

УДК 621.778.073

Мар'єнко Б.В., Абрамов С.О., Чеченєв В.А., Бондаренко С.В.

**Технологічне забезпечення якості валів валків-кристалізаторів**

Marienko B.V., Abramov S.A., Bondarenko S.V.

**Technological provision of quality of shafts of twin-roll casting rolls**

**Мета.** Забезпечення якості валів валків-кристалізаторів за рахунок поліпшення охолодження на машинобудівному підприємстві.

**Методика.** Проведена робота щодо створення та вдосконалення технологічного процесу виробництва валів валків-кристалізаторів агрегату валкової розливки-прокатки.

**Результати.** Розглянуті можливості струменево-абразивної обробки заготовок з метою зменшення шорсткості поверхонь. Головною перевагою є можливість зменшення шорсткості поверхні складного профілю. Проведені дослідження виявили переваги обробки деталей під впливом механічного удару. Застосування абразивної маси, що забезпечує таку обробку, дозволяє зменшувати енерговитрати. Спираючись на теоретичні і експериментальні дослідження обрано матеріали, які забезпечують максимальну продуктивність і мінімальну шорсткість оброблюваних поверхонь.

**Наукова новизна.** Уперше розглянуто можливості струменево-абразивного методу виготовлення отворів для подачі охолоджуючої рідини у внутрішні пустоти валків-кристалізаторів з метою забезпечення високої якості валків-кристалізаторів. Все це дозволяє підвищити якість отриманих валковою розливкою-прокаткою штаб, а також покращити умови роботи самих валків-кристалізаторів.

**Практична значущість.** Реалізація досліджень за цими напрямками дозволить створити єдиний контроль-мотиваційний механізм забезпечення якості продукції.

**Ключові слова:** дослідження, валкова розливка-прокатка, валок, технологія, заготовка, операції, якість.

**Purpose.** Ensuring the quality of shafts of twin-roll casting rolls by improving cooling at the machine-building enterprise.

**Methodology.** The work on the creation and improvement of the technological process of production of the roll shafts of the twin-roll casting unit.

**Findings.** Possibilities of jet-abrasive processing of preparations for the purpose of reduction of roughness of surfaces are considered. The main advantage is the ability to reduce the surface roughness of a complex profile. Studies have shown the benefits of machining parts under the influence of mechanical shock. The use of abrasive mass, which provides such treatment, reduces energy consumption. Based on theoretical and experimental studies, materials are selected that provide maximum productivity and minimum roughness of treated surfaces.

**Originality.** For the first time, the possibilities of the jet-abrasive method of making holes for supplying coolant to the internal cavities of the twin-roll casting rolls in order to ensure high quality twin-roll casting rolls are considered. All this allows to improve the quality of the obtained by rolling and rolling staff, as well as to improve the working conditions of the rolls themselves.

**Practical value.** Implementation of research in these areas will create a single control and motivational mechanism for product quality.

**Keywords:** research, roll casting, roll, technology, workpiece, operations, quality.

**Вступ.** На сьогодні головним завданням машинобудування та промисловості в цілому є пошук нових та вдосконалення конструкційних матеріалів та способів їх виробництва. Разом з цим однією з головних тенденцій в усіх сферах є підвищення вимог до екологічної чистоти виробництв при одночасному зменшенні собівартості виробів, що є основою сталого виробництва.

Валкова розливка-прокатка якраз є однією з тих технологій, що поєднують у собі низьку вартість та високу екологічність процесу виробництва. Загальна ідея технології, а саме, виготовлення тонких штаб з розплаву, весь цей час залишалась незмінною, змінювались лише конструкції агрегатів.

