

Хричиков В.Є., Меньяйло О.В., Семенов А.Д., Ковальчук В.І., Семенова Т.В.
Техніко-економічні особливості використання кокілів з литими калібрами при виготовленні прокатних валків для сортових прокатних станів

Khrychikov V.E., Meniailo O.V., Semenov A.D., Kovalchuk V.I., Semenova T.V.
Technical and economic features of using chill molds with cast gauges for producing rolling rolls for section rolling mills

Мета. Удосконалити технологію виробництва прокатних валків з литими калібрами і зменшити утворення поздовжніх гарячих тріщин при литті в стаціонарні ливарні форми. **Методика.** Оцінювання ефективності розроблених технологічних пропозицій проводили по розміру відбіленого шару чавуну на серійних і експериментальних прокатних валках і дослідних лабораторних виливках вимірювальними пристроями, які пройшли державний метрологічний контроль в умовах Дніпропетровського заводу прокатних валків згідно діючими технічними умовами. **Результати.** Основною причиною виникнення поздовжніх гарячих тріщин при литті валків з литими калібрами є нещільний контакт кокільних напівформ по площині роз'єму. Тому при охолодженні валка шар закристалізованого металу в зоні вертикального роз'єму менший, ніж на іншій поверхні кокілю. Твердіння металу супроводжується усадкою, виникають напруження, які реалізуються в тріщину на ділянках вилівка з меншою товщиною затверділого шару металу. Розроблено і успішно випробувано склад замазки щілини між напівформами кокілів з латунної, бронзової та мідної стружки з розмірами частинок до 2,0 мм і з рідким склом. Для збільшення швидкості відведення тепла від твердіючого металу щілину між напівформами кокілів заварювали мідними електродами. Однак їх висока вартість та необхідність постійно виконувати зварювання перед заливанням чавуну обумовила розробку технології лиття кокілю із залитими по площині роз'єму постійними вставками з міді товщиною 3 мм. Форма торцевої поверхні міді відповідала профілю калібрів чавунного кокілю. В новому кокілі відлито без дефектів три валка, що призначені для прокату лемеха № 149Д. Випробування кокілю з мідними вставками продовжуються з метою оцінки термінів його служби та економічної ефективності впровадження в експлуатацію. **Наукова новизна.** Розроблено і успішно випробувано склад замазки щілини між напівформами кокілів з латунної, бронзової та мідної стружки з розмірами частинок до 2,0 мм і з рідким склом. Розроблено конструкцію та відлито кокіль із залитими по площині роз'єму постійними вставками з міді, торцева поверхня якої відповідала профілю калібрів чавунного кокілю. В новому кокілі відлито три валка без дефектів, які відправлені для експлуатації. **Практична значущість.** Використання розроблених складів замазки щілини між напівформами кокілів забезпечило зменшення браку по поздовжнім гарячим тріщинам. Розроблено конструкцію кокілю із залитими по площині роз'єму постійними вставками з міді, які збільшили швидкість відведення тепла і усунули поздовжні гарячі тріщини на валках.

Ключові слова: прокатний валок, кокіль, литі калібри, гарячі тріщини, усунення.

