

УДК 621.74.047

**СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО СЛОЯ НА УЗКИХ СТЕНКАХ  
КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ****CREATION OF THE WEAR-RESISTANT LAYER ON NARROW WALLS  
MNLZ CRYSTALLIZERS WITH USE GAS-THERMAL COVERING**

©Герасимова А. А.

канд. техн. наук

*Национальный исследовательский технологический университет  
г. Москва, Россия, allochka@rambler.ru*

©Gerasimova A.

*Ph.D., National research technological university  
Moscow, Russia, allochka@rambler.ru*

©Девятьярова В. В.

*Национальный исследовательский технологический университет  
г. Москва, Россия, vikdev@yandex.ru*

©Devyatyarova V.

*National research technological university  
Moscow, Russia, vikdev@yandex.ru*

©Кондратенко В. Е.

канд. техн. наук

*Национальный исследовательский технологический университет  
г. Москва, Россия, Kafsm.mggu@yandex.ru*

©Kondratenko V.

*Ph.D., National research technological university  
Moscow, Russia, Kafsm.mggu@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе для повышения срока службы кристаллизаторов МНЛЗ на их узких стенках из меди М1 перед последним ремонтом создавали жаростойкий износостойкий слой напылением хромоникелевого покрытия. Предварительно исследовали структуру покрытия, состав фаз, твердость и микротвердость поверхностных слоев.

Как показали эксперименты, термообработка стенок с алюминиевым газотермическим покрытием в защитной среде при температуре 900 °С и времени выдержки 10 ч, необходимых для создания требуемой толщины диффузионного слоя, приводит к их короблению в результате данного процесса, которое не устраняется механическим способом. Поэтому необходимо было корректировать режимы термообработки или наносить на стенки материал, не уступающий по свойствам Cu–Al диффузионному слою и не требующий термообработки.

Покрытие из никелевого сплава было нанесено на всю рабочую поверхность двух узких стенок. Требуемый класс чистоты рабочей поверхности стенок был обеспечен с помощью механической обработки. Хромоникелевое газотермическое покрытие толщиной 0,5–0,6 мм было нанесено на поверхность пары узких стенок толстостенного кристаллизатора. Покрытие на образцах с Cr–Ni слоем состоит из трех фаз: темной, содержащей наибольшее количество хрома и кислорода: (Cr) до 63,4%, (O) до 33,4%, (Ni) 3,2–9,1%; светлой, в составе

которой обнаружено максимальное количество никеля до 89% и серой фазы: (Ni)=63,9–73,5%, (Cr) до 12,4%, (O)=22–24,9%, (Fe) до 3,4%, (Si)=0,3–0,5%.

Таким образом, для получения требуемого класса чистоты поверхности стенок необходима их механическая обработка шлифованием и требуется проведение работ по увеличению толщины хромоникелевого покрытия.

*Abstract.* To increase service life of CCM mold on their narrow sides from M1 copper before the last renovation created a heat-resistant wear-resistant layer plating chromium coating. Previously investigated the structure of the coating, phase composition, hardness and microhardness of the surface layers.

As shown by experiments, heat treatment of the walls with an aluminum gas-thermal coating in a protective environment at a temperature of 900 °C and the exposure time 10 h necessary to create the desired thickness of the diffusion layer, leading to them warping as a result of this process, which is not eliminated by mechanical means. Therefore, it was necessary to adjust the modes of heat treatment or applied to the wall material, not inferior in properties of Cu-Al diffusion layer and which does not require heat treatment.

The coating of Nickel alloy was deposited on the entire working surface of the two narrow walls. The required cleanliness class of the working surface of the walls was achieved through machining. Chromium-Nickel coating thickness of 0.5–0.6 mm were deposited on the surface of the pair of narrow walls of thick-walled mold. The coating on the samples with a Cr-Ni layer consists of three phases: dark, contains the largest amount of chromium and oxygen: (Cr) to 63.4%, (O) to 33.4%, (Ni) 3,2–9,1%; light, within which the detected maximum amount of Nickel to 89% and sulfur phases: (Ni)=63,9–73,5%, (Cr) to 12.4%, (O)=22–24,9%, (Fe) to 3.4%, (Si)=0,3–0,5%

Thus, to obtain the desired cleanliness class of the surface of the walls required machining by grinding and will require work to increase the thickness of the Chromium-Nickel coating.

*Ключевые слова:* кристаллизатор, узкая стенка, хромоникелевое газотермическое покрытие, жаростойкий износостойкий слой, структура, фазовый состав, микротвердость.

