Т.В. Лисенко¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: tvl12odessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3183-963X>**Д.С. Васильєв**¹, аспірант, e-mail: d0505909366@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3660-1628>**О.М. Смірнов**², д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of Science ResearcherID: N-1890-2017¹Державний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Знос гільзи кристалізатора в процесі експлуатації на виробництві

У цій роботі представлено результати дослідження пошкоджуваності і зносу гільз кристалізаторів сортової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при литті в промислових умовах. Як правило, знос виникає в нижній частині широкої стінки в місцях, найбільш віддалених від кутів.

Кількість сталі, яку розливають через гільзу кристалізатора, неминуче накладає на нього інтенсивний тепловий і механічний вплив. І поступово геометрія її внутрішньої робочої поверхні змінюється, внаслідок чого погіршується якість безперервнолитої заготовки, і після певного числа плавок гільзу доводиться виводити з експлуатації. Причини виходу гільзи з ладу можуть бути різними і залежати від ряду факторів.

Авторами статті було випробувано кілька типів гільз кристалізаторів з різною геометрією робочої порожнини. Всі гільзи розділили на 3 групи і вивчали зміни геометричних розмірів і викривлення стінок гільз. З метою об'єктивізації використовували вимірювальну систему MCS-3000.

У підсумку все гільзи були зняті через появу дефектів, що роблять неможливим їх подальшу повноцінну експлуатацію, а значні відмінності в стійкості дозволили простежити динаміку їх пошкоджуваності і отримати дані про різні види пошкоджень.

Результати досліджень показали, що однією з причин виникнення ділянок ерозій є недостатня міцність зчеплення хромистого покриття з мідною основою. Ділянки ерозійного руйнування пов'язані з глибокими ризиками, які проходять глибоко через покриття і основний матеріал гільзи. Так само з порушеннями технології можна пов'язати появу глибоких раковин з рваними краями, близьких за формою до кола.

У свою чергу при використанні багатощарової гільзи виробництва фірми «Kobelco» з рівномірним зносом кутових областей в гільзі автори статті не спостерігали знос на гранях гільзи.

Ці гільзи експлуатувалися без видимих порушень технологічного процесу безперервного лиття і показали очікувано високу стійкість.

Таким чином, зроблено висновок, що при дотриманні технології можна значно підвищити ресурс гільз. І також, крім безпосередньо технологічного процесу, велику роль відіграє персонал, від недбалості якого також залежить термін служби гільз.

Ключові слова: сортова машина безперервного розливання сталі, кристалізатор, математичне моделювання, гільзи кристалізатора.

Гільза кристалізатора – порожниста товстостінна мідна труба квадратного або круглого перетину, яка використовується при безперервному розливанні сталі в якості ємності для прийому рідкого металу, а також формування твердої скоринки внаслідок інтенсивного відводу тепла через стінки гільзи [1]. Сталь розливають через гільзу кристалізатора і надають на неї інтенсивний тепловий і механічний вплив. Поступово геометрія її внутрішньої робочої поверхні змінюється, погіршується якість безперервнолитої заготовки, і після певного числа плавок гільзу виводять з експлуатації. Причини виходу гільзи з ладу можуть бути різними і залежати від ряду факторів. Наприклад, для слябових МБЛЗ (перетин заготовки 175 × 1020 мм) в роботі [2] вказують наступні основні причини виходу з ладу кристалізаторів: стирання

міді, тріщини на робочій поверхні мідних облицювань, викривлення кристалізаторів і випадкові причини, пов'язані з недбалістю в роботі персоналу, обслуговуючого МБЛЗ. Автори відзначають значне стирання міді в нижній частині слябових кристалізаторів, що стосується кристалізаторів сортових МБЛЗ, та при розливанні квадратної заготовки відзначено, що в першу чергу зношувалося зносостійке покриття в кутових областях гільз.

В роботі [3] аналогічно йдеться про те, що основним видом руйнування слябових кристалізаторів (250 × 1500 мм) вважають знос в нижній частині широкої стінки в місцях, найбільш віддалених від кутів.

