

зменшилась з 311НВ до 217НВ, що якісно впливає на подальшу механічну обробку литої заготовки, без потреби проводити термічну обробку.

У підсумку, дослідження впливу алюмінію на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну с низьким вмістом хрому, є актуальним та перспективним технічним завданням, вирішення якого дозволить оптимізувати комплекс, як фізико-механічних властивостей цих чавунів, так і техніко-економічні параметри їх виробництва.

Посилання

1. Александров Н. Н. Технология получения и свойства жаростойких чугунов / Н. Н. Александров, Н. И. Клочнев. — М. : Машиностроение, 1964. — 171 с.
2. К.П. Бунин, Я.Н. Малиночка, Ю.Н. Таран. Основы металлографии чугуна, М.: Металлургия, 1964г. – 160с.
3. А.П. Гуляев. Металловедение, М.: Металлургия, 1966г. – 734с.
4. ДСТУ 6892-1:2019 - Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури.
5. ДСТУ ISO 6506-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування.
6. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИВАРНОЇ ОСНАСТКИ

*Керівник - головний технолог ПрАТ «ДАЗ» А.П. Герасимчук
Старший викладач каф. технології машинобудування С.В. Бончук
Зав. каф. технології машинобудування – доц., канд. техн. наук С.Л. Негруб
Магістрант Б.В. Карманов
Український державний університет науки і технологій
м. Дніпро, Україна*

Вступ. 3D-друк – процес створення тривимірних об'єктів практично будь-якої геометричної форми на основі їх цифрових моделей з необхідним вимогами та властивостями [1]. Ця концепція ґрунтується на побудові об'єкта шарами, які послідовно наносяться та відтворюють контури моделі. Завдяки пошаровому додаванню матеріалу можна отримати деталі, що не відрізняється від тих, що отримані іншими технологіями, такими як лиття або фрезерування.

Найбільш поширеними методами 3D-друку є екструзійний метод (FDM – FusedDepositionModeling) та полімеризація в резервуарі під впливом джерела світла (SLA – Stereolithography). З кожним роком вартість 3D-принтерів поступово знижується, а якість кінцевого продукту, точність позиціонування та швидкість друку, навпаки, стрімко підвищується і ця технологія стає більш доступнішою.

Мета. Розглянути технології, обладнання та матеріали з подальшим впровадженням у сучасне ливарне виробництво технологічного оснащення.

Методика. У роботі розглянуто проектування та виготовлення формоутворювальної оснастки, яка має бути вироблена за допомогою тривимірного друку за технологією SLA (стереолітографія) на 3D-принтері. Ця технологія ґрунтується на затвердженні рідкої фотополімерної смоли в резервуарі під впливом джерела світла, що дозволяє відтворити цифрові моделі. Для виготовлення моделі використовуються сучасні модифіковані високотемпературні інженерні пластики, зокрема фотополімерна смола FunToDo, яка характеризується високою щільністю та стійкістю до широкого діапазону температур від -45°C до $+225^{\circ}\text{C}$ [2]. Залежно від розмірів виробу обирається відповідне обладнання для 3D-друку з відповідною робочою областю, яка дозволить надрукувати форму цілком або розділити модель на мінімальну кількість частин.

Процес виготовлення за даною технологією може бути описаний наступним чином:

1. Проектування конструкції 3D-моделі форми
2. Вибір обладнання для 3D-друку
3. Опрацювання електронної 3D-моделі та параметрів для тривимірного друку
4. Перетворення 3D-моделі в G-code та її підготовка в слайсері для 3D-друку:

Після цих етапів отримана індивідуальна форма для воскування буде готовою для друку на 3D-принтері.

В якості вихідної електронної моделі було обрано тривимірну модель ливарної заготовки деталі «заглушка». Заготовка виготовляється методом лиття по моделям, що виплавляються з восківок. Восківки для лиття виготовляються за допомогою індивідуальної форми для воскування, яка буде роздрукуватися на 3D-принтері.

Створення цифрової моделі деталі є першим етапом у процесі 3D-друку. Найбільш поширеним методом є використання систем комп'ютерного проектування (CAD). Для цього можуть застосовуватись різноманітні програмні пакети інженерної графіки, такі як AutoCAD, Компас-3D, NanoCAD, SolidWorksta інші. Також може бути використане зворотнє проектування за допомогою 3D-сканування.