*Keywords:* mold, narrow wall, chromium gas-thermal coating, heat-resistant wear-resistant layer, the structure, phase composition, microhardness.

Известно, что многие детали оборудования металлургического производства (кристаллизаторы, конвертерные и доменные фурмы и т. д.) изготавливают из меди и ее сплавов, которые имеют высокие электро- и теплопроводность [1, с. 301]. В то же время медь имеет низкие жаростойкость и износостойкость [2, с. 95]. Опыты показали, что оксиды меди не сопротивляются тепловым ударам и разрушаются после первой же теплосмены, а также отслаиваются при испытании на трение.

Одним из способов повышения эксплуатационных свойств изделий из меди является термодиффузионное насыщение поверхности легирующими элементами [3, с. 215]. Одним из основных элементов, используемым для насыщения, является алюминий. Алитирование можно проводить, например, методом насыщения в порошковой смеси, состоящей из 50% алюминиевой пудры, 49%  $Al_2O_3$  и 1%  $NH_4Cl$  [4, с. 402]. Износостойкость алитированных образцов из меди увеличивается в 1,3 раза. Однако метод диффузионного насыщения в порошковых смесях является сравнительно трудоемким и обладает низкой производительностью [5, с. 79]

Наиболее перспективным направлением снижения интенсивности износа рабочих поверхностей стенок кристаллизатора МНЛЗ в настоящее время считается нанесение различных покрытий на стенки кристаллизатора [6, с. 419]. ООО «Корад» организовало работы по нанесению гальванического покрытия на бывшие в эксплуатации стенки

кристаллизатора и провело испытания в условиях ОАО «Северсталь» [7, с. 397]. В ходе испытаний наносили покрытия двух видов фирмы “KME Europa Metal AG” (Германия): из никеля твердостью 220 HV, и из сплава никеля с кобальтом твердостью 400 HV. В результате получено увеличение стойкости стенок кристаллизатора по износу для обоих видов покрытия. Однако гальванические покрытия используются только на тонкостенных щелевых кристаллизаторах МНЛЗ и не применяются для толстостенных кристаллизаторов. Решить проблему повышения стойкости стенок толстостенных кристаллизаторов, может применение газотермических покрытий [8, с. 702]. Технологический процесс напыления позволяет получать требуемую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью.

В результате напыления алюминиевого газотермического покрытия на медь и последующей термообработки образуется диффузионный слой [9, с. 70] с жаростойкостью и износостойкостью, не уступающими свойствам, полученными с использованием метода диффузионного насыщения из порошков.

Как показали эксперименты, термообработка стенок с алюминиевым газотермическим покрытием в защитной среде при температуре 900 °С и времени выдержки 10 ч, необходимых для создания требуемой толщины диффузионного слоя, приводит к их короблению в результате данного процесса, которое не устраняется механическим способом. Поэтому необходимо было корректировать режимы термообработки или наносить на стенки материал, не уступающий по свойствам Cu–Al диффузионному слою и не требующий термообработки. Так покрытие из никелевого сплава было нанесено на всю рабочую поверхность двух узких стенок. Требуемый класс чистоты рабочей поверхности стенок был обеспечен с помощью механической обработки. При осмотре кристаллизатора с опытными стенками после разливки 11 плавов высокомарганцовистой стали S355JR было установлено, что износ покрытия в углах нижней части стенок составил 0,6–0,75 мм [10, с. 185].

В данной работе для повышения стойкости узких стенок использовали покрытие из хромоникелевого сплава. Сначала покрытие напыляли на образцы из меди М1 с хромоникелевым покрытием.

Исследовали структуру покрытия, состав фаз, твердость и микротвердость поверхностных слоев. Структура Cr–Ni слоя на образцах 1 и 2 идентична (Рисунки 1, 2). На границе раздела «покрытие — медная основа» участков несплошного прилегания Cr–Ni слоя не наблюдается. Глубина диффузии никеля в медную основу составляет 30 мкм, глубина диффузии хрома — до 5 мкм (микронзондовое исследование). Толщины нанесенных слоев приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

ТОЛЩИНЫ НАНЕСЕННЫХ СЛОЕВ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

№ образца	Общая толщина нанесенных слоев, мкм			Средняя толщина Cr–Ni слоя, мкм
	средняя	min	max	
1	150	100	210	150
2	140	80	230	140

Локальный химический анализ фаз диффузионных слоев проведен на растровом электронном микроскопе (диапазон анализируемых элементов от Be до U, диаметр зонда составляет примерно около 1 мкм, предел чувствительности 0,1%).