Найбільш цікавою та найбільш поширеною конструкцією агрегатів прямого виготовлення штаб з розплаву, є агрегати з валками-кристалізаторами. Валки-кристалізатори на даних агрегатах мають різну конфігурацію та різне розташування: горизонтальне, вертикальне або

під нахилом. Однак принцип дії їх один й той самий: охолодження розплаву що подається в зазор між ними шляхом відбору тепла через свою поверхню. При цьому, охолодження валків-кристалізаторів в ході процесу відбувається шляхом подачі води або іншої охолоджуючої рідини у внутрішні, призначені для цього, пустоти валка-кристалізатора.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Сьогодні існують експериментальні установки з суцільнометалевими валками-кристалізаторам [1, 2], однак промислова реалізація таких агрегатів не є доцільною. Головною причиною цього є те, що здатність охолодження розплаву у цих агрегатів падає під час ведення процесу, через їх нагрів в ході процесу. Тому найбільшу доцільність для промисловості мають валки-кристалізатори, конструкція котрих передбачає наявність валу та бандажа, який одягається на вал та охоплює його. При цьому охолодження валків-кристалізаторів в ході процесу відбувається

Мар'єнко Богдан – студент УДУНТ

Абрамов Сергій Олексійович – к.т.н., доцент УДУНТ  
Чеченєв Володимир Андрійович – д.т.н., проф. УДУНТ.  
Бондаренко Сергій Валерійович – к.т.н., ас. УДУНТ

Marienko Bohdan - student

Abramov Serhii – c.t.s. USUST,  
Chechenev Volodymyr – d.t.s. USUST  
Bondarenko Serhii – c.t.s. USUST

шляхом подачі води або іншої охолоджуючої рідини у внутрішні, призначені для цього, пустоти валу або бандажа [3].

Технологія валкової розливки-прокатки є дуже важливою для промисловості, насамперед для малих та середніх підприємств. Головною причиною останнього є те що агрегати з машинами валкової розливки-прокатки потребують відносно малих виробничих площ. Довжина технологічної лінії з машиною валкової розливки-прокатки та двома прокатними клітями становить в середньому близько 60 м [4].

Однак майже усі роботи, що присвячені валковій розливці-прокатці, спрямовані на вивчення самого процесу формування штаби, тобто даний процес розглядається з точки зору обробки металів тиском. В той самий час питання, що стосуються саме конструкцій валків-кристалізаторів, технологічних процесів їх виробництва та забезпечення їх якості майже не розглядаються, існують тільки патенти присвячені конструкції валків-кристалізаторів, а саме форми та реалізації охолоджуючих каналів для охолодження валків-кристалізаторів.

Саме тому технологічне забезпечення якості валу валків-кристалізаторів в умовах сталого виробництва є актуальною задачею.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є забезпечення якості валів валків-кристалізаторів за рахунок поліпшення охолодження на машинобудівному підприємстві.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Дослідити причини незадовільного охолодження валків-кристалізаторів;

2. Дослідити вплив струменево-абразивного методу обробки радіальних і осьових отворів валів;

3. Визначити оптимальні умови процесу струменево-абразивної обробки внутрішніх поверхонь валків-кристалізаторів.

**Матеріали та методи дослідження.** Об'єкт дослідження – технологічний процес струменево-абразивної обробки внутрішніх поверхонь охолоджуючих каналів валів валків-кристалізаторів. Предмет дослідження – є мікрорельєф поверхонь охолоджуючих каналів та задири на перетині каналів валів валків-кристалізаторів агрегатів валкової розливки-прокатки в умовах сталого виробництва на машинобудівному підприємстві.

Методи дослідження: проведення експериментальних досліджень у металографічній лабораторії кафедри технології машинобудування.

**Результати дослідження.** Струменево-абразивна обробка методом вихрової прокатки суспензії через отвори, особливо при обробці прямолінійних ділянок, показала значну перевагу. В якості абразиву застосовано карбід кремнію зеленій зернистістю 100мкм, концентрація абразиву в суспензії 35% по вазі, швидкість прокатки суспензії ~70м/с.

На рис. 1 представлені отримані залежності шорсткості внутрішніх поверхонь радіальних охолоджуючих каналів валка-кристалізатора агрегату валкової розливки прокатки при прямій та вихровій прокатці суспензії.