Після аналізу вихідних даних, службового призначення та креслення деталі "заглушка", створюється 3D-модель. Проаналізувавши розміри та допуски на механічну обробку, виокремлюються поверхні, які будуть

оброблені лише механічно. Для даної деталі це включає в себе лиття, фрезерування та свердління. Кожен з цих типів обробки має свої допуски та припуски, які враховуються при розробці конфігурації та розмірів заготовки. Загальний припуск на механічну обробку складатиме 2-3 мм.

Розміри заготовки повинні бути розраховані з урахуванням не лише припуску на подальшу механічну обробку, але й усадки матеріалів, яку необхідно враховувати при розробці розмірів 3D-моделі заготовки. У цьому випадку, матеріалом деталі є алюмінієвий сплав АЛ9 і відсоток усадки при отриманні заготовки складає 1,8-2,1% [2].

При проектуванні 3D-друку необхідно оцінювати кілька проектних рішень, зокрема обмеження зовнішньої та внутрішньої геометрії об'єкта, підтримуваних матеріалів та вимог до вихідних даних (рис. 1).

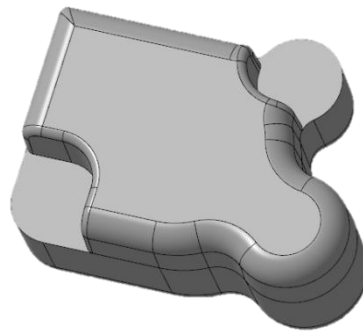


Рисунок 1 – 3Д модель заготовки деталі «заглушка»

Конструкція форми може бути як простою, так і складною одночасно. Наприклад, зовні вона може мати форму чотирикутника або круга, а всередині утворювати різні відсіки та складні конфігурації. Відповідно, процес проектування форми буде більш ретельним, оскільки вона повинна мати спеціальні роз'єми в різних площках.

Для створення майбутньої восківки, виготовленої за допомогою форми, необхідно вибрати оптимальний переріз майбутнього виробу та їх оптимальну кількість.

Проектування форми залежить від таких факторів, як:

- вибір оптимальної кількості перерізів виробу;
- створення схеми розташування порожнин формування;
- продумування ливарної системи та виштовхування готової деталі.

За допомогою систем автоматизованого проектування створюються умови визначення основних параметрів і характеристик майбутньої форми, зводиться до мінімуму ручна робота конструктора.

Проектування – важливий етап у виготовленні форм, під час якого створюються креслення, і навіть тривимірні моделі установки. Серйозний підхід до проектування дозволяє уникнути проблем на етапі виробництва форм, виготовлення деталей. Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє значно прискорити процес із високим рівнем деталізації.

Розроблена форма для отримання воскової моделі поділяється на дві половини, нижню та верхню напівматриці. Загальна форма, що складається з двох половин, замикається та стягується болтовими з'єднаннями. Потім до неї, через спеціально передбачений отвір, подається віск, який набуває форми внутрішньої геометрії виробу (рис. 2).

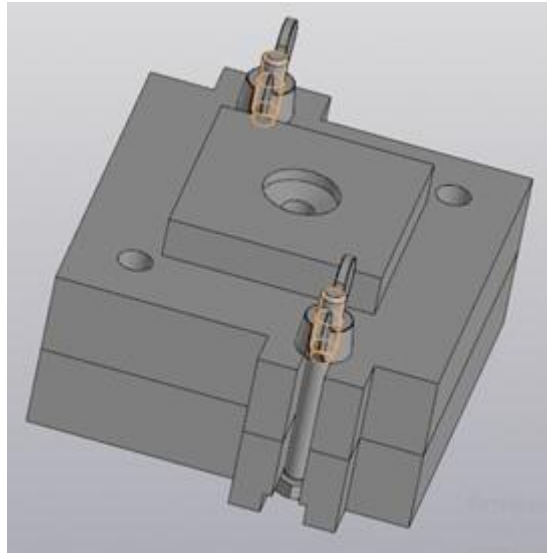


Рисунок 2 – 3D-модель форми для восківки

Для подальшого друку виробу необхідно перетворити 3D-модель у формат, який може оброблятися 3D-принтером, такий як файл стереолітографії (STL), також відомий як файл "стандартної трикутної мови" (STL). Цей файл обробляється 3D-принтером у спеціалізованому математичному пакеті, де, зазвичай, для сканованих моделей може проводитись згущення полігонів та згладжування поверхні[3].