Необхідно відзначити, що кристалізатори сортових МБЛЗ принципово відрізняються від слябових геометрією, умовами охолодження і мастила, швид-

Рис. 1. Зліва – партія досліджуваних гільз виробництва фірми «Kobelco» з шорсткою зовнішньою поверхнею, яка застосовується для збільшення тепловідведення від стінок гільзи; праворуч – порівняльна партія гільз виробництва фірми «ЕМ» з шліфованою зовнішньою поверхнею

Рис. 2. Вимірвальна система MCS-3000 виробництва фірми «CONCAST»

Таблиця 1

Технологічні характеристики досліджуваних гільз

Фірма-виробник гільзи	Технічні характеристики мідних гільз				
	Матеріал	Конусність	Тип і товщина покриття, мкм	Конусність, (%/м)	
				Рад. гр.	Пар. гр.
«КМЕ», Німеччина	Cu – Ag	параболічна	Cr (120)	0,87	0,88
«ЕМ», Італія	Cu – Ag	4-х конусна	Cr (120)	0,99	1,0
«ВНИИМЕТМАШ», Росія	Cu DHP	3-х конусна	Cr (120–160)	2,36	1,42
«Kobelco», Японія	Cu – Ag	параболічна (e-mould)	Cr (70)	0,89	0,88
«Kobelco», Японія	Cu – Ag	параболічна (e-mould)	Ni + P – Co – Cr (70)	0,89	0,88

костями розливання, що змінює деформаційно-напружений стан і впливає на характер руйнування покриття і основного матеріалу гільзи.

Вплив зносу на руйнування гільз сортових кристалізаторів також має велике значення.

Характер зносу і деформації поверхні в сортових кристалізаторах залежить від конструкції гільзи і умов її охолодження. Промислові випробування гільз («квадрат 120 мм») з одношаровим хромистим і тришаровим покриттям показали, що вдосконаленням технології нанесення покриття, вибором профілю і конусності гільзи можна знизити термічні деформації гільзи в зоні меніска і зменшити стирання покриття.

Підвищення швидкості розливання інтенсифікує тепловий потік і збільшує деформацію профілю гільзи. У цих умовах не тільки прискорюються процеси зносу, але і можуть проявлятися дефекти виготовлення гільзи, нанесення покриття, які не виявляються при низьких швидкостях розливання. Дослідження та узагальнення даних з руйнування кристалізаторів в умовах інтенсивної експлуатації дозволяють вибрати оптимальні технології їх виготовлення, а також виявити фактори, що впливають на руйнування, що дозво-

лить підвищити продуктивність машин безперервного лиття.

У даній роботі досліджували ушкоджувальність гільз кристалізаторів сортової МБЛЗ при литті в промислових умовах заготовок «квадрат 120 мм». Більшість параметрів безперервного лиття (марка сталі, температура розливання, витрата охолоджуючої води та ін.) змінювалися в усіх досліджених плівках незначно. Швидкість розливання для гільз перетином 120 мм² становила в середньому близько 3,7 м/хв, на окремих плавках досягала 4,5 і більше м/хв.

Було випробувано кілька типів гільз кристалізаторів з різною геометрією робочої порожнини. За формою профілю гільзи розділили на три групи:

1) гільзи з багатоступеневою параболічною конусністю виробництва фірм «КМЕ» і «ЕМ»;

2) гільзи виробництва АХК «ВНИИМЕТМАШ», в яких використовується принцип компенсації усадки опуклої твердої скоринки шляхом її поступового випрямлення;

3) гільзи виробництва фірми «Kobelco» з удосконаленою параболічною конусністю (тип профілю – «e-mould»), що дозволяє мінімізувати величину газо-

Стійкість досліджених гільз

Фірма-виробник гільз (кількість, шт.)	Стійкість гільз, плавов, середня (мінімум-максимум)
«КМЕ», Німеччина (12)	215 (16–351)
«ЕМ», Італія (23)	220 (97–460)
«ВНИИМЕТМАШ», Росія (32)	210 (61–420)
«Kobelco», Японія, одношарове покриття (22)	270 (48–540)
«Kobelco», Японія, багатошарове покриття (6)	670 (519–909)

вого зазору між безперервнолитою заготовкою і стінкою мідної гільзи, і шорсткою зовнішньою водоохолоджуваною поверхнею (рис. 1).