Purpose. To improve the production technology of rolling rolls with cast gauges and to reduce the formation of longitudinal hot cracks during casting in stationary molds. **Methodology.** The efficiency of the developed technological solutions was evaluated by measuring the thickness of the chilled cast iron layer on both standard and experimental rolling rolls, as well as on laboratory test castings. Measurements were carried out using devices that passed state metrological certification under the conditions of the Dnipro Rolling Roll Plant, in compliance with current technical specifications. **Findings.** The primary cause of longitudinal hot cracks during the casting of rolls with cast gauges is the insufficient contact between the mold halves along the parting plane. As a result, the layer of solidified metal in the vertical parting zone is thinner than on other surfaces of the mold. Metal solidification is accompanied by shrinkage, creating stresses that lead to cracking in areas with thinner solidified metal layers. A sealing paste was developed and successfully tested for filling gaps between the mold halves. The paste consists of brass, bronze, and copper shavings with particle sizes up to 2.0 mm mixed with liquid glass. To increase the heat dissipation rate from the solidifying metal, the gaps between the mold halves were also welded using copper electrodes. However, their high cost and the necessity for constant welding prior to iron pouring prompted the development of a new casting mold technology. This technology involves casting molds with permanent 3 mm thick copper inserts along the parting plane. The end surface of the copper inserts matched the profile of the gauges in the cast iron mold. Using the new mold, three defect-free rolls intended for the rolling of plowshares (149D model) were successfully cast. Tests of the mold with copper inserts are ongoing to evaluate its service life and the economic feasibility of its implementation. **Originality.** A sealing paste composition for filling gaps between mold halves was developed and successfully tested. The paste comprises brass, bronze, and copper shavings with particle sizes up to 2.0 mm and liquid glass. A mold design with permanent copper inserts along the parting plane was developed and cast, with the end surface of the copper matching the profile of the gauges in the cast iron mold. Using the new mold, three defect-free rolls were produced and dispatched for operational testing. **Practical value.** The use of the developed sealing paste for filling gaps between mold halves reduced rejects caused by longitudinal hot cracks. The new mold design, with permanent copper inserts along the parting plane, increased heat dissipation rates and eliminated longitudinal hot cracks on the rolls.

Keywords: rolling roll, chill mold, cast gauges, hot cracks, elimination.

© Хричиков В.Є. - д.т.н., проф. УДУНТ
Меньяйло О.В. - д.т.н., проф. УДУНТ
Семенов А.Д. - УДУНТ
Ковальчук В.І. - УДУНТ
Семенова Т.В. - УДУНТ

© Khrychikov V.E. - d.t.s., prof. USUST
Meniailo O.V. - d.t.s., prof. USUST
Semenov A.D. - USUST
Kovalchuk V.I. - USUST
Semenova T.V. - USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Вступ. Однією з основних завдань розвитку промисловості України є докорінне поліпшення якості та розширення сортаменту прокату та труб з чорних та кольорових металів. Для виконання цього завдання необхідно подальше покращення якості основного змінного обладнання станів - прокатних валків, від яких залежить продуктивність стану, витрата валків на тону прокату, простої стану на перевалку, якість і собівартість продукції, що прокатується.

Всі валки повинні мати зносостійкий і термостійкий (для валків гарячого прокатування) робочий шар, міцну і в'язку серцевину бочки і шийок [1].

Валки відливають з чавуну ($\approx 90\%$) і заевтектоїдної сталі, а частка кованих валків складає $\approx 5\%$ [2]. Важливим показником зносостійкості валків є твердість робочого шару бочки, яку відображають в одиницях Шора, і його глибина в мм [3].

Ливарні форми для виготовлення прокатних валків складаються з таких елементів (рис. 1): піщано-глинистої форми нижньої шийки (2, 3), кокільної частини (5), що формує бочку валка (6), піщано-глинистих форм верхньої шийки (7, 8), надливів (9 - 11) і елементів литникової системи (12, 13, 17). Чистові розміри валка (після механічної обробки) обмежені тонкими лініями (див. рис. 1).

