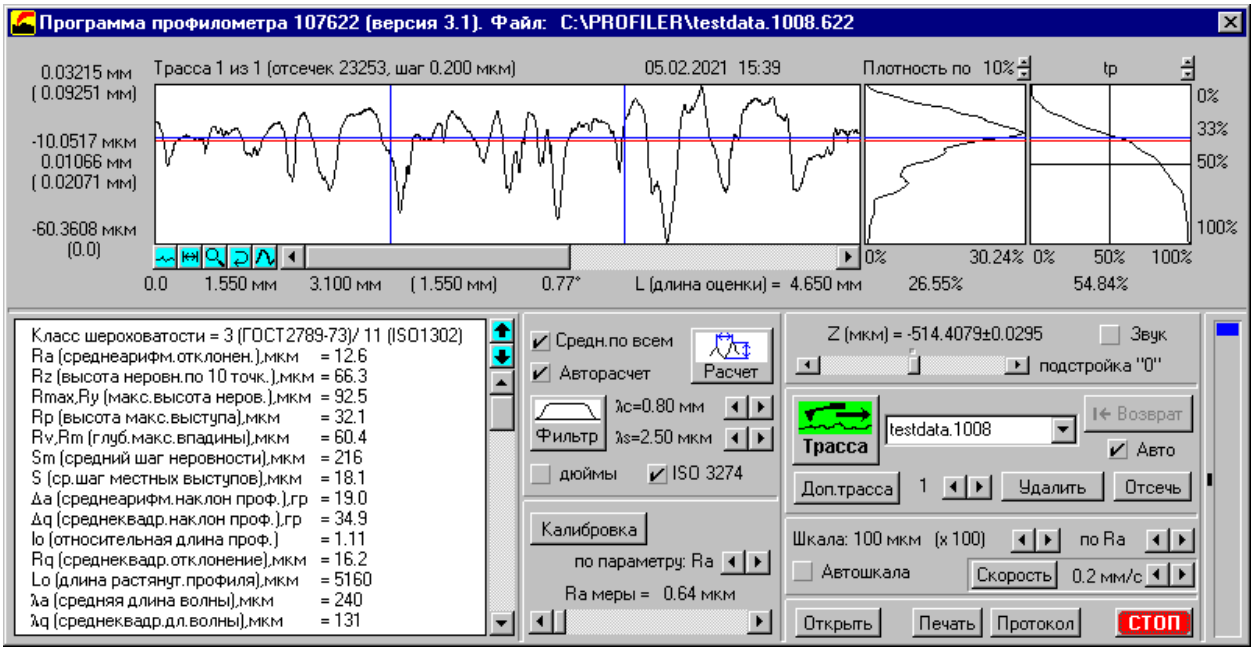
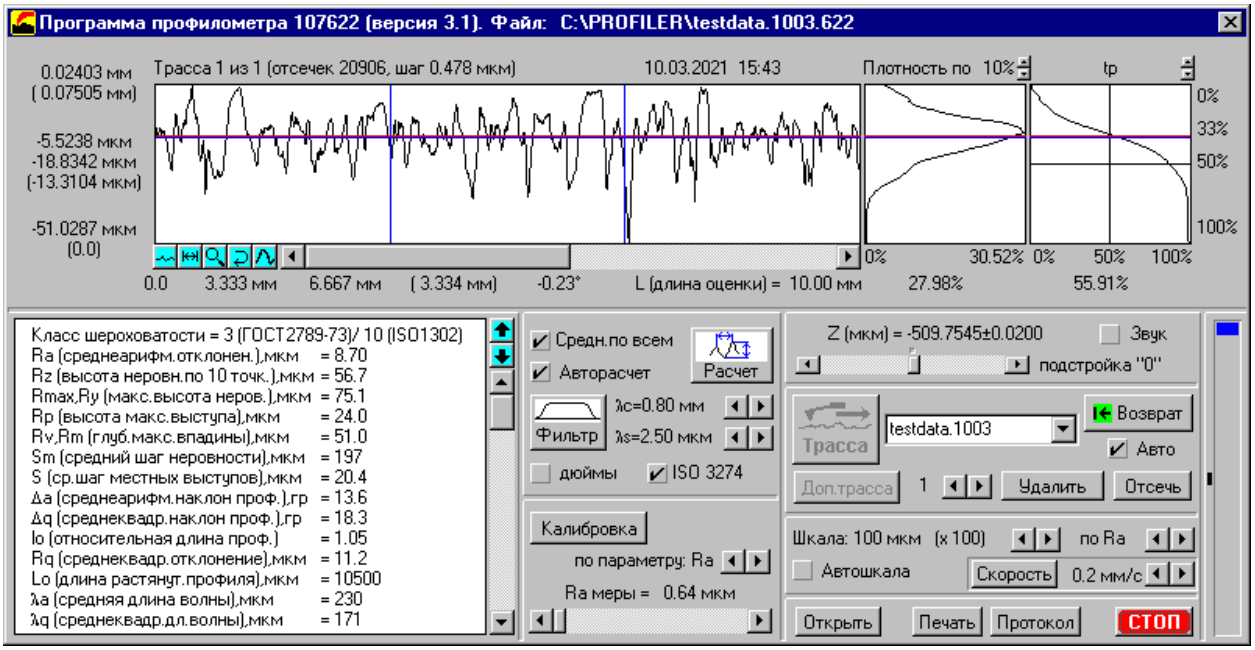


