

горск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 40-47.

11. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.
12. Прогнозирование показателей надежности трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.С. Губин и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. т.1. С.262-264.
13. Модель процесса изнашивания трибосопряжений на основе термодинамического анализа их состояния / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский и др. // Актуаль-

ные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. Т.1. С.264-268.

14. Анцупов А.В. Обеспечение надежности узлов трения машин на стадии проектирования: Монография / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013.- 293с.
15. Анцупов А.В. (мл.), Слободянский М.Г. Прогнозирование долговечности опорных валков и оценка эффективности способов продления их ресурса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №3. С. 74-79.



УДК 621.793

**А.А. Герасимова, А.Г. Радюк**  
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»  
г. Москва, Россия  
E-mail: allochka@rambler.ru  
Дата поступления 27.02.2015

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ УЗКИХ СТЕНОК КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

### Аннотация

Для повышения срока службы кристаллизаторов МНЛЗ в работе на их отработанных узких стенках из меди М1 и медного сплава МН2,5CoKpX создавали диффузионные слои напылением алюминия с последующей термической обработкой. В качестве основных показателей работоспособности диффузионного слоя использовали его толщину и микротвердость.

Рекомендовано нанесение на рабочие узкие стенки кристаллизатора алюминиевого газотермического покрытия с последующей термической обработкой в защитной среде по скорректированным режимам и испытание кристаллизатора на МНЛЗ с оценкой состояния стенок в процессе эксплуатации и изменения качества разливаемого металла.

Ключевые слова: узкая стенка, кристаллизатор МНЛЗ, газотермическое покрытие, термообработка, диффузионный слой.

### Введение

Из литературных источников 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]. В то же время медь имеет низкие показатели жаростойкости и износостойкости [2]. 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]. 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].

Испытание меди марки М1 с покрытием на окисление при  $850^\circ C$  на воздухе показало, что термодиффузионное алитирование является перспективной защитой меди от окисления [5]. Алитированные образцы окисляются значительно медленнее, быстро наступает стабилизация процесса; по-видимому, их окисление происходит по логарифмической зависимости. Образцы алитированной меди после окисления имеют плотный и прочный оксидный слой, который не отслаивается в условиях теплосмен.

Что касается износостойкости, то у алитированных образцов из меди она увеличивается в 1,3 раза [6].

Однако метод диффузионного насыщения в порошковых смесях является сравнительно трудоемким и обладает низкой производительностью. В настоящее время для получения диффузионных слоев на деталях металлургического оборудования применяется метод газотермического напыления покрытий с последующей термообработкой [7]. Стандартное оборудование для напыления таких покрытий является сравнительно компактным и дешевым, ничем не лимитируются размеры покрываемых деталей и возможно напыление локальных и односторонних покрытий [8]. Технологический процесс напыления позволяет получать требуемую производительность нанесения покрытия и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью [9].

В результате напыления газотермических покрытий на медь и ее сплавы и последующей термообработки образуется диффузионный слой [10] с жаростойко-

стью и износостойкостью, не уступающим свойствам, полученными с использованием метода диффузионного насыщения из порошков, необходимыми для повышения срока службы оборудования металлургического производства.

#### Основная часть

В настоящее время на ряде отечественных заводов в качестве материалов для изготовления стенок кристаллизаторов МНЛЗ используют медь марки М1, а также медно-никелевый сплав МН2,5КоКрХ. Поэтому для исследований использовали отработанные узкие стенки кристаллизаторов из этих материалов.

В работе диффузионные слои создавали на поверхности меди М1 и медного сплава МН2,5КоКрХ напылением алюминия толщиной около  $1,5 \text{ мм}^1$  с последующим диффузионным отжигом при  $t=800^\circ C$  в течение 10 ч в окислительной среде.

Было установлено, что на поверхности меди М1 наблюдается упрочняющий диффузионный слой толщиной до 1,5 мм, а сплава МН2,5КоКрХ – 0,6–1,4 мм, что объясняется сдерживанием диффузионного процесса содержащимися в нем легирующими элементами. В любом случае толщина диффузионного слоя не превышает толщину напыляемого покрытия.

Для выяснения причин уменьшения толщины диффузионного слоя на сплаве МН2,5КоКрХ были проведены металлографические и микрорентгеноспектральные исследования.<sup>2</sup> Покрытие наносили на стенку из сплава МН2,5КоКрХ, микротвердость диффузионного слоя измеряли на микротвердомере ПМТ–3 (таблица 1).