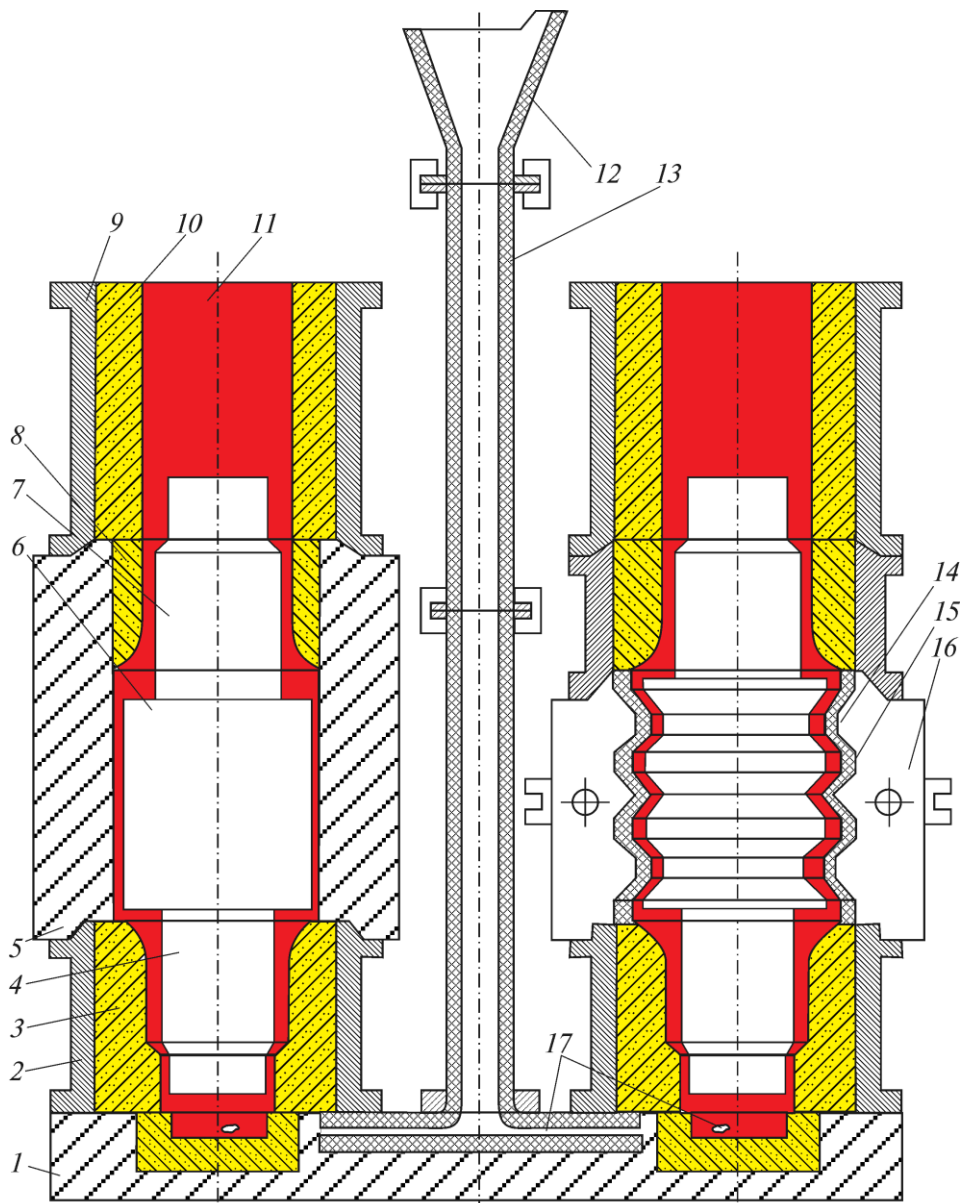


Рис. 1. Схема форми для лиття валків з гладкою бочкою і з литими калібрами (тонкими лініями позначені чистові розміри валків) [3]: 1-двомісний піддон; 2-форма нижньої шийки; 3-формувальна суміш; 4-нижня шийка прокатного валка; 5-кокіль; 6-бочка прокатного валка; 7-верхня шийка прокатного валка; 8- «закладення» - формувальна суміш в кокілі; 9-форма надливу; 10-формувальна суміш надливу; 11-надлив; 12-лійка; 13-стояк; 14-виступ калібру кокілю; 15-западина калібру кокілю; 16-кокіль з литими калібрами і вертикальним роз'ємом; 17-тангенціальний живильник

Заливання форм через сифонну литникову систему з тангенціальним підведенням живильника в нижню шийку валка (17) забезпечує інтенсивне обертання розплаву у формі і, за рахунок цього, відтиснення шлакових і неметалевих включень з робочого шару бочки в осьову зону.

Чавунний кокіль (5, 16) забезпечує інтенсивне відведення тепла при кристалізації металу в початковий період охолодження робочого шару бочки валка і формування зносостійких, але крихких цементитних структур [4]. Твердіння шийок в піщано-

глинистих [2] або в хімічно твердіючих сумішах [5] сприяє зменшенню відведення тепла. Тому в структурі утворюється незначна кількість крихкої цементитної складової, що підвищує фізико-механічні властивості і експлуатаційну стійкість валків [1].