Схема траси вимірювань

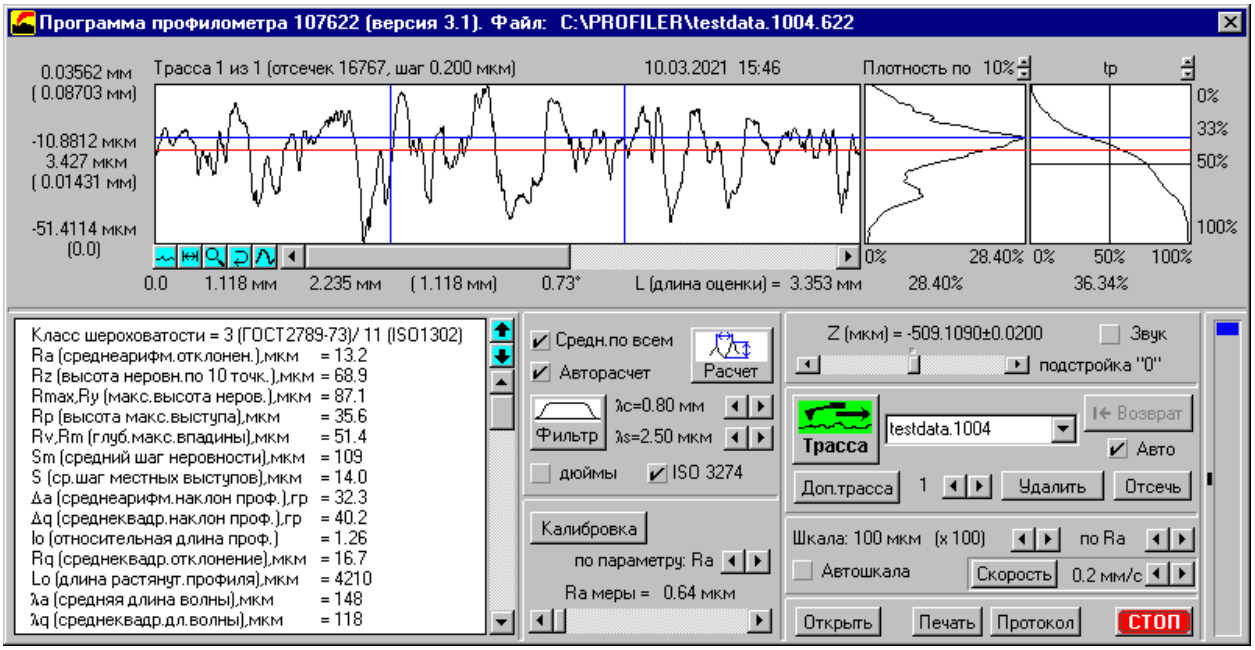
Виливок зі сталі 30Л



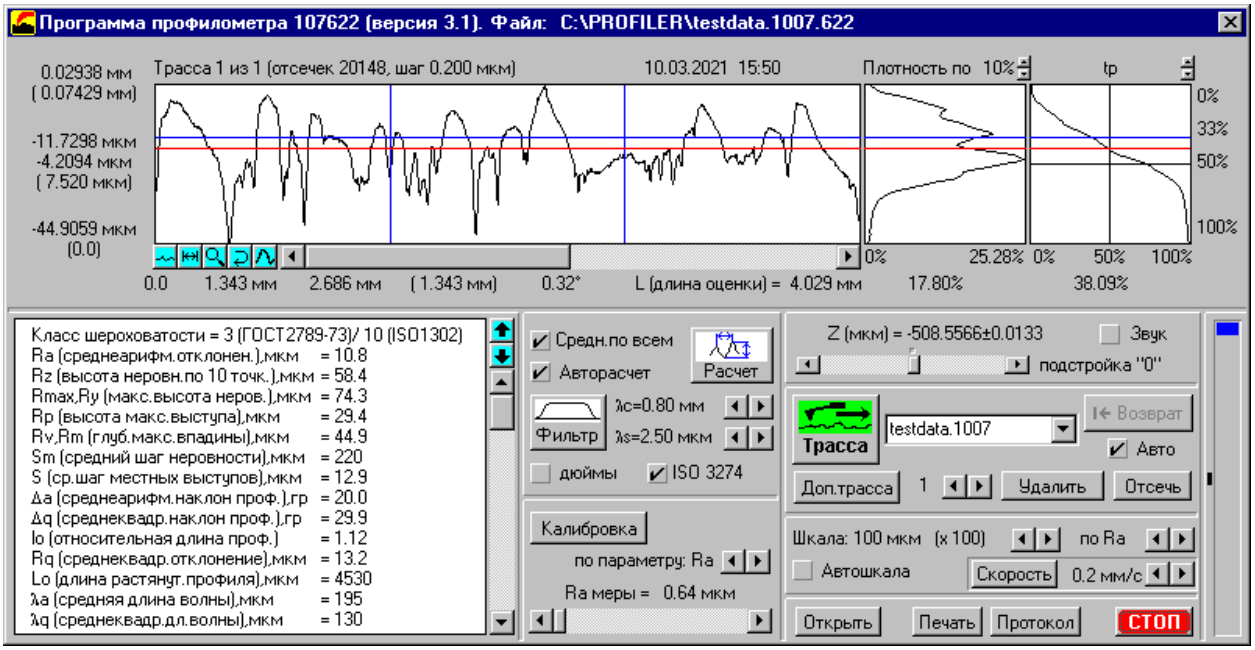
Виливок зі сталі 40Х24Н18С2Л



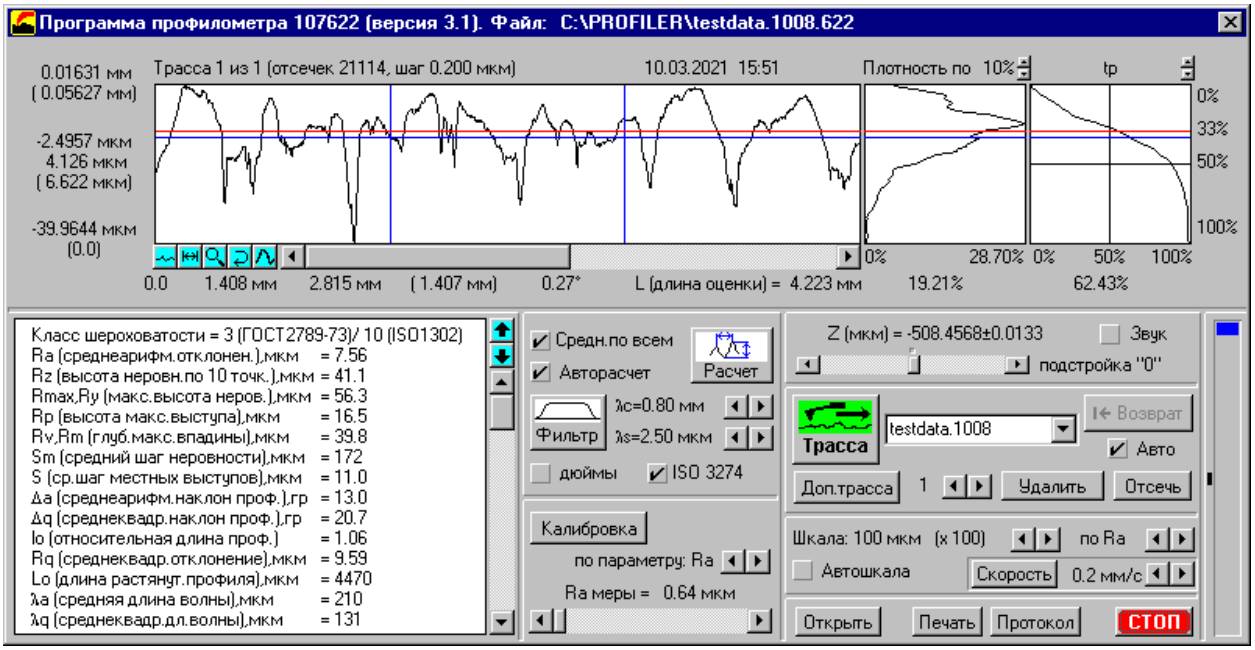
Виливок з сірого чавуну СЧ200



Виливок з бронзи БрО5С5С5

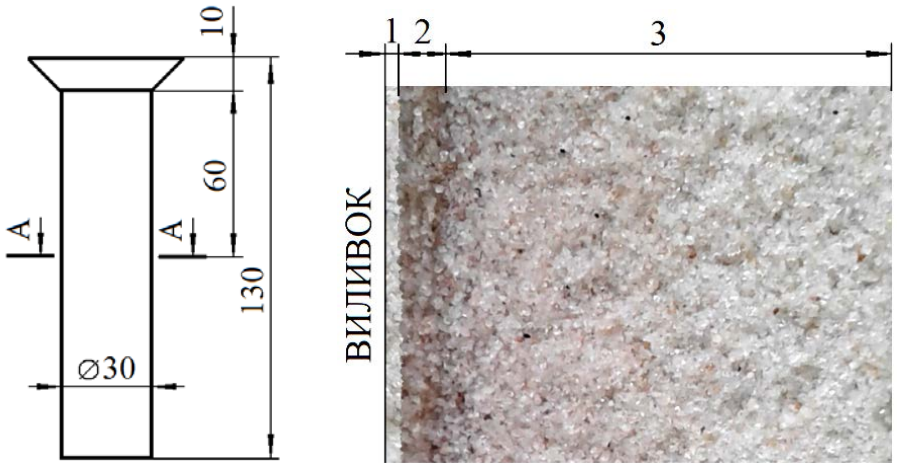


Виливок з бронзи БрА9Ж3Л



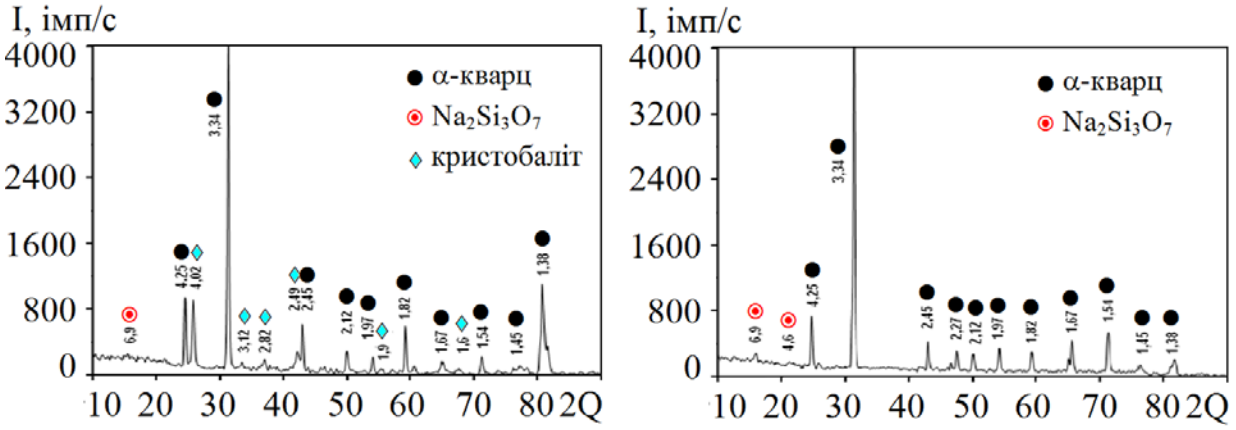
ДОДАТОК З

РЕНТГЕНОДИФРАКТОГРАМИ ШАРІВ ВІДПРАЦЬОВАНОЇ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНОЇ СУМІШІ



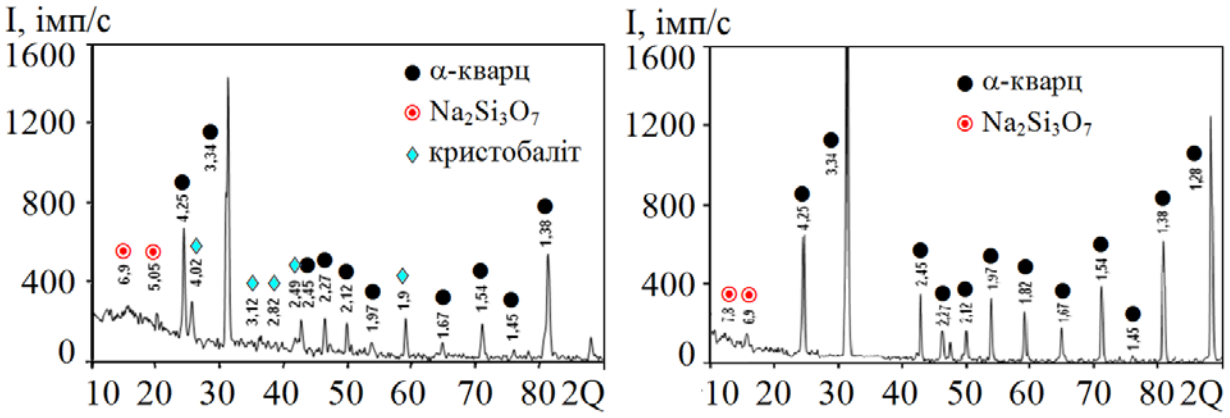
а б

Рисунок 31 – Схема циліндричного виливка (а) і ділянки ливарної форми прилеглих до виливка (А-А – переріз в якому були відібрані зразки суміші для проведення їх рентгенівського дифракційного аналізу):
1 – шар товщиною 0,6 мм; 2 – шар товщиною 4 мм; 3 – шар товщиною 24 мм



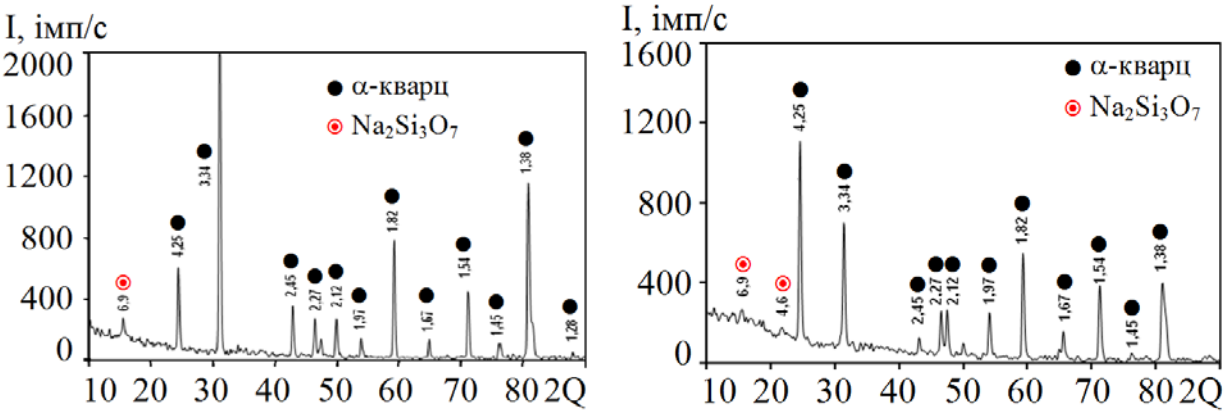
а б

Рисунок 32 – Рентгенівська дифрактограма шару відпрацьованої ПРС, що була структурована за ПМЗ-процесом, відібраного на відстані до 0,6 мм (а) та на відстані 0,6...4,0 мм (б) від поверхні виливка зі сталі 30Л (Co-K_α-випромінювання)



а б

Рисунок 33 – Рентгенівська дифрактограма шару відпрацьованої ПРС, що була структурована за ПМЗ-процесом, відібраного на відстані до 0,6 мм (а) та на відстані 0,6...4,0 мм (б) від поверхні виливка зі сталі 20Х24Н18С2Л ($Co\text{-}K_\alpha$-випромінювання)



а б

Рисунок 34 – Рентгенівська дифрактограма шару відпрацьованої ПРС, що була структурована за ПМЗ-процесом, відібраного на відстані до 5 мм (а) та на відстані 12...17 мм (б) від поверхні виливка з алюмінієвого сплаву АЛ2 ($Co\text{-}K_\alpha$-випромінювання)

ДОДАТОК І

СТРИЖНІ, ЩО ВИГОТОВЛЕНІ З ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНОЇ СУМІШІ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ ЗА ПМЗ-ПРОЦЕСОМ