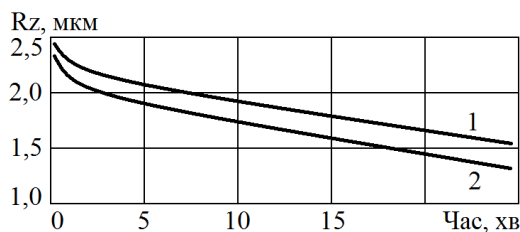


Рисунок 1 – Залежність шорсткості поверхні охолоджуючих каналів валів валків-кристалізаторів: 1-пряма прокатка суспензії; 2-вихрева прокатка суспензії

Існуючі методи контролю (щупові, оптичні, тощо) внутрішніх поверхонь охолоджуючих каналів валів валків-кристалізаторів достатньо складні, трудомісткі, та дорогі, а в багатьох випадках, неможливі.

У зв'язку з цим для контролю якості обробки важкодоступних внутрішніх поверхонь слід застосовувати контроль технологічного процесу обробки.

Сутність цього методу полягає в тому, що контролюється не мікрогеометрія поверхні і її фізико-механічні параметри, а технологічний процес, усі вимоги і режими обробки підконтрольної поверхні. В цьому разі послідовність обробки, її умови і режими виявляються на підґрунті ретельно виконаного експериментального дослідження.

Такий контроль виконують при настройці струменево-абразивного верстата та оснащення, а потім періодично, з метою профілактики браку.

Технологічні можливості струменево-абразивної обробки зумовлюють підвищену увагу до вивчення закономірностей процесу. Головний інтерес для практики представляє встановлення залежностей між технологічними параметрами (розмір абразивних часток, тиск стислого повітря, кут атаки, фізико-механічні властивості часток і оброблюваної поверхні) і вихідними параметрами процесу (шорсткість обробленої поверхні і величина знімання металу). Це обумовлено необхідністю оптимального вибору величин технологічних параметрів в умовах конкретної виробничої ситуації. Такі закономірності можуть бути встановлені в результаті регресійного аналізу експе-

риментальних даних. Проте вживання отриманих залежностей обмежується порівняно вузькими областями зміни параметрів, відповідних умовам проведення експерименту.

Більш універсальним є підхід, заснований на визначенні пошукових залежностей і рішенні задачі оптимізації технологічних параметрів процесу обробки в результаті імітаційного моделювання. Реалізація такого підходу передбачає побудову математичної моделі досліджуваного об'єкту.

*Продуктивність процесу струменевої обробки, технологічно зручніше визначати за мірами ваги або об'єму матеріалу, що знімається, віднесеними до часу. Представлена в роботі модель розроблена для обчислення знімання матеріалу і шорсткості оброблюваної поверхні при комбінованій дії ударної та електричної ерозій на оброблювану поверхню унаслідок використання як наповнювача струменя - полімерних часток. Дискретна природа потоку полімерних часток обумовлює можливість представлення його у вигляді послідовних одиничних актів контактної взаємодії з оброблюваною поверхнею. При такому підході знімання матеріалу з оброблюваної поверхні за одиницю часу складає*

$$G_t = \sum_{i=1}^N (g' + g'')_i \quad (1)$$

де  $N$  - кількість одиничних актів контактної взаємодії в одиницю часу;  $g'$  - величина знімання від ударної ерозії після одиничного акту контактної взаємодії;  $g''$  - величина знімання від електричної ерозії після одиничного імпульсу.

Якщо обмежити види даних поверхню, що піддаються обробці, порівняно простими, що забезпечують досить однорідні умови обробки на всій поверхні (наприклад, площини і циліндрові поверхні), то величина загального знімання матеріалу (об'ємного або масового) зі всієї поверхні може бути визначена, якщо відомий час  $t$ , необхідний для обробки всієї поверхні:

$$G = t \cdot \sum_{i=1}^N (g' + g'')_i \quad (2)$$

При цьому величина знімання після одиничного акту контактної взаємодії визначається для кожної складової окремо.

Кількість часток, що подаються на оброблювану поверхню в одиницю часу, знаходимо як частка від ділення секундної витрати  $U$  на масу однієї абразивної частки:

$$N_c = \frac{U}{m_i} = \frac{6 \cdot U}{\pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_r} \quad (3)$$

Тут  $U$  визначається експериментально як частка від ділення маси абразивного матеріалу на час  $t$ , за яке ця маса викидається сопловим апаратом. Зміна шорсткості поверхні в процесі обробки взаємозв'язана з величиною знімання матеріалу і повинна бути врахована при розробці математичної моделі.