Подальший нагрів кокілю і утворення усадкового зазору між бочкою валка і кокілем зменшує швидкість охолодження металу [2] і обумовлює формування в перехідному і осьовому шарах бочки графітових включень (рис. 2). Цим забезпечується збільшення міцності осьової зони валка.

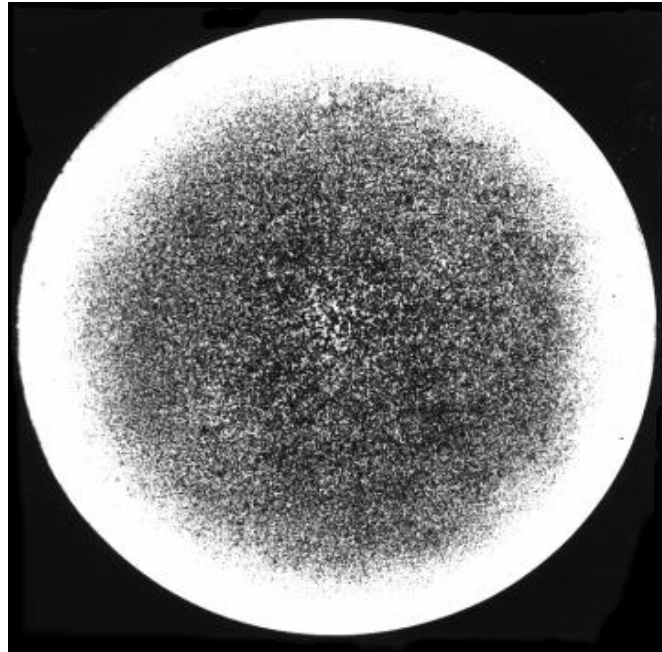


Рис. 2. Макроструктура бочки прокатного валка діаметром 431 мм з вибіленого чавуну, мас. %: C-3,75; Si-0,44; Mn-0,39; P-0,38; S-0,14; Cr-0,73; Ni-1,81; Тзал \approx 1305 °C [2]

Застосування відцентрового способу лиття валків дозволяє підвищити твердість і глибину робочого шару, міцність осьової зони, але використовують кокілі тільки з гладкою бочкою. Потім у механічному цеху на валках вирізають калібри необхідних розмірів. Для отримання виливків з високими фізико-механічними властивостями швидкість обертання рідкого металу і ливарної форми підвищують до \approx 1000 об/хв. Це вимагає наявності спеціального устаткування, строгого дотримання технологічного процесу лиття і виготовлення кокілів з точно однаковою товщиною стінки, що унеможливорює ексцентриситет при обертанні масивної системи і виготовлення кокілів з литими калібрами. Крім того, одиничне та дрібносерійне виробництво валків ускладнено тим, що навіть для одного прокатного стану розміри і твердість валків змінюються в різних клітках. Тому для валків різних мас і розмірів необхідно мати неоднакові відцентрові машини, які враховують також підвищену вібрацію через виникнення усадкового зазору між кокілем і виливком при кристалізації. Таким чином, відцентровим способом виготовляють обмежену номенклатуру, в основному,

листових валків.

Виготовлення валків для сортових станів в стаціонарних ливарних формах з гладкою бочкою (див. рис. 1а) і вирізання калібрів необхідних розмірів зменшує собівартість виробництва в ливарних цехах, але недостатня глибина робочого шару на впадинах калібрів обумовлює зменшення тривалості експлуатації таких валків [1]. Виготовлення валків в кокілях з литими калібрами дозволяє підвищити в 1,5-2 рази зносостійкість порівняно з гладколитими валками, знижується витрата металу на 15-20% і зменшується вдвічі верстатний час первинної обробки та калібрування. Крім того, підвищується тривалість безперервної роботи станів, покращується якість і точність прокату, знижується втрата сортового металу у вигляді браку при налаштуванні станів після перевалок.