а

б

в

Рисунок І1 – Стрижні з ПРС, які були виготовлені за ПМЗ-процесом, масою 170 г (а) і 720 г (б) з нефарбованою поверхнею та пофарбовані спиртовою цирконовою вогнетривкою фарбою масою від 200 до 1200 г (в)

а

б

Рисунок І2 – Стрижень з ПРС, виготовлені за ПМЗ-процесом, масою 2,2 кг (а) і 4,0 кг (б)

ДОДАТОК К

ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ, ЩО СТРУКТУРОВАНІ В ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

З метою прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі використовували формули та результати досліджень розділу 5. При цьому припускали, що якщо прийняти, що всі частинки піску мають сферичну форму діаметром d, то в об'ємі піску (V), наприклад, 1 м^3, при кубічній або ромбічній схемі укладання піщинок або їх конгломератів питому площу їх поверхні можна розрахувати за відомою формулою, м^2/м^3:

$$S_{П} = 6 \cdot \frac{1-m}{d \cdot V}, \qquad (К1)$$

де m – об'ємна частка пор у піску в частках одиниці;
d – діаметр піщинок або їх конгломератів, м.

Якщо прийняти, що ρ і ρ_2, відповідно, уявна щільність кварцового піску і дійсна щільність кварцу (ρ_2=2650 кг/м^3), то, прийнявши V=1 м^3, формулу (К1) можна записати у вигляді:

$$S_{П} = 6 \cdot \frac{\rho}{d \cdot 2650} = \frac{0{,}002265 \cdot \rho^*}{d}. \qquad (К2)$$

В першому наближенні як величину d приймемо середній діаметр частинок піску, який передбачається використати в ПРС. В цьому випадку межу міцності на стиск структурованої ПРС розраховуємо за формулою:

$$\sigma_{CT} = f_\sigma \cdot \rho \cdot \frac{V_{CB}}{S_П} = f_\sigma \cdot \frac{\rho}{\rho_{CB}} \cdot \frac{m_{CH}}{S_П}, \quad (К3)$$

де $S_П$ – питома площа поверхні зернистої складової (кварцового піску) структурованої суміші, м^2;

m_{CH} – маса СН від РС, що планується використати на плакування кварцового піску:

$$m_{CH} = \varphi_{CH} \cdot m_{PC} \cdot \rho, \quad (К4)$$

де φ_{CH} – масова доля СН в РС (для розрахунків прийнято φ_{CH}=0,45) або, прийнявши:

$$f_\sigma = 6500\left(\frac{\rho}{\rho*}\right)^2,$$

де ρ* – максимальна уявна щільність, притаманна виключно для даного кварцового піску, за формулою (ρ*=1937 кг/м^3):

$$\sigma_{CT} = 65000 \cdot \frac{(\rho)^3}{(\rho^*)^2 \cdot \rho_{CB}} \cdot \frac{m_{CB}}{S_П}, \quad (К5)$$

або, з урахуванням (К2), виключно для даної ПРС знаходимо, МПа:

$$\sigma_{CT} = 2870800 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho^*}\right)^2 \cdot \frac{m_{CB}}{\rho_{CB}} \cdot d. \quad (К6)$$

Газопроникність (К) – це показник здатності зразка структурованої суміші відповідної форми пропускати через себе повітря, який розраховують за результатами досліджень, виконаних за ГОСТ 23409.6.

Результати визначення газопроникності ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, від уявної щільності, приведені в табл. К1, а графічна залежність

К=f(ρ), що приведена на рис. К1, може бути описана формулою (К7).

Таблиця К1

Експериментальні дані уявної щільності та газопроникності структурованих ПРС

ρ, кг/м^3	1224	1768	1710	1392	1657	1727	1465
К, од	405	152	282	308	238	151	364
ρ, кг/м^3	1290	1551	1724	1709	1747	1543	1575
К, од	365	239	153	158	198	303	262
ρ, кг/м^3	1514	1300	1490	1555	1644	1371	1700
К, од	333	375	328	325	250	377	202

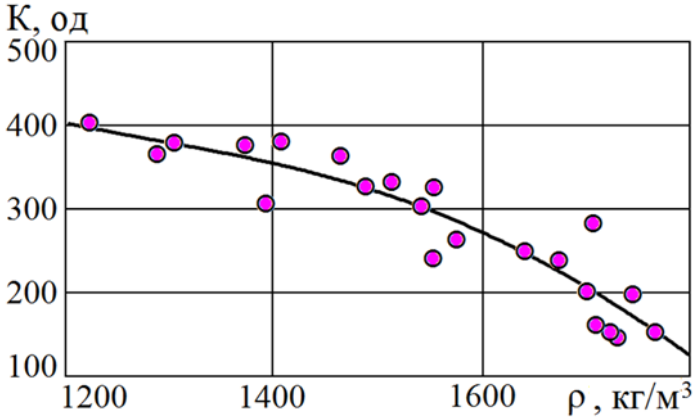


Рисунок К1 – Залежність газопроникності ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, від її уявної щільності

$$К=86\cdot10^{-10}\cdot\rho^4-5253\cdot10^{-8}\cdot\rho^3+0{,}11899\cdot\rho^2-118{,}96\cdot\rho+44759, \qquad (К7)$$

де К – газопроникність структурованої суміші, од;

ρ – уявна щільність структурованої ПРС, кг/ м^3.

За результатами порівняльного аналізу експериментальних і розрахункових величин до розрахунків приймемо межі зміни величини газопроникності від (-30) до (+60) одиниць відносно до значень, розрахованих за формулою (К7).

Уявну щільність ПРС, що складається з кварцового піску з округлою

формою частинок залежно від відносної маси РС щільністю 1420...1440 кг/м^3, використаного на його плакування, розраховуємо за формулою:

$$\rho=950-570\cdot ln(d). \qquad (К8)$$

Щільність затверділого сполучного матеріалу для розрахунків приймемо рівною $\rho_{СВ}$=2440 кг/м^3.

Припустимо, що для виготовлення будь-якого гіпотетичного стрижня за ПМЗ-процесом використовують кварцовий пісок з середнім розміром часток 0,25 мм, що плакований РС у кількості 1,5% (за масою, понад 100% піску).

В цьому випадку після сушіння такого піску до сипучого стану, відповідного помелу та вібраційного ущільнення в оснащенні, відповідно до формули (К8), величина уявної щільності цієї структурованої ПРС складе:

ρ=950-570·ln(0,25)=1740 кг/м^3 (*експериментальне значення - 1727 кг/м^3*).

Газопроникність такої структурованої ПРС, відповідно до формули (К7), складе від:

$К=86\cdot10^{-10}\cdot1740^4-5253\cdot10^{-8}\cdot1740^3+0,11899\cdot1740^2-118,96\cdot1740+44759+60=184$ од,

до:

$К=86\cdot10^{-10}\cdot1740^4-5253\cdot10^{-8}\cdot1740^3+0,11899\cdot1740^2-118,96\cdot1740+44759-30=94$ од.

Тобто, за прогнозом, газопроникність такої структурованої ПРС складе К=94...184 од, (*експериментальне значення - 151 од*).