Деякі технологічні характеристики досліджуваних гільз наведено в табл. 1. Всі гільзи, зазначені в таблиці, мали довжину 1000 мм, при цьому їх ефективна довжина становила 876 мм, базовий радіус МБЛЗ – 7 м. Стійкість досліджених гільз змінювалася в широких межах (табл. 2, дані за 2005 р.).

Зміна геометричних розмірів і викривлення стінок гільз кристалізаторів вивчали за допомогою вимірювальної системи MCS-3000, представленої на рис. 2. Всі гільзи були зняті через появу дефектів, що роблять неможливим їх подальшу нормальну експлуатацію. Відмінності в конструкції, геометрії гільз, значні відмінності в стійкості дозволили простежити динаміку їх пошкоджуваності і отримати дані про різні види ушкоджень робочої порожнини.

Система складається з ноутбука 1, вимірювальної головки 2, колони 3, руківки 4, контрольного калібру

Рис. 3. Самопозиціонує датчик

Рис. 4. Заклад затравки без захисного ковпака оператором МБЛЗ

5, кабелю 6. Геометричні розміри гільзи кристалізатора визначаються за допомогою самопозиціонуючих датчиків (рис. 3), закріплених в вимірювальній голівці, сигнали від яких надходять в ноутбук, потім трансформуються в читабельний для комп'ютера вид і виводяться на монітор у вигляді графіка або таблиці, що відображають стан профілю мідної гільзи. Розміри заміряються за близькістю кутів і, одночасно, на центральних лініях гільзи за радіальними і паралельними гранями.

Найменшу стійкість показали гільзи, пошкодження яких пов'язане з помилками в роботі персоналу, що обслуговує МБЛЗ. Очевидно, що такі дефекти можуть виникати в будь-якому місці гільзи і не залежать від конструкції і фірми-виробника.

Рис. 5. Утискання гільзи в нижній частині за радіальними і паралельними гранями

Рис. 6. Руйнування хромистого покриття гільзи

Наприклад, заклад затравки без захисного ковпака оператором МБЛЗ призвело для профілю гільзи виробництва «КМЕ» до значної (понад 0,5 мм) деформації за радіальними гранями на рівні 850 мм від верхнього торця гільзи (рис. 4), і гільза була виведена з експлуатації після 16 плавов.

Зменшення геометричних розмірів гільзи понад 0,1 мм з рівня від 850 мм до 1000 мм від верхнього торця гільзи – дефект «затяжки» (рис. 5), який виходить з-за підтискання гільзи нижньою кришкою кристалізатора з ущільненням при великій конусності гільзи на цій ділянці або при жорсткій її фіксації в обичайці центруючими гвинтами. Ці дефекти фіксуються тільки при контролі профілю вимірювальною системою і практично не видимі при візуальному огляді. Гільза виробництва «ЕМ» була виведена з експлуатації з таким дефектом після 7 плавов як така, що втратила геометричний профіль.

У гільзах, які показали більш високу стійкість, починають проявлятися дефекти покриття. В цьому випадку пошкодження розвиваються в зоні трохи нижче меніска, температура нагріву і, відповідно, температурні напруги і деформації максимальні.

На рис. 6 показана внутрішня робоча поверхня гільзи виробництва «КМЕ» після 123 плавов. Видно, що хромисте покриття світле, без видимих слідів окислення, але в районі максимального термічного навантаження виявляється ряд дефектів.

Кутовий знос ще практично відсутній, в покритті з'являються відносно короткі ділянки зносу нерівномірної ширини, що виникають в кутах гільзи приблизно на 5–7 см нижче лінії меніска (поз. 1). Можна відзначити несиметричність появи цих ділянок щодо граней гільзи.

Приблизно на рівні меніска і трохи нижче його сформувався ряд коротких тріщин в покритті. Видно дві системи таких тріщин: в першій (поз. 2) тріщини йдуть до тієї, що утворює стінки гільзи, у другій (поз. 3) – за довжиною гільзи. Ці тріщини відрізняються характером розвитку, але вірогідною причиною їх появи можна вважати термічні деформації стінки, величина яких різна в поздовжньому і поперечному напрямках.