Однак при виробництві сортопрокатних валків з литими калібрами спостерігається підвищення браку з макроструктури, газових раковин, гарячих тріщин та інших дефектів. Це призводить до значного підвищення собівартості валків та знижує економічний ефект, що досягається за рахунок

застосування більш зносостійких валків. Тому вдосконалення технології виробництва валків з литими калібрами для сортопрокатних станів є одним із важливих завдань вальцеливарного виробництва України.

Мета. Удосконалити технологію виробництва прокатних валків з литими калібрами і зменшити утворення поздовжніх гарячих тріщин при литті в стаціонарні ливарні форми.

Методика.

Оцінювання ефективності розроблених технологічних пропозицій проводили по розміру відбіленого шару чавуну на серійних і експериментальних прокатних валках і дослідних лабораторних виливках виконували з використанням вимірювальних пристроїв, які пройшли державний метрологічний контроль в умовах Дніпропетровського заводу

прокатних валків з участю працівників центральної заводської лабораторії і відділу технічного контролю згідно діючими технічними умовами [3].

Результати.

Чавунні валки з литими калібрами мають більшу експлуатаційну стійкість у порівнянні з валками гладко литими [1]. Обумовлено це тим, що у гладко литих валків при вирізанні калібрів зменшується товщина робочого шару на виступу калібру у порівнянні зі впадиною. Однак брак валків, які заливають у кокілі з литими калібрами (рис. 3), у два рази вищий. Так, у вальцеливарному цеху ДЗПВ допустимий відсоток браку гладко литих валків становить 7%, а для валків з литими калібрами – 14%.

Основними видами браку валків є кільцеві і поздовжні гарячі тріщини на бочках. У даній роботі розглянуто утворення поздовжніх гарячих тріщин (рис. 4) і пропонуються методи їх попередження.

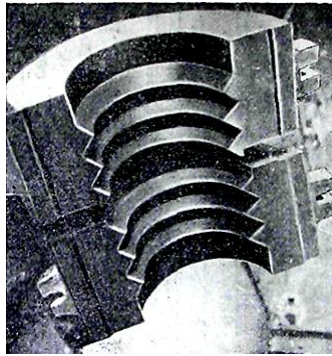


Рис. 3. Кокілі з вертикальним роз'ємом для виробництва валків з литими калібрами, які використовують на сортопрокатних станах для виготовлення кутиків

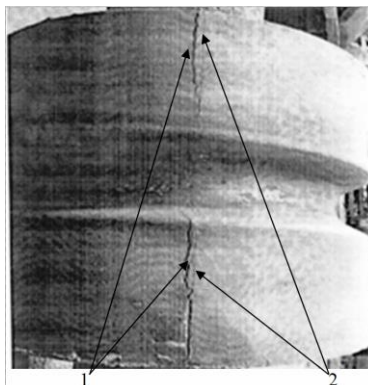


Рис. 4. Поздовжня гаряча тріщина на бочці трубопрокатного валка з литим калібром поблизу з'єднання двох полуформ кокілів: 1 – гаряча тріщина; 2 – сліди недостатньої точності з'єднання половинок кокілів

Для підвищення стійкості матеріалу виливку до утворення гарячих тріщин є рекомендації в теорії ливарних процесів [6-8]:

1. Зменшувати розмір первинного зерна вилівка, наприклад, шляхом модифікування сплаву.
2. Впливати на розплав, що кристалізується фізичними методами, наприклад, ультразвуком, електромагнітним полем і т.п.

3. Забезпечити утворення другої фази при кристалізації сплаву, яка створить додаткові центри кристалізації.

4. Підвищити міцність міжкристалічних границь за рахунок зменшення вмісту легкоплавких домішок.

5. Зменшити температурний інтервал кристалізації сплаву.

6. Вводити у розплав ультрадисперсні частинки, які є додатковими центрами кристалізації.

7. Вводити у розплав РЗМ або інші поверхнево активні елементи.