Для прийнятої ПРС маса СН в 1 м^3 суміші становить:

$$m_{СН} = 0,45\cdot0,015\cdot1740 = 11,745 \text{ кг}.$$

В цьому випадку, межа міцності на стиск такої суміші, відповідно до формули (К6), повинна становити, МПа:

$$\sigma_{CT} = 2870800 \cdot \left(\frac{1740}{1927}\right)^2 \cdot \frac{11{,}745}{2440} \cdot 0{,}00025 = 2{,}82,$$

(*експериментальне значення – 2,95 МПа*).

Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих ФСС розраховували за формулами розділу 5, у числі яких:

- обсипальність:

$$Oc = f_0 \cdot \rho^3 \cdot l \cdot \frac{K}{\sigma_{CT}}, \qquad (К9)$$

де l – довжина зразка (l=0,05 м);

$f_0 = 21 \cdot 10^{-12}$;

- стріла прогину зразка балочного типу:

$$\Delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{l} = f_\varepsilon^* \cdot \rho^2 \cdot \frac{K}{Oc}, \qquad (К10)$$

де l – довжина зразка (l=0,2 м);

$f_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11}$;

- робота вибивання:

$$A = f_A \cdot K^2 \cdot \sigma_{CT}^2 \cdot \rho \cdot l, \qquad (К11)$$

де l – довжина зразка (l=0,05 м), м;

$f_A = 56 \cdot 10^{-7}$.

У зв'язку з тим, що показник газопроникності К має певні межі щодо його зміни, обсипальність, стріла прогину зразка балочного типу та робота

вибивання ПРС також набувають мінімальних та максимальних значень.

Тобто:

$$Oc = 21 \cdot 10^{-12} \cdot 1740^3 \cdot 0{,}05 \cdot \frac{184}{2{,}82} = 0{,}36\%, \quad Oc = 21 \cdot 10^{-12} \cdot 1740^3 \cdot 0{,}05 \cdot \frac{94}{2{,}82} = 0{,}18\%,$$

Ос=0,18...0,36 %, (*експериментальне значення – 0,26 %*).

$$\Delta_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11} \cdot 1740^2 \cdot \frac{184}{0{,}36} = 0{,}295, \qquad \Delta_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11} \cdot 1740^2 \cdot \frac{94}{0{,}18} = 0{,}30,$$

Δ_ε = 0,295...0,300 %, (*експериментальне значення – 0,32 %*).

$$A = 56 \cdot 10^{-7} \cdot 184^2 \cdot 2{,}82^2 \cdot 0.05 \cdot 1740 = 131\text{Дж},$$

$$A = 56 \cdot 10^{-7} \cdot 94^2 \cdot 2{,}82^2 \cdot 0.05 \cdot 1740 = 34\text{Дж},$$

А = 34...131 Дж, (*експериментальне значення – 92 Дж*).

Аналіз результатів прогнозування властивостей досліджуваних ПРС свідчить про їх адекватність щодо результатів експериментальних вимірювань параметрів, а розроблена методика прогнозування адаптована і може бути рекомендована для прогнозування властивостей ПРС з кварцового піску з середнім розміром часток 0,16...0,315 мм, які плаковані натрієвим РС щільністю 1420...1440 кг/м^3 і силікатним модулем 2,8...3,0 в кількості 0,5...2,5 % (за масою, понад 100% піску), що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі з використанням мікрохвильової печі з обертовим столом та магнетроном потужністю 700...900 Вт.

Підвищити точність прогнозування за розробленою методикою можливо шляхом підвищення точності розрахунків або експериментального визначення за ГОСТ 23409.6 величини газопроникності реально структурованої ПРС.

ДОДАТОК Л

СПІНЮВАННЯ СИЛІКАТУ НАТРІЮ ПЛАКОВАНОГО КВАРЦЕВОГО ПІСКУ В ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

За результатами хроно-гравиметрических і температурних вимірів зміни відносної маси і абсолютної температури кварцового піску, що плакований РС (гідратованим СН) і висушеного до сипкого стану, під час паро-мікрохвильової обробки встановлено, що масоперенос гідратованого СН в капілярних каналах кварцового піску проходить в два етапи. На першому етапі – шляхом спінювання, на другому – шляхом в'язкої течії СН в його гідратованому і, отже, рідкоплинному стані. Непрямим доказом наявності в'язкої течії гідратованого СН є вигляд манжет між піщинками в структурованій суміші. У той же час, в структурованому плакованому кварцовому піску відсутні будь-які фрагменти спіненого СН.

З метою непрямого встановлення факту спінювання гідратованого СН на першому етапі структуризації плакованого кварцового піску виконали наступний експеримент. В глухо донний картонний стакан на його донні грати пошарово засипали пісок за схемою:

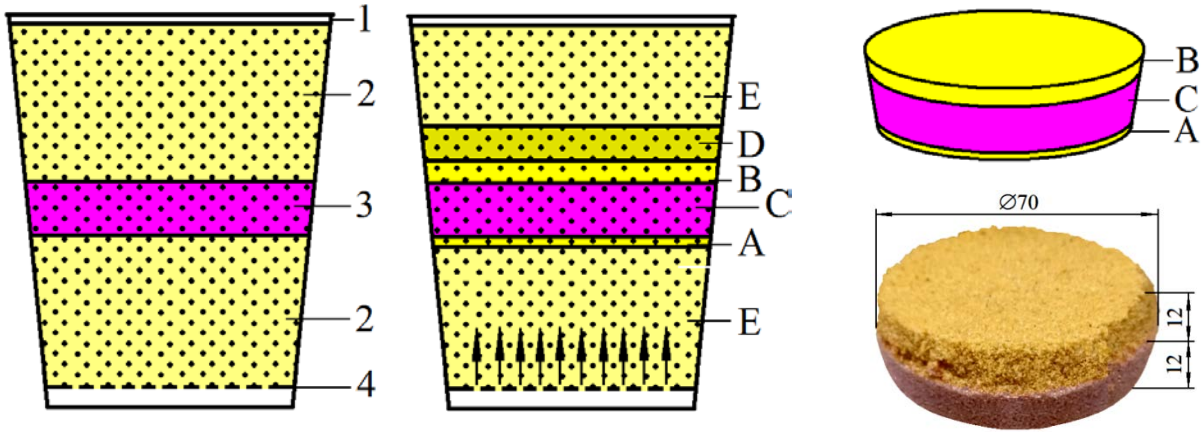
чистий річковий пісок ⇨ плакований кар'єрний пісок ⇨ чистий річковий пісок,

що схематично представлене на рис. Л1,а.

У простір між днищем і гратами стакану вводили 1 г води і вібраційно ущільнювали піски в стакані. Після віброущільнення наповнений стакан поміщали в центр обертового столу мікрохвильової печі з потужністю магнетрону 900 Вт і обробляли його впродовж 2 хв. Відразу після мікрохвильової обробки піски витягали із стакана.

В результаті візуальної оцінки результатів обробки встановлено, що характер розподілу пісків в стакані відповідає схемам на рис. Л1, б, в. Тобто, безпосередньо після закінчення мікрохвильової обробки над шаром

структурованого кар'єрного піску розташовувався шар завтовшки в 2...5 піщинок пов'язаного річкового піску, над ним – шар вологого незв'язаного піску завтовшки ~ 12 мм, який після 2...3 хв після витягання із склянки обсипався на повітрі, а над ним – шар сухого незв'язаного річкового піску.