На поверхні покриття виникають досить протяжні (діаметром близько 50–60 мм) ділянки руйнування

Рис. 7. Руйнування покриття в ділянках ерозії

покриття (поз. 4) і смуги каплевидних раковин (довжиною від 5 до 10 мм, глибиною від 1 до 2 мм), витягнуті у напрямку руху БЛЗ. Аналогічні ділянки, але в меншій кількості, спостерігали також і в гільзах виробництва «ВНИИМЕТМАШ» (стійкість – 87 плавов). У цих зонах покриття стончується поступово, ділянками (рис. 7). Межі ділянок зглажені, і на далеких стадіях руйнування велика частина покриття оголюється до мідної основи, але в окремих місцях ще зберігаються фрагменти хромистого покриття. З урахуванням поступового характеру розвитку ці ділянки можна трактувати як зони ерозійного руйнування.

Металографічні дослідження показали, що однією з причин їх виникнення є недостатня міцність зчеплення хромистого покриття з мідною основою [4]. Велика і нерівномірна товщина покриття провокує утворення значних напружень і порушення контакту на кордоні розділу мідь-хром, що зі свого боку викликає нерівномірність тепловідведення і перегрів з розчиненням і випаровуванням покриття. Наприклад, в гільзах «КМЕ», в яких виникали ділянки ерозійного руйнування, товщина покриття змінювалася від 150 до 200 мкм (1,8–2,5 % від товщини мідної стінки гільзи). Ці дефекти не виявлялися в гільзах виробництва «Kobelco» (Японія) з товщиною покриття менше 100 мкм.

Ділянки ерозійного руйнування спричиняють глибокі ризики, які проходять глибоко через покриття і основний матеріал гільзи. Вони виникали в районі підведення струменя і поширювалися вниз у напрямку руху заготовки. Можлива причина їх появи – застигли краплі сталі на поверхні заготовки, які надають абразивну дію на поверхню кристалізатора. При низькій міцності зчеплення покриття та міді абразивні частинки прорізають покриття, викликаючи в ньому відколи, а при виході на міцне покриття частка відвалюється або стирається, і ризик зникає (твердість хрому помітно вище твердості сталі). Якщо така частка відразу потрапляє на якісне покриття, при її русі створюються послідовні зони розтягування – стиснення, але крихкого руйнування покриття не відбувається.

Ці ризики помітно відрізняються від відносно неглибоких (від 1 до 2 мм глибиною) і більш довгих ра-

Рис. 8. Руйнування покриття через збої в роботі механізму хитання кристалізатора

ковин і задирок, що виникають на робочій поверхні гільзи внаслідок абразивної або ріжучої дії клиновидними язиками «поясів» безперервнолитої заготовки, а також збоями в роботі механізму хитання кристалізатора (рис. 8). Як видно, в цьому випадку ризики виникають на більшій відстані від меніска і представляють систему великої кількості паралельних ліній. Наведена на рис. 8 гільза виробництва ВНИИМЕТМАШ була знята після 187 плавок, утворення такого дефекту швидше пов'язане з недбалістю персоналу, ніж з якістю гільзи.

Так само з порушеннями технології можна пов'язати появу глибоких раковин з рваними краями, близькими за формою до кола (від 5 до 8 мм глибиною, в діаметрі від 10 до 15 мм). Вони виникали в білякутових областях і на гранях робочої поверхні гільзи в результаті частих перековшовок проміжними

Рис. 9. Раковини з рваними краями (пошкодження при перековшовках ПК)

ковшами (ПК) на МБЛЗ, при яких сильно охолоджений в кристалізаторі злиток в результаті свого поступального руху вниз ушкоджував зносостійке покриття в місцях зіткнення зі стінками гільзи, а разом з ним і матеріал гільзи (рис. 9, стійкість гільзи виробництва «ЕМ» 261 плавка). І в цьому випадку пошкодження гільзи меншою мірою пов'язано з якістю покриття і виготовлення гільзи і вимагає більш суворого дотримання технології безперервного лиття.

