ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 67.05

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-32-38

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА
В ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ВАННЕ
НА ОДНОРОДНОСТЬ НАНОСИМОГО ПОКРЫТИЯ**Шеркунов В.Г.¹, Редников С.Н.¹, Власов А.Е.¹, Тезе П.²¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия² SMS Siemag, Хильхенбах – Дальбрух, Германия**Аннотация**

Актуальность: в настоящее время непрерывная разливка стали на установках МНЛЗ является самым эффективным и экономическим методом получения заготовок. Кристаллизатор является одним из самых важных и наиболее уязвимым элементом такой машины. Чтобы увеличить время его эксплуатации, на рабочую поверхность кристаллизатора наносят специальные защитные покрытия. Самым распространенным методом нанесения покрытий является гальваностегия. Это объясняется высокой продуктивностью процесса, его экономичностью и хорошим качеством. Также гальваностегия позволяет наносить практически все металлы. Несмотря на большой опыт и высокий уровень развития данной технологии, гальваническим покрытиям свойственны некоторые виды дефектов. Эти дефекты значительно снижают качество и эксплуатационный срок МНЛЗ. Разработка эффективных методов повышения качества наносимых защитных гальванических покрытий является актуальной задачей для увеличения качества работы и эксплуатационного срока кристаллизатора МНЛЗ. **Целью** работы является оптимизация потоков электролита в гальванической ванне с целью повышения износостойкости медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. **Используемые методы:** в работе применялось математическое моделирование динамики движения электролита в ванне по средствам программы Solid Works расчетного пакета CosmosFloWorks. При экспериментальном исследовании был проведен натуральный эксперимент на производственной установке для нанесения гальванических покрытий. **Научной новизной** данной работы является разработка оригинальной методики расчета динамики движения электролита в гальванической ванне, а также мероприятий по увеличению качества наносимых гальванических покрытий. **Практическая значимость:** проведенные математические и экспериментальные исследования позволили получить более износостойкое защитное гальваническое покрытие. Предложенные мероприятия и методика расчета позволят увеличить эксплуатационный срок работы кристаллизатора МНЛЗ за счет улучшения технологических характеристик защитного покрытия.

Ключевые слова: МНЛЗ, кристаллизатор, гальваническое осаждение, дефект разнотвердости.

Введение

На сегодняшний день более 70% всей стали, которая выплавляется в мире, разливается с использованием МНЛЗ (машина непрерывного литья заготовок) [1].

Продуктивность МНЛЗ определяется максимальным числом плавов при серийной разливке стали, которое, в свою очередь, зависит от качества работы кристаллизатора, технологическое назначение которого – отвод тепла от остывающей заготовки, формирование корки сплава и профиля получаемого полуфабриката. Традиционно кристаллизатор МНЛЗ изготавливается из

меди и выполняется в виде гильзы или конструкции, состоящей из четырех стенок. Кристаллизатор является одним из основных и наиболее уязвимых технологических узлов такой машины. Чтобы увеличить эксплуатационный срок кристаллизаторов, на их рабочую поверхность наносят специальные упрочняющие защитные покрытия [2].

Самым распространенным методом нанесения и восстановления защитного слоя является гальваностегия. Однако, несмотря на многолетний опыт и высокий уровень развития гальванического производства, защитным покрытиям плит кристаллизаторов характерны некоторые виды дефектов, которые, в свою очередь, существенно снижают продуктивность работы МНЛЗ.

Использование поперечного сегмента перелива

В настоящее время на территории Челябинска организовано совместное российско-немецкое предприятие «SMS Cheltec». Оно осуществляет нанесение защитных гальванических покрытий на стенки кристаллизаторов МНЛЗ.

Одним из видов наносимых покрытий является H-VHN (сплав никеля и кобальта), предназначенное для защиты широких стен кристаллизатора МНЛЗ №6 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) [3].

Несмотря на высокий уровень технологии, используемой на предприятии «SMS Cheltec», она не лишена недостатков, а именно разнотвердости защитного слоя не только в вертикальном направлении (задается технологическими параметрами: применение ступенчатого перелива), но и в горизонтальном.

Для исследования характера распространения данного вида дефекта готовую, прошедшую процесс гальванического восстановления, плиту, которая подверглась завершающей механической обработке, разделили координатной сеткой на мерные прямоугольные участки размером 300×100 мм, в которых была измерена средняя величина твердости покрытия по пяти замерам. Результаты представляют из себя карту твердостей полученного покрытия, которая представлена в **табл. 1**.