а б в

Рисунок Л1 – Схема розташування пісків в картонному стакані до початку структурування мікрохвильовим випромінюванням (а), схема зон пісків після структуризації (б), схема структурованого шару (в): 1 – стакан; 2 – чистий річковий пісок; 3 – плакований кар'єрний пісок; 4 – грати; A – шар структурованого чистого річкового піску під шаром структурованого плакованого піску; B – шар структурованого чистого річкового піску над шаром структурованого плакованого піску; C – шар структурованого плакованого кар'єрного кварцового піску; D – шар вологого чистого річкового піску; E – сухий неструктурований чистий річковий пісок

При цьому, під шаром пов'язаного кар'єрного піску спостерігався шар завтовшки в 1 піщинку пов'язаного річкового піску, а під ним – шар незв'язаного сухого річкового піску, що виходить з рис. Л2. і рис. Л3.

а б

Рисунок Л2 – Вигляд поверхні шару структурованого річкового піску над (а) та під (б) шаром структурованого плакованого кар'єрного піску

а

б

Рисунок Л3 – Вигляд межі розділу шарів структурованого чистого річкового та плакованого кар'єрного піску над (а) та під (б) шаром структурованого плакованого піску (×50)

Встановлений характер розподілу шарів піску – непряме свідчення існування етапу спінювання гідратованого СН. Інакше над шаром плакованого кар'єрного піску не виник би шар структурованого чистого річкового піску вказаної вище товщини (2...5 піщинок), оскільки зв'язування сусідніх піщинок виняткове за рахунок в'язкої течії гідратованого СН не дозволило б структурувати чистий річковий пісок на глибину більше ніж 1 піщинки.

ДОДАТОК М

ХАРАКТЕР МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ, ЩО СТРУКТУРОВАНІ У ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Дослідження проводили на зразках 8-образної форми, які виготовляли з кварцового піску плакованого 1% (за масою) РС.

Встановлено, що характер механічного руйнування ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом з 1% (за масою) РС, залежить від тривалості ПМЗ-процесу, що витікає з аналізу рис. М1.

Рисунок М1 – Схема щодо характеру руйнування ПРС від часу її обробки в паро-мікрохвильовому середовищі

Залежність міцності при розтягуванні суміші від тривалості її обробки в паро-мікрохвильовому середовищі представлена на рис. М2.

З аналізу ходу залежності на рис. М2 витікає, що максимальної міцності досліджувана суміш досягає на ~5 хв її обробки в паро-мікрохвильовому середовищі, після чого монотонно знижується. Тобто, наявність максимуму підтверджує висновки [83], відповідно до яких ПРС набувають максимальної міцності при певному вмісті остаточної вологи в РС. При цьому, згідно з зображенням на рис. М1 характер механізму руйнування такої суміші на 4...5 хв обробки змінюється зі змішаного (когезійно-адгезійного) до когезійного.

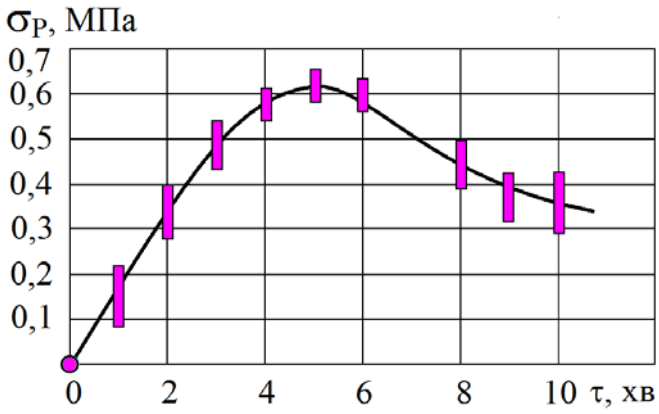


Рисунок М2 – Залежність міцності при розтягуванні ПРС з 1% (за масою) РС від тривалості її обробки в паро-мікрохвильовому середовищі

Зміна характеру руйнування ПРС, структурованої в паро-мікрохвильовому середовищі, від адгезійного до когезійного можливо пояснити вірогідною різницею в ході залежностей адгезійної та когезійної міцності структурованої ПРС від тривалості впливу на них мікрохвильового випромінювання за ПМЗ-процесом (див. рис. М3).

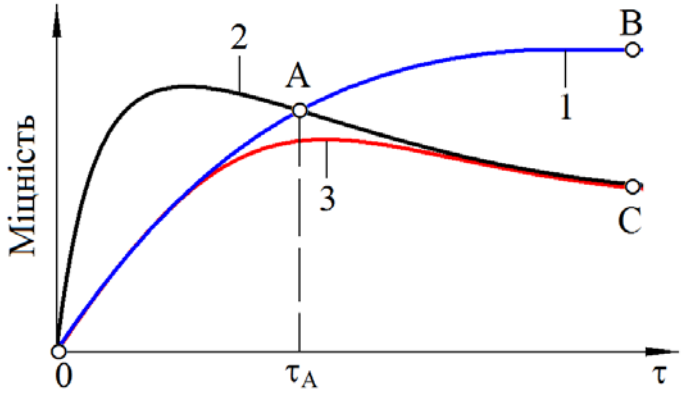


Рисунок М3 – Залежності міцності (1 – адгезійної, 2 – когезійної, 3 – загальної) структурованої ПРС від тривалості її обробки в паро-мікрохвильовому середовищі випромінюванням

Відповідно до схеми на рис. М3, на початку обробки мікрохвильовим випромінюванням когезійна міцність структурованої ПРС перевищує її

адгезійну міцність, що пояснює адгезійний механізм руйнування структурованої ПРС. Через час τ_A, ймовірно, зі збільшенням ступеню дегідратації РС в манжетах структурованої ПРС, величина адгезійної та когезійної міцності стають однаковими або близькими одна до одної (див. точку А на рис. М3) і руйнування її набуває змішаного характеру.