Виходячи з наведеного вище, в основу математичної моделі процесу обробки потоком полімерних часток покладена модель одиничного акту контактної взаємодії, що дозволяє визначити величину  $(g' + g'')$ . Враховуючи складний характер процесів, що протікають при обробці потоком аб-

разиву, доцільно відособити деякі сторони явища, що вивчаються, задавши, таким чином, певну структуру математичної моделі. В загальному випадку математична модель має, в своєму складі, взаємозв'язані елементи, що описують: оброблювану поверхню; потік абразивних часток; контактну взаємодію; знімання матеріалу з оброблюваної поверхні.

Розглянемо детальніше основні елементи математичної моделі одиничного акту контактної взаємодії. Всі описані нижче блоки моделі реалізовані у вигляді програми для розрахунку за допомогою персонального комп'ютера IBM PC/AT. Особливістю прийнятої для досліджень геометричної моделі шорсткої поверхні є детермінований характер розташування сегментів, що схематично надано на рис.2.

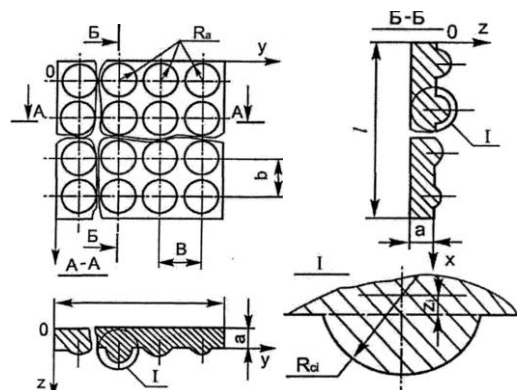


Рисунок 2 - Геометрична модель шорсткої поверхні

Таке припущення дозволяє істотно спростити подальшу побудову математичної моделі контактної взаємодії.

Шорстка поверхня оброблюваного матеріалу моделювалася сукупністю сферичних сегментів, параметри яких підкоряються нормальному закону розподілу і визначаються в результаті аналізу профілограм поверхні. У результаті обробки профілограм отримуємо набори значень висот і розмірів основ (на рівні середньої лінії профілю) нерівностей. Ці дані вводяться в комп'ютер для подальшої обробки.

Для кожної мікронерівності всіх профілограм визначається величина приведенного радіуса:

$$r_{ij} = \frac{y_{bj} \cdot d_{ij}}{y_{rj} \cdot 8h_{ij}} \quad (4)$$

де  $U_{dj}$ ;  $U_{rj}$  - коефіцієнти вертикального і горизонтального збільшення для  $j$ -тої профілограми, що аналізується;  $d_{ij}$  і  $h_{ij}$  - розміри основи на рівні середньої лінії профілю і висоти  $i$ -тої мікронерівності  $j$ -тої профілограми.

Для кожної профілограми обчислюються оцінки математичного очікування і дисперсії:

$$R_j = \frac{1}{n_j} \cdot \sum_{i=1}^{n_j} r_{ij} \quad (5)$$

$$D_j = \frac{1}{n_j - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_j} (r_{ij} - R_j)^2 \quad (6)$$

де:  $n_j$  - кількість значень розмірів основи і висот для  $j$ -тої профілограми.

Для кожної з п'яти зон поверхні, в якій збудовані профілограми у взаємно перпендикулярних напрямках, визначаються приведені оцінки математичного чекання і дисперсії радіусу:

$$R_k = \sqrt{R_{npj-1} \cdot R_{nj}} \quad (7)$$

$$D_k = \sqrt{D_{npj-1} \cdot D_{nj}} \quad (8)$$

де  $R_{npj-1} \cdot R_{nj}$  - оцінка математичних чекань радіусів для профілограм ( $i$ -тої і  $j$  - тої) у взаємно перпендикулярних напрямках.

Перевірка моделі шорсткої поверхні підтвердила можливість адекватного опису з її допомогою шорсткості реальних поверхонь.