Після створення файлу STL він імпортується до програми підготовки моделі до друку, так званого слайсера. Ця програма розділяє конструкцію на шари, які будуть використані у створенні деталей. Слайсер бере STL-файл та конвертує його у G-код. G-код є мовою програмування для пристроїв із числовим керуванням, яка використовується для управління автоматизованими машинами, такими як верстати з ЧПУ та 3D-принтери.

Слайсер також дозволяє оператору 3D-принтера визначити параметри конструювання, включаючи положення підтримок, товщину шару, розташування деталі та положення підтримуючого матеріалу. Ця програма зазвичай є власністю виробника конкретного 3D-принтера, але існують також універсальні слайсери.

Для друкування форми для воскування буде використана технологія полімеризації. На відміну від FFF/FDM-друку, полімеризація в резервуарі застосовує реактопласти для виготовлення деталей. Полімер постачається у формі в'язкої рідини та опромінюється лазером. При виготовленні деталей полімеризацією у ванні дуже важливо правильно опромінити деталь УФ-

світлом, що закріпить її оптимальні властивості. Інформація про оптимальний час УФ-опромінення надається у специфікації смоли відповідним виробником.

Для друку форми обрана фотополімерна смола FunToDo, яка широко використовується в області високоточного друку на 3D-принтерах, що використовують технологію стереолітографії. Ця смола є досить щільною та стійкою до широкого спектру температур, дозволяючи використовувати її в різних процесах, включаючи вулканізацію. Продукти, надруковані з цієї смоли, мають структуру, схожу на литий пластик, та відзначаються високою твердістю. Цей матеріал може знаходити застосування в таких галузях, як стоматологія та автомобільна промисловість, завдяки своїм унікальним властивостям[4].

В якості обладнання для 3D-друку ливарної оснастки було обрано 3D-принтер AnycubicPhoton M3 Max (рис. 3).

Anycubic є одним із лідерів у виробництві 3D принтерів, заснованих на фотополімерній технології. Ці принтери використовують рідкий матеріал, який твердне під впливом ультрафіолетових променів, щоб створити тривимірні моделі. Загалом, фотополімерні 3D принтери Anycubic є гарним вибором для тих, хто шукає високу якість друку та точність. Вони можуть використовуватися для створення дрібних деталей, прикрас, моделей та інших виробів [5].

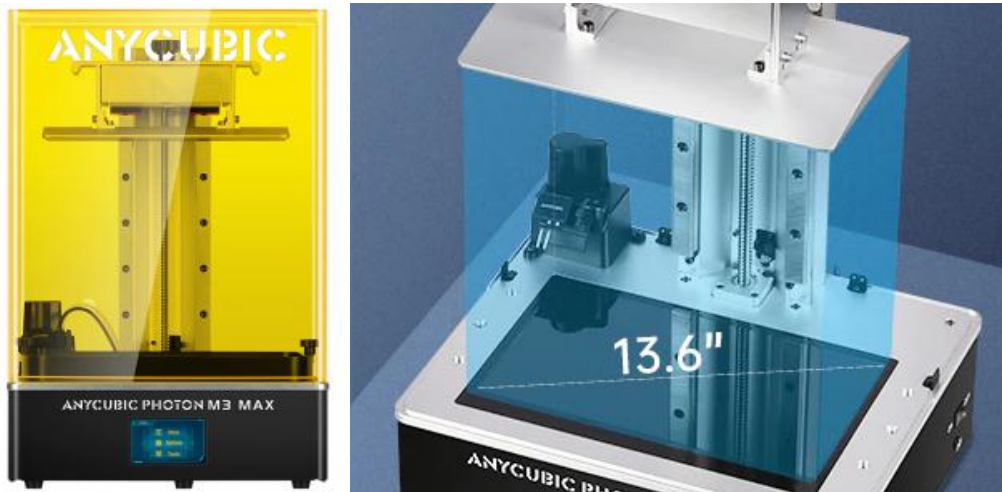


Рисунок 3 –3D- принтер AnycubicPhoton M3 Max

Перед тим як розпочати друк об'єкта на будь-якому 3D-принтері, необхідно провести налаштування. Наприклад, при включенні принтера AnycubicPhoton M3 Max на ЖК-екрані відображається логотип та головне меню.

Перший етап налаштування - це вирівнювання платформи. Деякі моделі принтерів мають функцію автоматичного вирівнювання, яку можна знайти у

меню на екрані принтера. Платформи можуть бути з підігрівом або без підігріву.