Таблица 1
Карта твердостей № 1 никель-кобальтового покрытия

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a	205	271	285	289	274	277	283	280	273	263
b	277	285	271	282	289	293	286	274	285	269
c	268	282	275	254	286	304	258	268	281	271
d	271	254	247	269	284	287	282	243	251	267
e	265	263	278	281	289	294	283	238	265	256
f	251	266	231	289	296	305	287	235	264	249
g	283	301	316	316	321	290	300	292	296	292
h	353	364	432	440	437	441	436	359	348	443
i	473	406	482	482	483	495	526	553	503	528

Для улучшения визуализации карты твердостей представим ее в графическом виде (**рис. 1**).

Все значения твердости, представленные на карте твердостей, приведены по Виккерсу (HV). Карта твердостей №1 наглядно демонстрирует

характер распространения дефекта разнотвердости по площади покрытия. Зоны пониженной твердости концентрируются в двух областях, равноудаленных от центра на расстояние порядка 400–450 мм, в зоне мениска. На **рис. 1** эти зоны выделены пунктирной линией.

Данный вид дефекта разнотвердости характерен для всех покрытий плит кристаллизатора МНЛЗ №6 ММК, наносимых на «SMS Cheltec».

Исследования особенностей процесса гальванического нанесения защитных никель-кобальтовых покрытий определили, что дефект разнотвердости гальванического слоя может возникать только по трем причинам [4–6]:

- некачественная предварительная подготовка поверхности плиты перед нанесением;
- высокое содержание железа в воде, используемой в техпроцессе;
- слабое перемешивание (барбатирование) рабочей жидкости, возникновение слоев застойного, слабо обновляемого электролита в зоне его контакта с поверхностью плиты.

На предприятии «SMS Cheltec» ведется качественная, тщательная предварительная механическая и химическая подготовка поверхности плиты с соблюдением всех правил и норм процесса. А также осуществляется непрерывный контроль состава электролита и наличия в нем посторонних примесей автоматическими спектрометрами.

Исходя из этих условий, становится логичным, что вероятной причиной возникновения дефекта разнотвердости никель-кобальтового защитного покрытия является слабое перемешивание электролита и возникновение застойных слоев в зоне контакта с плитой. В случае ванны, используемой на предприятии «SMS Cheltec» для покрытия широких плит кристаллизаторов, перемешивание электролита осуществляется посредством циркуляции самой рабочей жидкости вдоль поверхности плиты.

Для проверки предположения, что причиной разнотвердости является слабое перемешивание рабочей жидкости, было проведено математическое моделирование трехмерного течения электролита в ванне и его визуализация в виде компьютерной графики.

Схема гальванической ванны изображена на **рис. 2**.

Рис. 1. Графическая карта твердостей №1

Рис. 2. Схема гальванической ванны по технологии «в коробе»: 1 – анодная штанга; 2 – анод; 3 – труба перелива; 4 – покрываемая медная плита (широкая стенка ванны); 5 – спрей электролита; 6 – боковая стенка ванны (не покрывается); 7 – основание гальванической ванны

Для математического моделирования была построена объемная 3D модель ванны компании «SMS Cheltec» в рабочем поле программы «SolidWorks». В этой ванне производился расчет трехмерного течения рабочей жидкости посредством расчетного пакета «CosmosFloWorks». Данное моделирование позволяет рассчитывать динамические характеристики и особенности течения в условиях сложного обтекания [7]. Результатом такого моделирования стала трехмерная модель динамики течения жидкости, ее траектории и скорости (рис. 3).

Линиями обозначены траектории движения потоков, а цвет характеризует их скорость. Для того чтобы проанализировать, как электролит движется в зоне контакта с плитой, а также проверить наличие застойных областей рабочей жидкости, из трехмерной модели траектории движения потоков была сделана двумерная карта скоростей течения электролита в зоне контакта с поверхностью покрываемой плиты (рис. 4).

Карта скоростей течений рабочей жидкости в зоне ее контакта с плитой наглядно демонстрирует, что два осесимметричных завихрения потоков электролита приводят к образованию двух слабо обновляемых равноудаленных от центра областей, которые отмечены на рис. 3 пунктирной линией. В этих зонах меньше линий траекторий течения жидкости, что свидетельствует о малой концентрации обновляемых потоков, а темный цвет в этих областях говорит о том, что скорость течения электролита в них принимает минимальные значения. Периферийные боковые области также характеризуются слабой концентрацией потоков с низкими скоростями течения жидкости, что теоретически может отразиться на твердости наносимого покрытия.

Для анализа полученных результатов математической модели сравним теоретическое поле скоростей течения электролита (см. рис. 4) с картой твердостей готового никель-кобальтового покрытия, замеренной на предприятии «SMS Cheltec» (рис. 5).