Покрытие на образцах с Cr–Ni слоем состоит из трех фаз: темной, содержащей наибольшее количество хрома и кислорода: (Cr) до 63,4%, (O) до 33,4%, (Ni) 3,2–9,1%; светлой, в составе которой обнаружено максимальное количество никеля до 89% и серой фазы: (Ni)=63,9–73,5%, (Cr) до 12,4%, (O)=22–24,9%, (Fe) до 3,4%, (Si)=0,3–0,5%.

Элементный состав фаз на образцах идентичен и представлен в Таблице 2.

Таблица 2.

ЛОКАЛЬНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ФАЗ

Химические элементы	Cr-Ni слой, %		
	светлая фаза	темная фаза	серая фаза
Si	0,5		0,3–0,5
Ni	83,9–89,0	3,2–9,1	63,9–73,5
Cr	9,2–14,4	59,5–63,4	10,5–12,4
Fe	1,2–1,3		1,0–3,4
O		31,4–33,4	21,9–24,9

Средние значения микротвердости фаз исследуемых образцов приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ, МПА

№ образца	основа	Cr-Ni слой		
		светлая фаза	темная фаза	серая фаза
1	580	2440	9970	3900
2	580	3000	9900	4100

При твердости медной основы равной 53,2 HR15T твердость поверхностных слоев на исследованных образцах ~ одинаковая и составляет 68,9–70,0 HR15T, т. е. в 1,3 раза больше твердости основного металла.

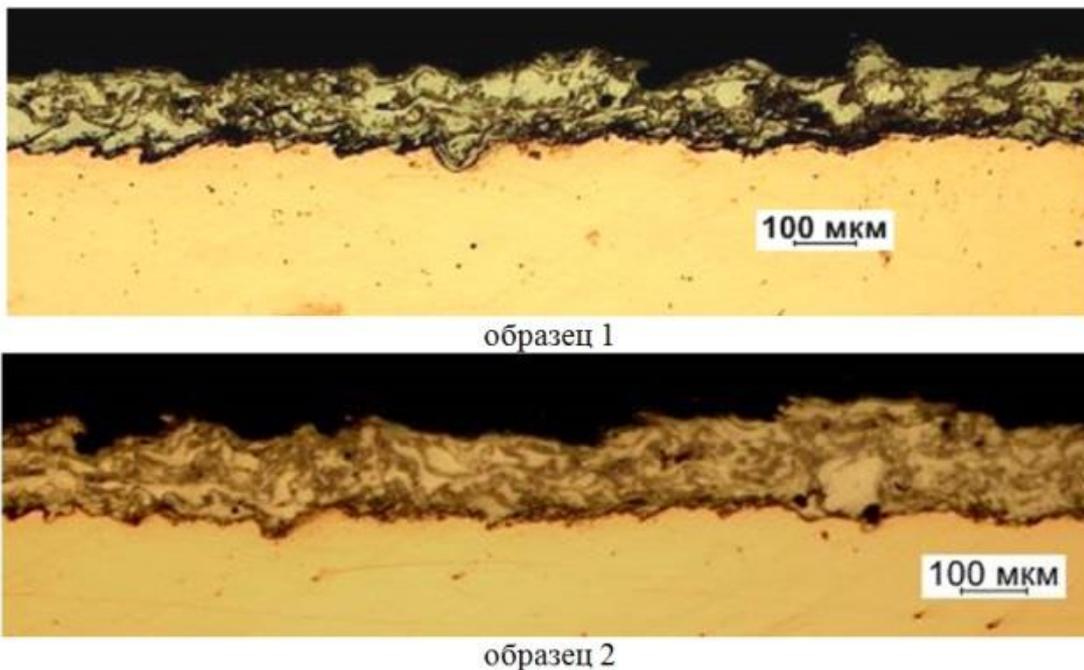


Рисунок 1. Образы медного листа с Cr-Ni напылением.