Наступним кроком підготовки є наповнення ванни принтера фотополімерною смолою. Це може бути зроблено вручну або автоматично, за допомогою системи автоматичного подання смоли та індикатора рівня. Після завершення цих підготовчих процесів 3D-принтер буде готовий до друку [5].

Для перетворення STL-файлу в G-код, який розуміє 3D-принтер, використовується програма-слайсер. Для цієї мети було обрано програмне забезпечення AnycubicPhotonWorkshopSlicer. Це програмне забезпечення має зручний інтерфейс та потужні інструменти для нарізування моделей, що спрощує процес підготовки моделей до 3D-друку.

Програма AnycubicPhotonWorkshopSlicer використовує тривимірну модель у форматі STL для генерації траєкторії руху друку на основі параметрів, встановлених користувачем. У налаштуваннях слайсера користувач обирає швидкість друку, швидкість переміщення, висоту шару тощо. Ця інформація експортується з програми у вигляді файлу G-Code.

Файл G-Code - це простий текстовий файл з рядом текстових кодів і списком координат повних осей X, Y і Z системи координат, які використовуються для друку 3D-моделей.

На першому етапі об'єкти завантажуються до програми. Після цього користувач налаштовує параметри розміщення моделей на платформі для друку. Кожна з моделей розташовується на відстані 8-10 мм вище столу для друку та нахилена на 15-20° до столу.

Далі налаштовуються параметри друку (рис. 4).

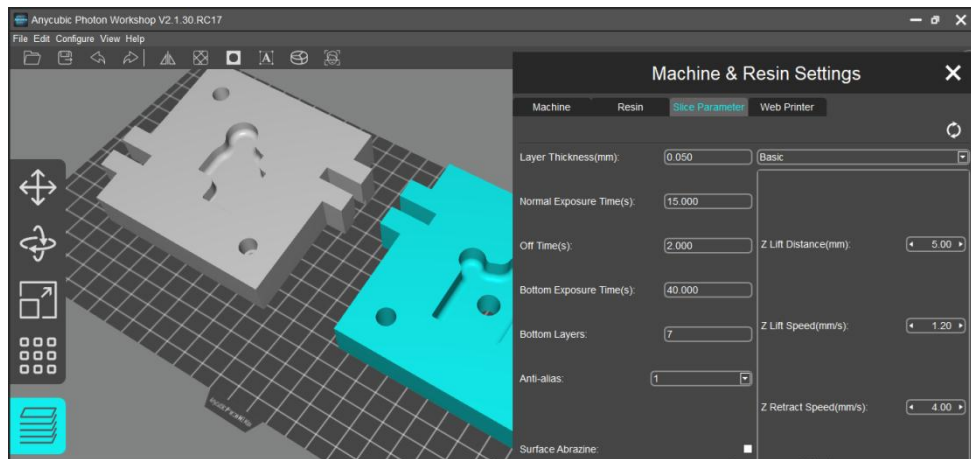


Рисунок 4 – Параметри 3Д-друку

Рекомендовані параметри друку представляємо у вигляді таблиці 1 [5].

Обравши усі необхідні параметри друку, які залежать в першу чергу від обраного матеріалу переходимо до вкладки формування підтримок (рис. 5). Як майже у всіх технологіях 3D-друку, при полімеризації в резервуарі використовуються структурні підтримки. Положення та кількість підтримок

залежить від типу використовуваного принтера. Для принтерів, що друкують знизу нагору, підтримка формується складніше. Великі горизонтальні поверхні (робочі шари) можуть опинитися під сильним впливом під час відбитка від ванночки. Якщо стадія відділення виявиться невдалою, друк може зірватися. З огляду на це деталі друкуються під кутом, і, отже, скорочення кількості підтримок перестав бути пріоритетом.

Таблиця 1 – Розміри заготовки для 3Д-друку

Параметр	Значення
Товщина шару	0,05 мм
Нормальний час експозиції	3 с
Затримка вимкнення світла	2 с
Час експозиції базових шарів	30 с
Кількість базових шарів	6
Висота підйому по осі Z	10 мм
Швидкість підйому по осі Z	4 мм/с
Швидкість ретракту по осі Z	4 мм/с
Рівень згладжування	1

Ще один параметр який потрібно обрати це відсоток заповнення. В даному випадку обрано 100% заповнення оскільки форма для воскування деталі «заглушка» буде випробовуватися під дією значних навантажень та температурних характеристик, а отже вона повинна бути достатньо міцною [6].