Рис. 3. Трехмерная модель течения рабочей жидкости

Рис. 4. Поле скоростей электролита

Рис. 5. Сравнение карты твердостей и поля скоростей

Сравнение замеренной карты твердостей никель-кобальтового покрытия с теоретическим полем скоростей течения электролита в зоне его контакта с плитой позволяет заключить следующее:

- Осесимметричные зоны пониженного значения твердости HV на карте твердостей совпадают с теоретическими зонами слабо обновляемого электролита на поле скоростей математической модели.

- Периферийным областям плиты, где раньше также отмечались малые скорости потоков и слабая их концентрация, соответствуют зоны пониженной твердости никель-кобальтового покрытия.

- В осевой зоне, где на поле скоростей обозначены максимальные концентрация и скорости потоков, на карте твердостей зафиксированы повышенные значения твердости.

Сравнительный анализ показал, что теорети-

ческие зоны застойного и слабо обновляемого электролита полностью совпадают с зонами пониженной твердости покрытия. Эти выводы позволяют заключить, что предположение о влиянии качества перемешивания электролита в зоне его контакта с плитой на возникновение и развитие дефекта разнотвердости является верным.

Для устранения дефекта разнотвердости были разработаны мероприятия по изменению динамики течения рабочей жидкости с целью увеличения интенсивности обновления электролита в контактной зоне. Самым простым методом является изменение внутренней геометрии ванны. Установка дополнительных элементов в рабочей области ванны позволяет изменить динамику течения рабочей жидкости. Основное условие такого метода – добавочные элементы не должны влиять на сам процесс нанесения покрытия.

Конструкция ванн компании «SMS Cheltec» такова, что забор электролита осуществляется только в одной точке, через вертикальную трубу перелива, установленную в центре основания ванны (см. **рис. 2**). Это объясняет большую концентрацию и высокую скорость потоков в осевой зоне и обратный эффект на периферийных областях. Чтобы изменить динамику движения электролита в контактной зоне, на вертикальную трубу перелива установили поперечный горизонтальный сегмент (**рис. 6**).

Такая конструкция поперечного сегмента позволит лучше распределить потоки электролита, уходящие на слив, вдоль длины ванны, заменяя одну точку забора рабочей жидкости на четыре, равноудаленных от центра.

Для проверки этого предположения был произведен новый расчет на основании имеющейся классической модели с учетом поперечного сегмента. Полученное в результате моделирования новое поле скоростей электро-

лита представлено на **рис. 7**.

Проанализировав полученные данные, можно заключить, что использование поперечного сегмента трубы перелива благоприятно сказывается на динамике потоков рабочей жидкости в контактной зоне, существенно увеличивая интенсивность обновления электролита.

Для проверки этого предположения на предприятии «SMS Cheltec» был проведен эксперимент с использованием поперечного элемента перелива при реальном процессе покрытия широких стенок кристаллизатора МНЛЗ №6 ММК. Материалом для поперечного сегмента был выбран ПВХ (поливинилхлорид).

Результатом данного эксперимента является карта твердостей готового никель-кобальтового покрытия, представленная в **табл. 2**.

Для анализа проделанного эксперимента сравним карты твердостей и поля скоростей классической схемы и схемы с использованием поперечного сегмента (**рис. 8**).

Рис. 6. Поперечный горизонтальный сегмент перелива

Рис. 7. Поле скоростей ванны с поперечным сегментом (l=1000 мм)

Таблица 2
Карта твердостей № 2 никель-кобальтового покрытия с использованием поперечного сегмента l=1000 мм

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a	299	301	305	307	304	302	309	305	302	296
b	293	297	298	303	311	309	305	294	291	298
c	289	292	294	278	305	303	273	277	287	294
d	293	302	306	311	321	318	313	310	305	295
e	284	298	301	307	315	313	310	294	291	283
f	289	294	298	304	308	310	306	300	296	292
g	371	373	369	371	359	344	364	373	356	367
h	427	412	429	457	442	432	443	431	405	416
i	568	570	553	557	544	543	527	549	567	571

Рис. 8. Сравнительный анализ

Проделанный эксперимент позволяет сделать следующие выводы:

- Предположение о влиянии динамики движения потоков электролита на качество и однородность получаемого защитного слоя подтвердилось на практике.

- Теоретические данные, полученные в результате математического моделирования процесса с применением поперечного сегмента перелива, а также сделанные на основе расчетов предположения подтвердились экспериментальным путем.

- Использование поперечного сегмента $l=1000$ мм снизило присутствие данного дефекта на 55 % в горизонтальных плоскостях и почти на 60% в вертикальных.

В целом проведенный на предприятии «SMS Cheltec» эксперимент с поперечным сегментом перелива дал очень хороший положительный результат. Новая карта твердостей покрытия отличаются от классической своей однородностью, пониженной амплитудой колебания значений HV, а также средним увеличением этих значений твердости по всей площади покрытия.