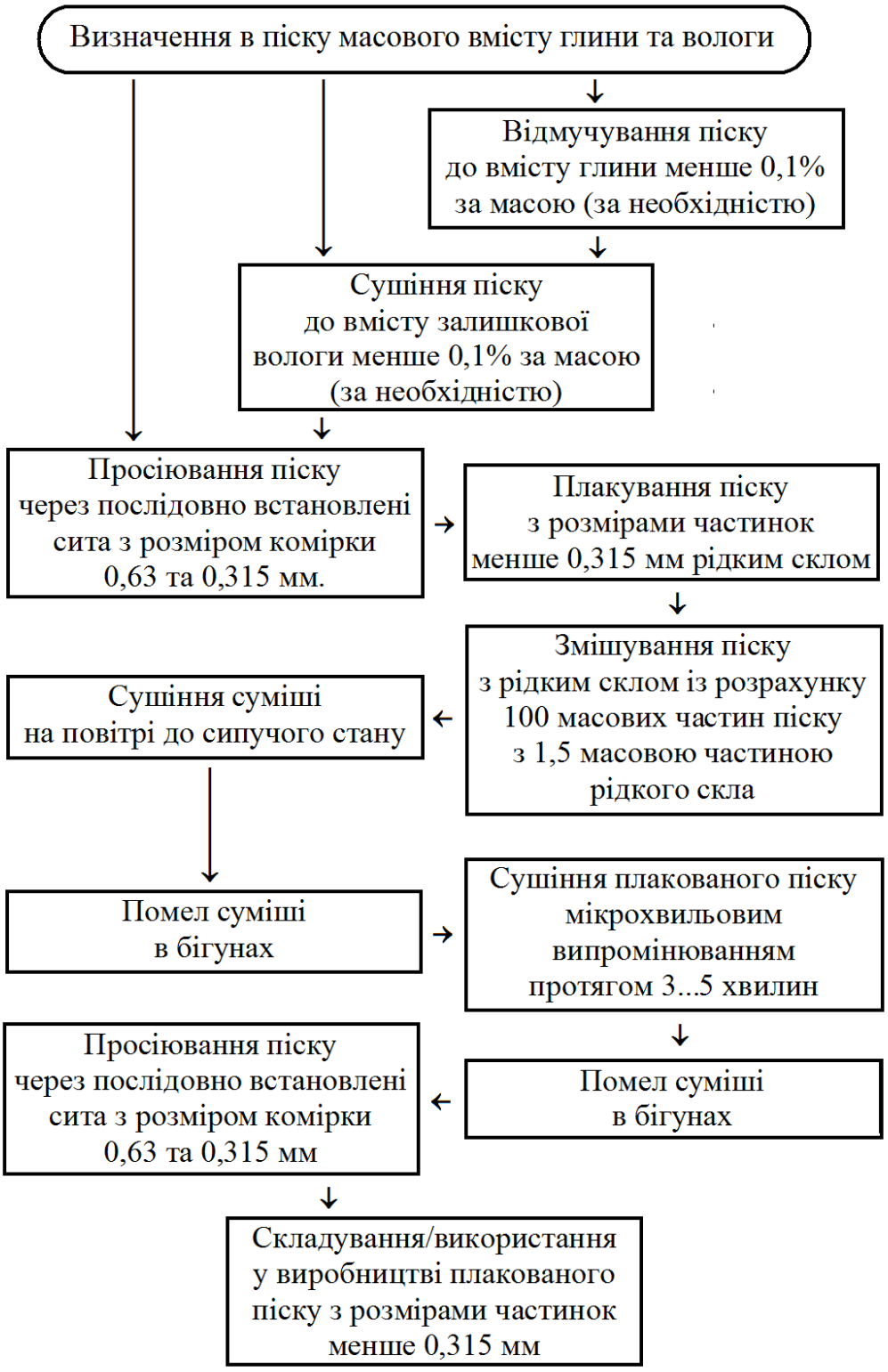
Зі збільшенням тривалості обробки адгезійна (див. А-В на рис. М3) та когезійна (див. А-С на рис. М3) міцність продовжують змінюватись. При цьому адгезійна міцність монотонно підвищується прагнучи до певної межі, а когезійна міцність – зменшується до певної межі. В результаті цього через час τ_A адгезійна міцність перевищує когезійну і, відповідно, руйнування структурованої ПРС проходе виключно за когезійним механізмом.

Таким чином, не залежно від вмісту РС в структурованій ПРС характер її руйнування залежить виключно від часу паро-мікрохвильової обробки, який зі збільшенням часу обробки змінюється від адгезійного до змішаного і когезійного.

При цьому, перехід від адгезійного до когезійного механізму руйнування, вірогідно, викликано особливостями характеру ходу залежності підвищення в часі як адгезійної міцності в системі кварц-РС, так і когезійної міцності РС в манжетах суміші, зумовлена ступенем полімеризації СН з РС під час його дегідратації, так і виникненням в ньому (в манжетах) мікротріщин під час дегідратації.

ДОДАТОК Н

ЗАГАЛЬНА СХЕМА ПОСЛІДОВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ ЛИВАРНИХ ФОРМ ТА СТРИЖНІВ ЗА ПМЗ-ПРОЦЕСОМ



ДОДАТОК О

РЕЄСТРАЦІЙНА КАРТА ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО ЗАРЕЄСТРОВАНА В ДЕРЖАВНІЙ УСТАНОВІ УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ ТА ІНФОРМАЦІЇ

Реєстраційна картка технології (РКТ)

5436. Державний реєстраційний номер: 0622U000123

5517. № Держреєстрації НДДКР: 0121U109531

5256. Особливі позначки: 5

9000. Походження технології: С

9159. Договір: немає

Відомості про заявника технології

2459. Код ЄДРПОУ (або реєстраційний номер облікової картки платника податків для фізичних осіб): 44165850

2151. Повне найменування юридичної особи (або П.І.Б.)

1 - українською мовою

Український державний університет науки і технологій

2 - англійською мовою

Ukrainian State University of Science and Technology

2358. Скорочене найменування юридичної особи: УДУНТ

2655. Місцезнаходження: вул. Лазаряна, буд. 2, м. Дніпро, Дніпровський р-н., Дніпропетровська обл., 49010, Україна

2934. Телефон / Факс: 380567765947

2394. Адреса електронної пошти/веб-сайт: udunt@diit.edu.ua; http://diit.edu.ua/

1333. Форма власності, сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Відомості про власника технології

2458. Код ЄДРПОУ (або реєстраційний номер облікової картки платника податків для фізичних осіб): 44165850

2152. Повне найменування юридичної особи (або П.І.Б.)

1 - українською мовою

Український державний університет науки і технологій

3 - англійською мовою

Ukrainian State University of Science and Technology

2360. Скорочене найменування юридичної особи: УДУНТ

2656. Місцезнаходження: вул. Лазаряна, буд. 2, м. Дніпро, Дніпровський р-н., Дніпропетровська обл., 49010, Україна

2935. Телефон / Факс: 380567765947

2395. Адреса електронної пошти/веб-сайт: udunt@diit.edu.ua; http://diit.edu.ua/

1332. Форма власності, сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Джерела, напрями та обсяги фінансування

7700. КПКВК: 2201040

7201. Напрям фінансування: 2.2 - прикладні дослідження і розробки

Код джерела фінансування	Обсяг фінансування, тис. грн.
7711	1 225,00
7713	1 225,00

Терміни виконання роботи

7553. Початок виконання НДДКР: 01.2021

7362. Закінчення виконання НДДКР: 12.2022

Відомості про технологію

9027. Назва технології

1 - українською мовою

Технологія структурування піщано-рідкоскляних сумішей мікрохвильовим випромінюванням для виготовлення ливарних форм і стрижнів

3 - англійською мовою

Technology of sand-sodium-silicate mixtures structuring by microwave radiation for casting molds and cores manufacturing

9125.Опис технології

1. Мета, для досягнення якої розроблено чи придбано технологію

Створення екологічно та санітарно-гігієнічно безпечної технології структурування піщано-рідкоскляних сумішей, яка забезпечує швидке виготовлення ливарних форм і стрижнів високої якості з заданим рівнем технологічних та фізико-механічних властивостей

2. Основна суть технології

Суть технології структурування піщано-рідкоскляних сумішей полягає в попередньому плакуванні кварцового піску рідким склом, його сушінні, помелу до сипкого стану, відбору певних фракцій плакованого кварцового піску, їх вібраційному ущільненні в оснащенні, яке виготовлене з певних матеріалів, і обробці в паро-мікрохвильовому середовищі