8. Прискорити твердіння сплаву у зонах утворення тріщин за рахунок збільшення тепловідведення в окремих частинах ливарної форми (встановити зовнішні холодильники, використовувати хромомагнетитові формувальні суміші і т.п.).

9. Змінити конфігурацію виливка, зменшити "гострі" кути, поставити ребра жорсткості і т.п.

Розташування гарячої тріщини в зоні вертикального роз'єму двох частин кокілів (див. рис. 4) повторюється на валках інших розмірів і форм калібрів. Тому причиною виникнення тріщини є нещільний контакт кокільних напівформ по площині роз'єму. Він виникає після 6-8 разів лиття валків в кокіль, який нагрівається до 500-600 °С і охолоджується з валком. Товщина зазору поступово збільшується від до 2-3 мм на внутрішній поверхні кокілю до 30 на зовнішній.

Тому при охолодженні валка шар закристалізованого металу в зоні вертикального роз'єму

менший, ніж на іншій поверхні кокілю. Перехід в тверду фазу супроводжується усадкою к центру валка, діаметр зменшується, виникають напруження, які реалізуються в тріщину на ділянках вилівка з меншою товщиною затверділого шару металу.

Для зменшення негативного впливу повітряного зазору і суцільності між кокільними напівформами на ДЗПВ випробовували замазку вертикальної щілини сумішшю чавунної стружки з рідким склом. Незначне зменшення браку було зафіксовано.

Тому підвищення теплоакумуючої здатності замазки розроблено склади, що складаються з латунної, бронзової та мідної стружки з розмірами частинок до 2,0 мм. В якості сполучного застосовували рідке скло.

Ефективність замазки перевіряли в лабораторних умовах при заливанні чавуну в кокілі Ø52 мм з вертикальним роз'ємом (рис. 5). Підвищена глибина відбілу на технологічній пробі біля роз'єму рекомендованою замазкою свідчить про її більшу ефективність, порівняно із замазкою на основі чавунної стружки.

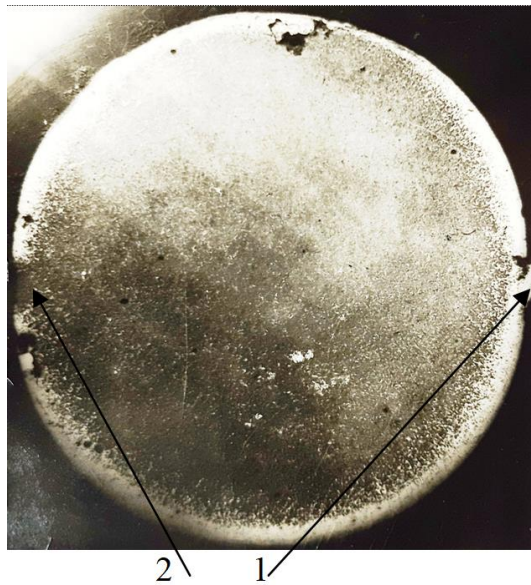


Рис. 5. Торцева поверхня виливка Ø52 мм, який охолоджувався у кокілі з вертикальним роз'ємом: 1 – відбілений шар чавуну в зоні замазки з міддю; 2 – без відбілу в зоні замазки чавунною стружкою

Тому при литті валків для зниження браку по тріщинам рекомендовано використовувати розроблені склади замазок. Причому, після нанесення замазки в зазор із внутрішньої сторони зібраних каліброваних кокілів, виконували підсушення замазки газовим пальником.

В умовах вальцеливарного цеху проводили заварку внутрішньої поверхні роз'єму профільованих кокілів мідними електродами типу 034-І. Так, кокіль № 193 з розміром внутрішнього зазору ≈2,5 мм був

заварений 10 мідними електродами діаметром 3 мм. Використовували зварювальний апарат постійного струму зворотної полярності і струмом 90-120 А.

Заливання валка в цей кокіль показало відсутність дефектів завдяки збільшенню відведення тепла в зазорі за допомогою матеріалу з більшою теплопровідністю, ніж у чавунного кокілю. Однак висока вартість мідних електродів та необхідність постійно виконувати зварювання перед заливкою

чавуну змусило використовувати більш дешеві та прості технології – замазку з відходами стружки латунної, бронзової та мідної.