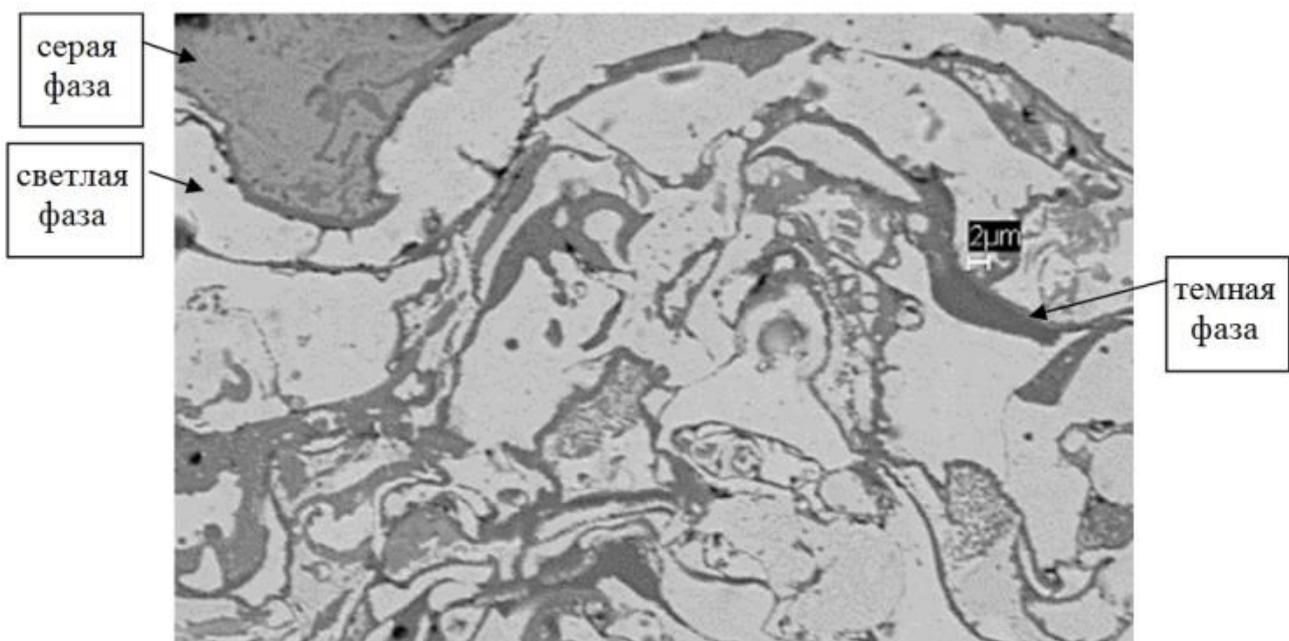
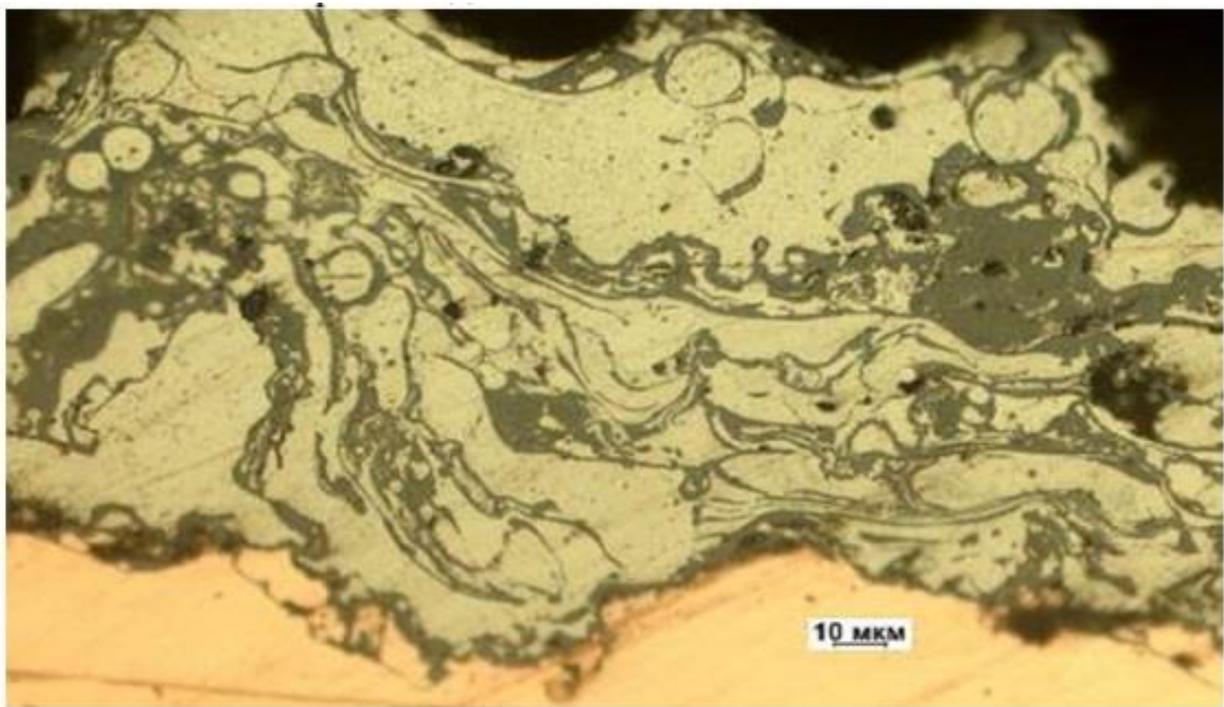


Рисунок 2. Структура Cr–Ni слоя.