3. Анотований зміст

Розроблено інноваційну науково обґрунтовану технологію структурування піщано-рідкоскляних сумішей мікрохвильовим випромінюванням для виготовлення ливарних форм і стрижнів (ПМЗ-процес), оптимізовано масовий та конгломераційний склад сумішей, встановлено раціональні параметри технології їх структурування, закономірності формування основних властивостей, розроблено функціональні залежності між ними. Визначені умови зберіганні вихідних матеріалів, використання та плакування піску, видалення стрижнів з виливків, використання різновидів процесу та його елементів в ливарних цехах при виготовленні дрібних виливків загально машинобудівного призначення

4. Проблеми, які технологія дає змогу вирішувати

Нова технологія спрямована на забезпечення екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки, зниження енергоємності і собівартості виготовлення литих деталей, підвищення якості виливків, зниження відходів ливарного виробництва

5. Ознаки новизни технології

Новизна розробленої технології полягає у використанні ефекту масопереносу рідкого скла в міжзеренному просторі плакованого піску під дією водяної пари, капілярних сил та мікрохвильового випромінювання шляхом його гідратації в плакованому шарі конденсатом, спінювання, в'язкої течії до точок контакту сусідніх зерен, виникнення манжет між сусідніми зернами та його послідуючою дегідратацією

6. Складові технології

Технологія складається з наступних етапів: плакування кварцового піску рідким склом, сушіння рідкого скла в плакованому шарі кварцового піску до його сипучого стану, додаткового сушіння плакованого кварцового піску в мікрохвильовому випромінюванні, збирання оснастки та встановлення в ній водяного заряду, заповнення робочих порожнин оснастки плакованим кварцовим піском (суміші), вібраційне ущільнення суміші в оснастці, обробка суміші в паро-мікрохвильовому середовищі, розбірка оснастки та вилучення з неї виробу (ливарної форми, стрижня) зі

структурованої піщано-рідкоскляної суміші.

Опис технології англійською мовою

Technology includes the following stages: quartz sand with sodium silicate solute cladding, sodium silicate solute drying in quartz sand cladded layer to its loose state, cladded quartz sand additional drying in microwave radiation, rigging assembling and a water charge installing in it, rigging working cavitiesfilling with cladded quartz sand (mixture), mixture vibration compaction in rigging, mixture treatment in steam-microwave environment, riggingdisassembly and product(casting mold, core) extraction from structured sand-sodium-silicate mixture.

9127. Технічні характеристики

Використання технології за ПМЗ-процесом дозволяє на існуючих нині мікрохвильових печах з потужністю магнетрону 700...900 Вт виготовляти впродовж 3...20 хв ливарні форми, їх окремі елементи, стрижні масою до 4 кг та розмірами 200п200п200 мм з межею міцності на стиск до 3,5 МПа, газопроникністю не менше 100 од, газотворністю 3...8 см3/г, які придатні до використання безпосередньо після їх вилучення з оснастки для виготовлення виливків зі сталі, чавуну, бронзи, сплавів на основі алюмінію тощо. Крім того, за ПМЗ-процесом можливо виготовляти об'ємно замкнуті ливарні форми за замороженими моделями з піщано-водяних сумішей, скріпляти між собою ливарні напівформи з піщано-рідкоскляних сумішей, використовувати суміші в якості теплоізоляційних матеріалів, що формують надливи та елементи ливниково-живлючих систем виливків.

9128. Техніко-економічний чи соціальний ефект

Додатковий чистий прибуток досягається за рахунок зниження витрат на вибивання виливків з ливарних форм та стрижнів з виливків, відмовлення від використання у виробництві синтетичних смол імпортного виробництва, використання в технології вітчизняних недефіцитних недорогих матеріалів великотоннажного виробництва, високої технологічності сумішей. Додатковий соціальний ефект полягає в різкому підвищенні санітарно-гігієнічних умов і культури виготовлення виливків, зниженні забруднення навколишнього середовища та повітря, практично повному зникненні необхідності утилізації відпрацьованої суміші шляхом її використання у якості сировини для виготовлення силікат-брили, або у якості наповнювача різноманітних будівельних бетонних виробів, зокрема, тротуарної плитки тощо.

5490. Об'єкти інтелектуальної власності

1. Патент на винахід: Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № а 201901350. Заявник - Солоненко Людмила Ігорівна (UA), Реп'ях Сергій Іванович (UA). Власник - Солоненко Людмила Ігорівна (UA), Реп'ях Сергій Іванович (UA); заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7с. 2. Патент на винахід: Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 123068 Україна: МПК B22C 9/10, 9/12. № а 201901348. Заявник - Солоненко Людмила Ігорівна (UA), Реп'ях Сергій Іванович (UA). Власник - Солоненко Людмила Ігорівна (UA), Реп'ях Сергій Іванович (UA); заявл. 11.02.2019; опубл. 10.02.2021, Бюл. № 6. 3 с. 3. Патент на винахід: Спосіб виготовлення ливарних форм за одноразовими замороженими моделями: пат. 125146 Україна: МПК B22C 9/04, 9/02, 7/02. № а 201910047. Заявник - Солоненко Людмила Ігорівна (UA), Реп'ях Сергій Іванович (UA). Власник - Солоненко Людмила Ігорівна (UA), Реп'ях Сергій Іванович (UA); заявл. 27

9156. Основні переваги порівняно з існуючими технологіями

Основними перевагами запропонованої технології є технологічність та екологічна чистота процесу виробництва, стабільність та передбачуваність очікуваного результату, безпека виготовлення ливарних форм, стрижнів, виливків, висока культура виробництва, доступність та низька вартість використовуємих матеріалів, простота утилізації та регенерації відпрацьованої суміші.

9155. Галузь застосування

Ливарне виробництво

9158. Інформація щодо потенційних ринків збуту технології

Німеччина, Велика Британія, Польща, Чехія, Італія, Китай, Японія

9160. Інформація щодо потенційних ринків збуту продукції, виробленої з використанням технології

країни Євросоюзу та Азії

9157. Ступінь відпрацювання технології

– якщо технологічну документацію розроблено за результатами попередніх випробувань дослідного зразка - 9157/O

– 9157/TRL5 - перевірено прототип в робочому середовищі користувача, технологію перевірено у відповідному робочому середовищі (на виробництві)

5535. Умови поширення в Україні

53 - за договірною ціною

5211. Умови передачі зарубіжним країнам

63 - за договірною ціною

6012. Орієнтовна вартість технології та витрат на впровадження: 107 тис. грн.

6013. Особливі умови впровадження технології

За умов наявності відповідного оснащення та обладнання у замовника

Підсумкові відомості

5634. Індекс УДК: 621.74, 621.743.4, 621.742/.743.4/.5, 621.743/.744.58, УДК 621.74

5616. Коди тематичних рубрик НТІ: 55.15, 55.15.19.17, 55.15.19.19, 55.15.21.23

6111. Керівник юридичної особи: Пшінько Олександр Миколайович

6210. Науковий ступінь, вчене звання керівника юридичної особи: (д. т. н., професор)

6120. Керівник НДДКР

1 - українською мовою

Узлов Костянтин Іванович

2 - англійською мовою

Uzlov Kostiantyn Ivanovych

6228. Науковий ступінь, вчене звання керівника НДДКР: (д. т. н., професор)

6140. Керівник структурного підрозділу МОН України: Чайка Дар'я Юріївна

Тел.: +38 (044) 287-82-55
Email.: chayka@mon.gov.ua

6142. Реєстратор: Іванов Олексій Васильович