Для зменшення технологічних операцій при підготовці ливарної форми було відлито кокіль із залитими по площині роз'єму його вставками з міді товщиною 3 мм. Причому форма торцевої поверхні відповідала профілю калібрів чавунного кокілю. Для кращого з'єднання з чавунним кокілем мідних вставок до них приварювали прутки Г-подібної форми Ø3 мм та висотою 25-30 мм.

Проведено три дослідні плавки та залиті три валка, призначені для прокату лемеха № 149Д. Відділ технічного контролю заводу прийняв валки без зауважень та виправлень. Випробування кокілю з мідними вставками продовжуються з метою оцінки термінів його служби та економічної ефективності впровадження в експлуатацію.

Висновки.

Основною причиною виникнення поздовжніх гарячих тріщин при литті валків з литими калібрами є нещільний контакт кокільних напівформ по площині вертикального роз'єму. Тому при охолодженні валка шар закристалізованого металу в зоні роз'єму менший, ніж на іншій поверхні кокілю. Перехід металу в тверду фазу супроводжується усадкою к центру валка, діаметр його зменшується, виникають напруження, які реалізуються в гарячу тріщину на ділянках вилівка з меншою товщиною затверділого шару металу.

Розроблено склад замазки щілини між напівформами кокілів з латунної, бронзової та мідної стружки з розмірами частинок до 2,0 мм, а в якості зв'язуючого – рідке скло.

Для збільшення швидкості відведення тепла від твердіючого металу щілину між напівформами кокілів заварювали мідними електродами. Заливання валка в цей кокіль показало відсутність дефектів завдяки збільшенню відведення тепла в зазорі міддю з більшою теплопровідністю, ніж у чавунного кокілю. Однак висока вартість мідних електродів та необхідність постійно виконувати зварювання перед заливкою чавуну змусило використовувати замазку з відходами стружки бронзи, латуні і міді.

Для зменшення технологічних операцій при підготовці ливарної форми і збільшення швидкості відведення тепла від твердіючого металу відлито кокіль із залитими по площині роз'єму постійними вставками з міді товщиною 3 мм. Причому, форма торцевої поверхні відповідала профілю калібрів чавунного кокілю. В новому кокілі відлито три валка, що призначені для прокату лемеха № 149Д. ВТК заводу прийняв валки без зауважень та виправлень. Випробування кокілю з мідними вставками продовжуються з метою оцінки термінів його служби та економічної ефективності впровадження в експлуатацію.

Слід відзначити, що використання кокілів з литими калібрами потребує значних додаткових витрат при литті кокілів і їх експлуатації, а зменшення металу на 15-20% при литті і механічному обробленні валків при калібруванні не усуває всі витрати ливарників. Економічний ефект від використання валків з литими калібрами можливо отримати тільки при їх експлуатації на прокатних станах за рахунок підвищення в 1,5-2,0 рази зносостійкості порівняно з гладколитими валками, тривалості безперервної роботи станів, покращення якості і точності прокату, зниження втрат сортового металу при налаштуванні станів після перевалок.