Висновки

Таким чином, можна зробити висновок, що при дотриманні технології, можна значно підвищити ресурс гільз. Крім технологічного процесу, велику роль відіграє персонал, від недбалості якого також залежить термін служби гільз.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ганкин В.Б., Спивак Б.А., Николаев Г.И. и др. Гильзовые кристаллизаторы высокоскоростных сортовых МНЛЗ. *Тяжелое машиностроение*. 1997. № 5. С. 19–22.
2. Данилов В.Л., Зарубин С.В., Сивак Б.А. и др. Взаимодействие слитка с кристаллизатором при непрерывном литье тонких слэбов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1997. № 6. С. 11–13.
3. Ботников С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. 2-е издание. Волгоград, 2011. 97 с.
4. Смирнов А.Н., Подкорытов А.Л., Турунов Д.Н. Модернизация высокопроизводительных сортовых МНЛЗ с целью повышения экспортного потенциала металлопродукции. Труды XI конгресса сталеплавильщиков. 3–8 октября 2010, г. Нижний Тагил. М.: Черметинформация, 2011. С. 452–457.

Надійшла 23.07.2021

REFERENCES

1. Gankin, V.B., Spivak, B.A., Nikolaev, G.I. et al. (1997). Sleeve molds for high-speed section CCM. *Heavy mechanical engineering*, no. 5, pp. 19–22 [in Russian].
2. Danilov, V.L., Zarubin, S.V., Sivak, B.A. et al. (1997). Interaction of an ingot with a crystallizer during continuous casting of thin slabs. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, no. 6, pp. 11–13 [in Russian].

3. Botnikov, S.A. (2011). A modern atlas of defects in a continuously cast billet and the causes of breakthroughs in the crystallizing metal crust. 2nd edition. Volgograd, 97 p. [in Russian].
4. Smirnov, A.N., Podkorytov, A.L., Turunov, D.N. (2011). Modernization of high-performance section CCMs in order to increase the export potential of metal products. Proceedings of the XI Congress of Steel Smelters. October 3–8, 2010, Nizhny Tagil. Moscow: Chermetinformatiya, pp. 452–457 [in Russian].

Received 23.07.2021

Summary

T.V. Lysenko¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department,
e-mail: tvl12odessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3183-963X>

D.S. Vasylyev¹, graduate student, e-mail: d0505909366@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-3660-1628>

O.M. Smirnov², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department,
e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of
Science ResearcherID: N-1890-2017

¹*Odessa Polytechnic State University (Odessa, Ukraine)*

²*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)*

Wear of the mold sleeve during operation in production

This paper presents the results of a study of the damageability and wear of mold sleeves of a section continuous casting machine (CCM) when casting in an industrial environment. Typically, wear occurs at the bottom of the wide wall at the farthest from the corners.

The amount of steel poured through the mold liner inevitably has an intense thermal and mechanical effect on it. And gradually the geometry of its inner working surface changes, as a result of which the quality of the continuously cast billet deteriorates and after a certain number of melts the sleeve has to be taken out of service. The reasons for the failure of a liner can be different and depend on a number of factors.

The authors of this article have tested several types of mold sleeves with different geometry of the working cavity. All sleeves were divided into 3 groups and the change in geometric dimensions and warpage of the sleeve walls were studied. For the purpose of objectification, the measuring system MCS-3000 was used.

As a result, all the liners were removed due to the appearance of defects that made their further full-fledged operation impossible, and significant differences in durability made it possible to trace the dynamics of their damageability and obtain data on various types of damage.

The research results showed that one of the reasons for the occurrence of areas of erosion is the insufficient adhesion strength of the chrome coating to the copper base. The areas of erosional destruction are associated with deep risks that penetrate deeply through the coating and the base material of the liner. It is also possible to associate the appearance of deep shells with ragged edges, close in shape to a circle, with violations of technology.

In turn, when using a multilayer sleeve manufactured by "Kobelco", the durability of 780 heats, with uniform wear of the corner regions in the sleeve, authors of the article did not observe wear on the edges of the sleeve.

These sleeves were operated without visible disturbances in the continuous casting process and showed an expected high durability.

Thus, it was concluded that, subject to the technology, it is possible to significantly increase the resource of the liners. And also, in addition to the direct technological process, the personnel play an important role, on whose negligence the service life of the liners also depends.

Keywords

Billet continuous casting machine, mold, mathematical modeling, mold sleeves.