Стандартний типорозмір абразивних матеріалів містить зазвичай 65% -основної, 30% - дрібної і 5% - крупної фракції. Наприклад, одиниця об'єму мікропорошку М 10 включає 65% часток з розміром зерен в діапазоні 7-10мкм, 30% часток розміром 3-6мкм і 5% - з розміром 11-14мкм. Таким чином, величини процентного вмісту фракцій в абразивному матеріалі еквівалентні величинам вірогідності появи часток, відповідних даній фракції.

Реалізації розмірів часток потоку відтворюються прийомами статистичного моделювання в два етапи. На першому – по величині випадкового (точніше, псевдовипадкового) числа з рівномірним законом розподілу вірогідності, який відтворюється за допомогою стандартного генератора псевдовипадкових чисел математичного забезпечення комп'ютера, визначається тип фракції. На другому етапі встановлюється значення розміру діаметру сфери частки усередині діапазону, відповідного вибраній на першому етапі фракції:

$$d_{rj} = d_{k-1} + \frac{d_k - d_{k-1}}{P_k - P_{k-1}} \cdot (\alpha - P_{k-1}) \quad (9)$$

де  $d_{k-1}$  і  $d_k$  - граничні значення радіусів, відповідні даній фракції часток;  $P_{k-1}$  і  $P_k$  - вірогідність появи  $k-1$ -ої і  $k$ -тої фракції часток, відповідно:  $\alpha$  - псевдовипадкове число з рівномірним (на інтервалі  $/0,1/$ ) законом розподілу вірогідностей.

Подальше дослідження передбачається виконувати для абразивних часток, які рухаються з постійною швидкістю і кутом атаки (по відношенню до оброблюваної поверхні).

В результаті аналізу науково-технічної літератури встановлено, що при використанні сопла Лавалля, швидкість часток на зрізі сопла можна прийняти рівній швидкості виділення стислого повітря через це сопло.

Величина кута атаки частки залежить від технологічних особливостей модельованого процесу обробки. Наприклад, в разі дослідження обробки потоком часток, сформованим сопловим апаратом, приймаємо, що всі частки потоку мають однаковий кут атаки. При цьому величина кута може змінюватися в широких межах (практично від 0 до 180 град).

Довжина струменя встановлюється у взаємозв'язку з кутом атаки  $\alpha$  і відстанню  $L$  від торця сопла до оброблюваної поверхні

Кількість відторних при моделюванні абразивних часток, тобто кількість актів одиначної контактної взаємодії, обумовлена концентрацією абразивного матеріалу в потоці, величиною витрати в одиницю часу через зріз сопла, а також часом і маршрутом переміщення сопла по оброблюваній поверхні. Вважаючи, що абразивні частки рівномірно розподілені в потоці, моделюємо їх концентрацію як кількість часток, що знаходяться в одиниці об'єму.

Відтворення випадкових величин з відомими параметрами нормального закону розподілу ймовірностей здійснюється за допомогою комп'ютера відомими датчиками псевдовипадкових чисел.

**Обговорення результатів.** Була розроблена установка призначена для видалення задирів із зовнішніх і внутрішніх кромek наскрізних і пересічних отворів і пазів деталей з різних матеріалів, для об'ємної зачистки деталей від окисних плівок, поліпшення шорсткості поверхні методом повторно поступального прокачування через деталі суміші абразивополімерного матеріалу й інших технологічних компонентів, в подальшому тексті іменованих «технологічне середовище».

Всі елементи й вузли установки розміщені в рамі, що є зварною конструкцією з куточків. Базовими елементами установки є два баки циліндричної форми, ємністю кожен по 35 л. На кришках баків є отвори: для засипки абразивного матеріалу, для подачі стислого повітря, для підбурювання повітря, для установки реле тиску.

Два баки з абразивом необхідні для того, щоб, не змінюючи положення заготовки у касеті, забезпечити її обробку у двох напрямках. На бокових поверхнях баків змонтовано по два датчики рівню технічного середовища нижнього та верхнього. У дні баків мають отвори для спуску технологічного середовища, баки з'єднуються між собою трубопроводом. Затискний механізм касети пневматичний, з двома паралельними базовими поверхнями, призначений для установки і закріплення у ній касети з деталями. Касета циліндричної форми з двома паралельними базовими поверхнями, призначена для розташування у ній деталей орієнтовано або навалом. Елементи пневматики призначені для управління подачею стислого повітря в баки й механізм затиску касети, а також підбурювання повітря з баків.