Перелік посилань

1. Кривошеєв А.Е. Литые валки. М.: Металлургиздат. 1957. 360 с.
2. Лейбензон В.О., Пілюшенко В.Л., Кондратенко В.М. та ін. Тверднення металів і металевих композицій. Підручник для ВУЗів. Видання друге, доопрацьоване. Київ: Наукова думка. 2009. 447 с. https://nmetau.edu.ua/file/tverdinnya_metaliv_i_metalevih_kompozitsiy_pidruchnik..pdf
3. ТУ У 28.9-00187375-106:2018. (2018). *Валки чавунні та сталеві для гарячого прокатування металів*. Дніпро: Дніпропетровський завод прокатних валків. 36 с. https://nmetau.edu.ua/file/ty_y_28.9-00187375-106-2018_rollers_cast_iron_and_steel.pdf.
4. Скобло, Т.С., Клочко, О.Ю., Белкин, Е.Л., Сидашенко, А.И. (2018). Новые подходы в изучении неоднородности гетерогенных структур. *Металлофизика. Новейшие Технологии*, 40, № 2, 255-280. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255>
5. Ponomarenko, O.; Yevtushenko, N.; Berladir, K.; Zapolovskyi, M.; Krmela, J.; Krmelová, V.; Artyukhov, A. Modeling and Optimization of Properties of the Environmentally Clean Molds Based on Oligofurfuryloxysiloxanes for the Production of the Metal Castings. *Polymers* 2022, 14, 1883. <https://doi.org/10.3390/polym14091883>
6. Vetiška A., Bradík J., Matsashek I., Slovak S. Teoretické základy slévárenské technologie. Praha. SNTL – ALFA. 1974. P. 320.
7. Репях С.И., Меняйло Е.В., Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. К вопросу образования горячих трещин в литых изделиях и сварных швах // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014.-№3. -С. 37-41. <https://www.metaljournal.com.ua/metal-gp3-2014/>
8. Yamshinskij, M., Fedorov, G., Verkhovliuk, A. (2016)/ The development of new casting alloys intended for operation under extreme conditions and some techniques of making castings from them. *«EUREKA: Physical Sciences and Engineering»*, №2(3), 51-60. <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/33-175-1-pb.pdf>. (Scopus).
9. Fesenko, E.V., Mogylyatenko, V.G., Fesenko, A.N., Kosyachkov, V.A., Fesenko, M.A. (2015). Manufacture of two-layers and double-sided iron castings with differential structure and properties. *«EUREKA: Physical Sciences and Engineering»*, №1, 55-59. https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/maksym_fesenko.pdf.

References

1. Krivosheev, A. E. (1957). *Cast rolls*. Metallurgizdat
2. Leibenzon, V. O., Pilyushenko, V. L., Kondratenko, V. M., et al. (2009). *Hardening of metals and metal compositions*. Textbook for universities. The 2-nd edition. Scientific opinion. https://nmetau.edu.ua/file/tverdinnya_metaliv_i_metalevih_kompozitsiy_pidruchnik.pdf
3. TU U 28.9-00187375-106:2018. (2018). Cast iron and steel rolls for hot rolling of metals. Dnipropetrovsk Rolling Mill Plant. https://nmetau.edu.ua/file/ty_y_28.9-00187375-106-2018_rollers_cast_iron_and_steel.pdf
4. Skoblo, T. S., Klochko, O. Iu., Belkyn, E. L., & Sydashenko, A. Y. (2018). Novye podkhody v izuchenii neodnorodnosti geterogennykh struktur. *Metallofizika. Noveishie Tekhnologii*, 40(2) 255-280. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255>
5. Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Berladir, K., Zapolovskyi, M., Krmela, J., Krmelová, V., & Artyukhov, A. (1983). Modeling and Optimization of Properties of the Environmentally Clean Molds Based on Oligofurfuryloxysiloxanes for the Production the Metal Castings. *Polymers*, 14, 1883. <https://doi.org/10.3390/polym14091883>
6. Vetiška, A., Bradik, J., Matsashek, I., & Slovak, S. (1974). *Teoretické základy slévárenské technologie*. Praha. SNTL – ALFA
7. Repyakh, S. Y., Menyailo, E. V., Proydak, Yu. S., Khrychikov, V. E. (2014). To the question of the formation of hot cracks in cast products and welds. *Metallurgical and mining industry*, (3), 37-41. <https://www.metaljournal.com.ua/metal-gp3-2014/>
8. Yamshinskij, M., Fedorov, G., & Verkhovliuk, A. (2016). The development of new casting alloys intended for operation under extreme conditions and some techniques of making castings from them. *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*, (2(3)), 51-60. <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/33-175-1-pb.pdf>
9. Fesenko, E. V., Mogylatenko, V. G., Fesenko, A. N., Kosyachkov, V. A., Fesenko, M. A. (2015). Manufacture of two-layers and double-sided iron castings with differential structure and properties *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*, (1), 55-59. https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/maksym_fesenko.pdf

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 26.08.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.11.2024