Покрывтия медных плит кристаллизаторов МНЛЗ №6 ММК, полученные в ходе экспери-

мента, успешно прошли выходной контроль и в данный момент работают непосредственно на установке «Стан 5000».

Изменение внутренней геометрии ванны, как метод влияния на динамику движения рабочей жидкости, полностью подтвердило свою пригодность экспериментально.

Список литературы

1. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
2. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия: справочник по применению. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
3. Компания «SMS Cheltec» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sms-cheltec.ru/>
4. Mc Farlen W.T. An evaluation of electroformed nickel - cobalt alloy deposits. Plating, 1970, vol. 57, no. 1, pp. 46–50.
5. Кругликов С.С. Исследование выравнивания микропрофиля поверхности при электроосаждении металлов. М., 1970. 346 с.
6. Информативный портал «Секреты гальваники от Галины Королевой» Заметки о гальванике // Причины нарушения качества гальванических покрытий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://blog.tep-nn.ru/?p=1389>
7. Исаев Ю.М., Абрамов А.Е. Исследование течений в системе SolidWorks / FloWorks // Успехи современного естествознания. 2008.

Материал поступил в редакцию 29.03.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-32-38

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ELECTROLYTE FLOW DYNAMICS AND THE COATING QUALITY

Viktor G. Sherkunov – D.Sc. (Eng.), Professor

South Urals State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: sherkunovvg@susu.ac.ru

Sergey N. Rednikov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
South Urals State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: srednikov@mail.ru

Aleksandr E. Vlasov – Postgraduate Student
South Urals State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: vlasovaleksandr.74@gmail.com

Pino Tese – Associate Professor, Executive Vice President
SMS Siemag AG, Germany. E-mail: pino.tese@sms-siemag.com

Abstract

Problem Statement (Relevance): At present, the use of continuous casting machines for continuous casting of steel appears to be the most efficient and economically sound way of producing slabs and billets. A mould is one of the most critical and the most vulnerable component of such machine. Special coatings are installed to protect the mould and extend its service life. The most common method of coating is electroplating, which is due to its high productivity, efficiency and high quality. Besides, electroplating is applicable for almost all metals. Despite great expertise behind the electroplating technology, electroplated coatings have typical defects. Such defects may significantly affect the quality and life of a CCM. The development of efficient techniques for improving the quality of galvanic coatings is an urgent task in terms of the performance and life of a CCM mould. **Objectives:** The study is aimed at optimizing the flow of electrolyte in a bath for a higher wear resistance of copper mould plates. **Methods Applied:** Modelling of the electrolyte flow in the bath was done with Solid Works within the CosmosFloWorks design package. The experimental research involved a real-life experiment carried out with the help of an industrial electroplating machine. **Originality:** The study helped develop an original method for calculating the electrolyte flow dynamics and offered measures for improving the quality of electroplated coatings. **Prac-**

tical Relevance: The theoretical and experimental studies carried out helped enhance the wear-resistance of protective coatings. The proposed measures and the calculation method will enable a longer CCM mould life due to the enhanced protective coating.

Keywords: Continuous casting machine (CCM), mould, electroplating, non-uniform hardness.

References

1. Bigeev A.M., Bigeev V.A. Steel metallurgy. The theory and technology of steel production: 3rd Edition, Revised and Expanded. Magnitogorsk: NMSTU, 2000, 544 p. (In Russ.)
2. Gamburg Yu.D. Electroplating: Application Reference Book. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 216 p. (In Russ.)
3. SMS Cheltec. Available at: <http://www.sms-cheltec.ru> (Accessed September 2015).
4. Mc Farlen W.T. An evaluation of electroformed nickel - cobalt alloy deposits. Plating, 1970, vol. 57, no. 1. pp. 46-50.
5. Kruglikov S.S. The study of surface microprofile improvement during a metal plating process. Moscow, 1970, 346 p. (In Russ.)
6. Secrets of Electroplating from Galina Koroleva. Notes on Electroplating. Causes of quality defects in electroplated coatings. Available at: <http://blog.tep-nn.ru/?p=1389> (Accessed November 2015).
7. Isaev Yu.M., Abramov A.E. Study of flows in the SolidWorks. FloW Works programmes. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [The success of modern science]. Ulyanovsk, 2008. (In Russ.)

Received 29/03/16

Влияние динамики движения электролита в гальванической ванне на однородность наносимого покрытия / Шеркунов В.Г., Редников С.Н., Власов А.Е., Тезе П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 32–38. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-32-38

Sherkunov V.G., Rednikov S.N., Vlasov A.E., Pino T. The relationship between the electrolyte flow dynamics and the coating quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 32–38. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-32-38