Хромоникелевое газотермическое покрытие толщиной 0,5–0,6 мм с выше исследованной структурой и свойствами было нанесено на поверхность пары узких стенок толстостенного кристаллизатора (Рисунок 3).



Рисунок 3. Стенка кристаллизатора после напыления хромоникелевого покрытия.

В связи с тем, что для получения требуемого класса чистоты поверхности стенок необходима их механическая обработка шлифованием, требуется проведение работ по увеличению толщины хромоникелевого покрытия.

*Список литературы:*

1. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М.: Metallurgy, 1986. 480 с.
2. Радюк А. Г., Титлянов А. Е., Украинцев А. Е. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов // Цветные металлы. 2007. №5. С. 95–97.
3. Зайт В. Диффузия в металлах. М.: Metallurgy, 1966. 654 с.
4. Минкевич А. Н. Химико–термическая обработка металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1965. 491 с.
5. Дубинин Г. Н., Соколов В. С. Жаростойкость и коррозионная стойкость меди и бронзы после алитохромирования // Защитные покрытия на металлах. 1979. №13. С. 79–82.
6. Radyuk A. G., Gorbatyuk S. M., Gerasimova A. A. Use of electric–arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick–walled slab molds // Metallurgist. 2011. V. 55. №5–6. P. 419–423.

7. Gerasimova A. A., Radyuk A. G., Glukhov L. M. Applying Coatings to the Narrow Walls of Continuous–Caster Molds to Improve the Quality of the Surface of Slabs // Metallurgist. 2014. V. 58. №5–6. P. 397–400.

8. Поляк М. С. Технология упрочнения. М.: Машиностроение, 1995. Т.1. 832 с.

9. Радюк А. Г., Титлянов А. Е., Самедов Э. М. Свойства поверхностного слоя на меди, образующегося после нанесения и термообработки алюминиевого газотермического покрытия // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2007. №3. С. 70–74.

10. Gerasimova A. A., Radyuk A. G., Titlyanov A. E. Creation of a diffusional aluminum layer on the narrow walls of continuous–casting molds // Steel in Translation. 2015. V. 45. №3. P. 185–187.

#### *References:*

1. Novikov I. I. Teoriya termicheskoi obrabotki metallov. Moscow, Metallurgiya, 1986, 480 p.

2. Radyuk A. G., Titlyanov A. E., Ukraintsev A. E. Formirovanie diffuzionnykh sloev na poverkhnosti medi i ee splavov. Tsvetnye metally, 2007, no. 5, pp. 95–97.

3. Zait V. Diffuziya v metallakh. Moscow, Metallurgiya, 1966, 654 p.

4. Minkevich A. N. Khimiko–termicheskaya obrabotka metallov i splavov. Moscow, Mashinostroenie, 1965, 491 p.

5. Dubinin G. N., Sokolov V. S. Zharostoikost i korroziionnaya stoikost medi i bronzy posle alitokhromirovaniya. Zashchitnye pokrytiya na metallakh, 1979, no. 13, pp. 79–82.

6. Radyuk A. G., Gorbatyuk S. M., Gerasimova A. A. Use of electric–arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick–walled slab molds. Metallurgist, v. 55, no. 5–6, September, 2011, pp. 419–423.

7. Gerasimova A. A., Radyuk A. G., Glukhov L. M. Applying Coatings to the Narrow Walls of Continuous–Caster Molds to Improve the Quality of the Surface of Slabs. Metallurgist, v. 58, no. 5–6, September, 2014, pp. 397–400.

8. Polyak M. S. Tekhnologiya uprochneniya. Moscow, Mashinostroenie, 1995, v.1, 832 p.

9. Radyuk A. G., Titlyanov A. E., Samedov E. M. Svoistva poverkhnostnogo sloya na medi, obrazuyushchegosya posle naneseniya i termoobrabotki alyuminievogo gazotermicheskogo pokrytiya. Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya, 2007, no. 3, pp. 70–74.

10. Gerasimova A. A., Radyuk A. G., Titlyanov A. E. Creation of a diffusional aluminum layer on the narrow walls of continuous–casting molds. Steel in Translation, march 2015, v. 45, no. 3, pp. 185–187.

*Работа поступила  
в редакцию 30.11.2016 г.*

*Принята к публикации  
04.12.2016 г.*