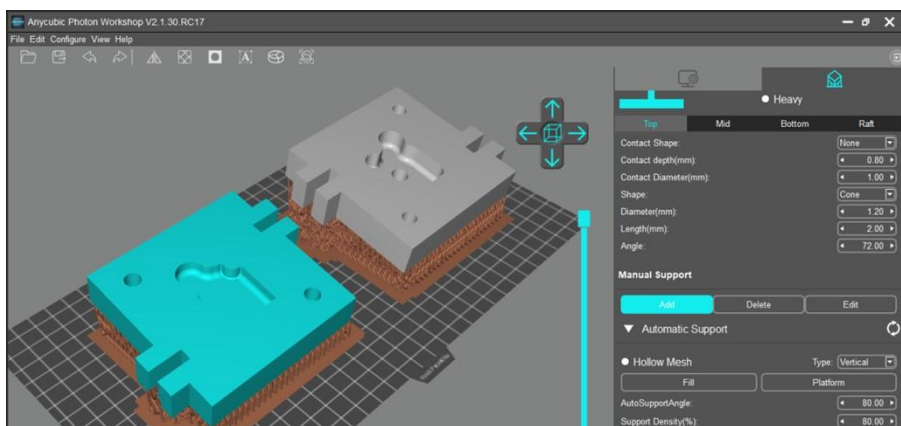


Рисунок 5 – 3Д-модель з підтримками для слайсування

Коли вже виконано слайсування програма розраховує час друку та об'єм який буде використано 3Д-принтером під час друку (рис. 6). А також можливо переглянути симулятор 3Д друку

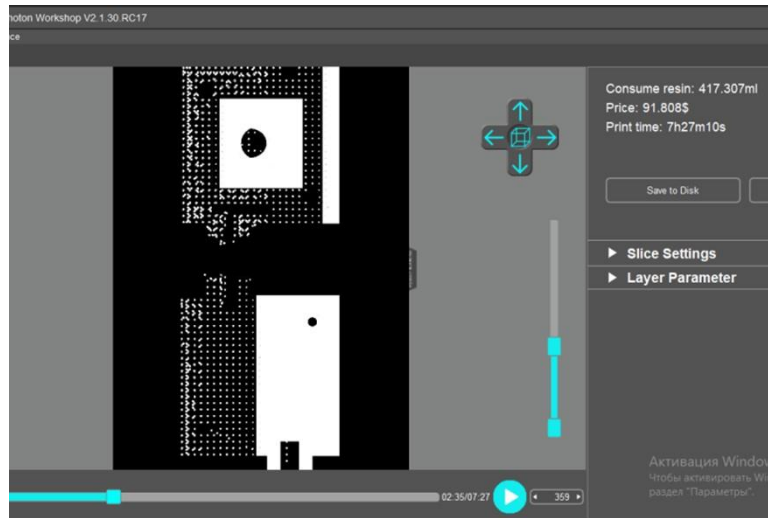


Рисунок 6 – Симулятор 3Д-друку об’єкту

Вигляд у розрізі надає моделі напівпрозорості, завдяки якій можна побачити, що знаходиться за зовнішнім шаром. Опція рентгену допомагає оцінити внутрішню структуру моделі, шар за шаром. Ця функція також використовується для перевірки траєкторії руху та виявлення пропущених шарів та порожнеч. Користуючись панеллю, розташованою справа у вікні, можна переміщатися вгору і вниз по траєкторії для огляду шарів.

Обраний 3Д-принтер AnycubicPhoton M3 Max друкує знизу в гору. Надрукована модель форми для воскування деталі «заглушка» на платформі 3Д-принтера показана рис. 7.



Рисунок 7 – Модель, що надрукована знизу догори на платформі принтеру

Для деяких технологій 3D-друку видалення надрукованого так само просто, як відділення надрукованої частини від робочої платформи. Для інших промислових методів 3D-друку видалення надрукованого – це високотехнологічний процес, що включає точне вилучення надрукованого,

коли воно ще укладено у підтримуючому матеріал або прикріплено до підкладки. Частіше доопрацювання надрукованої форми залежить від технології друку. Деяким технологіям необхідний процес затвердіння під УФ-променями, в той час як інші дозволяють відразу передавати деталі далі.

В нашому випадку після видалення форм з платформи, надруковані деталі занурюють у спиртовий розчин та виконують операцію промивання. Після цього з надрукованих форм видаляють підтримки та далі виконується процес затвердіння під УФ-променями, а саме сушка [5].