Виготовлена установка і оснастка для обробки деталей вільними абразивами згідно з розробленими ескізами. На рис. 3а. показаний вид зпереду, на рис. 3б - вид ззаду.

Основні характеристики розробленої установки наведені в таблиці 1.



а



б

Рисунок 3 – Установка для обробки деталей вільними абразивами – а) вид спереду; б) вид ззаду

Таблиця 1. Технічна характеристика установки для струменевої обробки полімерами поверхонь деталей машин

Показники	Величина	Показники	Величина
Кількість робочих баків, шт	2	Діаметр кульок (робочих тіл) сополімеру стиролу або скла, мм	2,5...3,0
Об'єм робочого баку, л	25	Маса робочих тіл, кг	20
Витрата стисненого повітря, м <sup>3</sup> /год	5	Габаритні розміри установки (довжина× ширина× висота), мм	1340×900×1400
Тиск стисненого повітря, МПа	0,9...1,0	Маса установки, т	0,3

Призначення розробленої установки: для видалення заусенців із зовнішніх та внутрішніх крайок отворів та наскрізних пазів і тих, що перетинаються з різних матеріалів, для об'ємного зачищення деталей від окисних плівок, покращення шорсткості поверхні методом повторно поступального прокачування через деталі суміші абразивно-полімерної маси й інших технологічних компонентів.

**Висновки.** Проведена робота щодо створення та вдосконалення технологічного процесу виробництва валу валків-кристалізаторів агрегату валкової розливки-прокатки з метою технологічного забезпечення його якості.

Розглянуті можливості струменево - абразивної обробки заготовок з метою зменшення шорсткості поверхонь. Головною перевагою є можливість зменшення шорсткості поверхні складного профілю.

Проведені дослідження виявили переваги обробки деталей під впливом механічного удару. Застосування абразивної маси, що забезпечує таку обробку, дозволяє зменшувати енерговитрати.

Спираючись на теоретичні і експериментальні дослідження обрано матеріали, які забезпечують максимальну продуктивність і мінімальну шорсткість оброблюваних поверхонь.

#### Бібліографічний опис

1. Kashitani Y., Nishida S., Ichikawa J. Horizontal Twin Roll Strip Casting of Aluminum Alloy A7075. *NanoTech Appl.* 2018. №1(2). P 1-3.
2. Технологія машинобудування: підруч. для студентів ВНЗ /Мельничук П.П., Боровик А.І., Лінчевський П.А., Петраков Ю.В. Житомир: ЖДТУ, 2005. 882 с.
3. Захаревич Н.И., Майзлин Л.Я., Софийский П.И. Непрерывное литье металлов в движущиеся формы. М.:ВИЛС, 1966. 44 с.
4. Данченко В.Н. Непрерывная валковая разливка-прокатка стальных полос. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті.* Дніпропетровськ. 2002, С. 63-72.

#### References:

1. Kashitani Y., Nishida S., Ichikawa J. (2018) *Horizontal Twin Roll Strip Casting of Aluminum Alloy A7075 [Horizontal Twin Roll Strip Casting of Aluminum Alloy A7075]. NanoTech Appl.* [in English].
2. Melnichuk P.P., Borovik A.I., Linchovsky P.A., Petrakov Yu.V. (2005) *Tekhnolohiia mashynobuduvannia [Mechanical engineering technology] Zhytomyr: ZhSTU* [in Ukrainian].
3. Zakharevich N.I., Maizlin L.Ya., Sofiysky P.I. (1966) *Nepreryvnoye lit'ye metallov v dvizhushchiyasya formy [Continuous casting of metals in moving molds]. VILS* [in Russian].
4. Danchenko V.N. (2002) *Nepreryvnaya valkovaya razlivka-prokatka stal'nykh polos [Continuous roll casting-rolling of steel strips]. Сучасні проблеми металургії. Dnipropetrovsk: NMetAU* [in Russian].