Можливості принтера AnycubicPhoton M3 Max дозволяють надрукувати одночасно дві половинки форми, що повністю передають конфігурацію ливарної моделі. Задані параметри друку, щільність заповнення і правильно підібраний матеріал забезпечують отримання досить міцної форми зі складною внутрішньою конфігурацією, яка витримує всі параметри заливки воском (рис. 8).

Попередньо розрахований час друку форми становить 11,2 годин. Кількість шарів при друку – 1253 одиниці. Вага моделі надрукованого сегмента з урахуванням матеріалу підтримок склала 0,4л.

Виробничий ланцюжок із використанням надрукованої форми наступний. У форму заливається віск і виходить воскова модель (рис. 9).

З отриманої воскової моделі створюється форма, яку заповнюють металом, покривши її дрібнодисперсним порошком товщиною не менше 6-8 мм. Матеріал та товщина корки залежать не лише від складності геометрії та розмірів виробу, але і від типу металу, який литиметься в майбутню форму. Потім деталь поміщається в піч. У печі віск виплавляється, а корка стає твердою, утворюючи тверду форму для лиття металу[2].

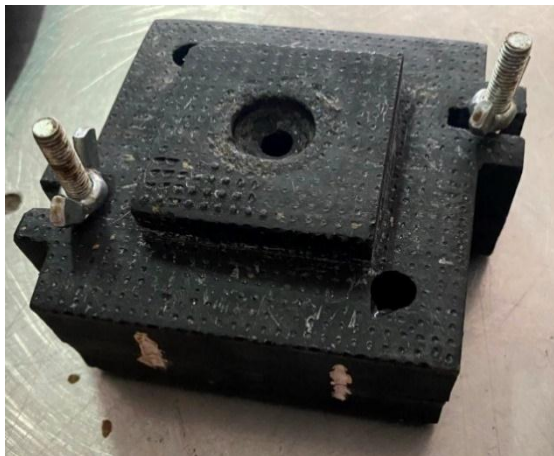


Рисунок 8 – Форма для восківки, яка отримана 3Д-друком



Рисунок 9 – Воскова модель

Після цього розжарений метал заливають у форму, яка остигає. Після охолодження корку розбивають молотком або вібростоїною, що дозволяє вийняти відливку.

Висновки:

1. Технологія допомагає скоротити час на проектування та виготовлення ливарної форми, не потребує паперових креслень та розрахунків. Вона також дозволяє виправити виявлені недоліки не в процесі виготовлення виробу, а на етапі опрацювання 3D-моделі в слайсері перед 3D-друком.
2. Завдяки широкому асортименту застосовуваних матеріалів, формуванню шарів та їх з'єднанням можна друкувати функціонально складні елементи формоутворення, що витримують вплив агресивних середовищ, високих температур й інтенсивних механічних навантажень.

Посилання

1. <https://tomograf.ua/3d-druk-i-prototipuvannya/>
2. Технологія конструкційних матеріалів: навч. посіб. / С. В. Марченко, О. П. Гапонова, Т. П. Говорун, Н. А. Харченко. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – 146 с.
3. <http://ua.insta3dm.com/info/the-stl-file-format-for-3d-printing>.
4. <https://3dway.com.ua/materials#material51>.
5. <https://ua.anycubic.biz/resin-3d-printers>.
6. <https://www.ixbt.com/printers/anycubic-photon-workshop-wash-cure-review.html>.

ОРГАНІЗАЦІЯ ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ ТА ПЛАВЛЕННЯ СТАЛІ В ІНДУКЦІЙНІЙ ПЕЧІ

Аспіранти О.С. Грек, К.О. Величко

Керівник - проф., докт. техн. наук Л.В. Камкіна

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Традиційна послідовність отримання продуктів твердофазного відновлення [1-3] та їх використання для плавлення сталі включає підготовку шихти та отримання брикетів (окатишів), металургійні агрегати прямого відновлення рудних та рудо-вугільних брикетів (окатишів) (рис. 1) та традиційну схему від сталеплавильного агрегату до металопрокату. Металізовані брикети або окатиші, губчасте залізо – Sponge, у цьому технологічному ланцюжку слугують для підшихтовування в кисневому конвертері або дуговій електросталеплавильній печі.

Практичний інтерес представляє завдання отримання продукту твердофазного відновлення, його розплавлення та плавлення сталі в одному металургійному агрегаті. В якості такого універсального агрегату можливо використовувати індукційну піч. Тоді замість традиційної схеми (рис. 1) може бути запропонована наступна послідовність технологічних операцій (рис. 2).