Микроструктура диффузионного слоя состоит из эвтектоида ( $\alpha+\gamma_2$ ) и выделений  $\alpha$ -фазы и  $\gamma_2$ -фазы по границам зерен. В структуре слоя можно выделить несколько зон:

- в поверхностной зоне на фоне эвтектоида наблюдаются зерна серого цвета  $\gamma_2$ -фазы;

<sup>1</sup> В работе принимал участие А.Е. Кузнецов

<sup>2</sup> В работе принимали участие Л.В. Полунина, Т.В. Жбанова и С.А. Ковалева

- средняя зона состоит из светлых зерен  $\alpha$ -фазы и темных полей эвтектоида ( $\alpha+\gamma_2$ ) разной степени дисперсности (рисунок 1);
- зона, примыкающая к линии раздела слой-металл, представляет собой светлые зерна  $\alpha$ -фазы.

Поверхность слоя исследуемых образцов характеризуется наличием пор глубиной от 0,1 до 0,4 мм.

Фазовый состав диффузионного слоя, распределение Al и других химических элементов в зоне, прилегающей к линии раздела слой-металл, определяли микро-рентгеноспектральным методом на приборе "Сamebax". Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 1

Микротвердость диффузионного слоя

№ образца	Состав покрытия	Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup>			
		Поверхность диффузионного слоя	Середина диффузионного слоя	Граница слой-металл	Основной металл
1	Al	367	272	190	110

Таблица 2

Результаты микро-рентгеноспектрального анализа диффузионного слоя

№ образца	Состав покрытия	Содержание химических элементов, %									
		фаза ближе к поверхности диффузионного слоя			фаза в середине диффузионного слоя				фаза ближе к границе раздела слой-металл		
		Al	Ni	Cr	Al	Ni	Cr	Si	Al	Ni	Si
1	Al	18,1-22,3	1,5-1,6	0	14,0-14,8	3,5-4,1	0	0,1-0,3	11,5-11,8	4,0-4,2	0,8-1,7

Известно, что ресурс работы диффузионного слоя, создаваемого на медных деталях металлургического оборудования, определяется, прежде всего, его толщиной. Увеличение толщины напыляемого покрытия и повышение температуры и времени термообработки, как правило, приводят к увеличению толщины диффузионного слоя. Однако увеличение толщины напыляемого покрытия сопровождается снижением его адгезии, а повышение температуры термообработки – сильным окислением покрытия и непокрытых участков медной основы. В связи с этим для увеличения толщины диффузионного слоя диффузионный отжиг покрытий на меди проводили в защитной среде (95% N<sub>2</sub> 5% H<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>) при температурах 800–900 °С в течение десяти часов.

В работе исследовали образцы из меди М1 с алюминиевым покрытием.

Маркировка образцов: № 1 – без диффузионного отжига, остальные – после диффузионного отжига (таблица 3).



Рисунок 1. Микроструктура диффузионного слоя (образец № 1), x500

Основные результаты исследований образцов с покрытием<sup>3</sup> представлены в таблице 3.

<sup>3</sup> В работе принимала участие Е.С. Клименко

Влияние толщины алюминиевого покрытия, режима термообработки и защитной среды на толщину и микротвердость диффузионного слоя

№	$h_{\text{П}}$ , мм	$t$ , °С / $\tau$ , ч	Среда	$h_{\text{д.с.}}$ , мм	Микротвердость, $H_{\text{ц}}$ , МПа
1	1,1–1,5	–	–	–	310
2	1,0	800/10	95%N <sub>2</sub> 5%H <sub>2</sub>	0,7 – 0,9	1650–3010
3	1,5	850/10	H <sub>2</sub>	3,8 – 4,0	1490–3880
4	1,0	900/10	95%N <sub>2</sub> 5%H <sub>2</sub>	2,3 – 2,4	1180–2100
5	1,0	900/10	H <sub>2</sub>	2,6 – 3,0	1420–1510
6	1,5	900/10	H <sub>2</sub>	3,3 – 4,0	1350–2750
7	2,5	900/10	95%N <sub>2</sub> 5%H <sub>2</sub>	4,0 – 4,6	1140–3330

При проведении анализа было установлено, что существуют режимы термообработки, обеспечивающие получение диффузионного слоя на поверхности медных образцов без язвин и размывов, толщиной более 4,0 мм и высокой твердости; увеличение толщины напыляемого покрытия и повышение температуры термообработки, как правило, приводят к увеличению толщины диффузионного слоя; изменение защитной среды с 95 %N<sub>2</sub>+5 %H<sub>2</sub> на 100 %H<sub>2</sub> практически не изменяет толщину диффузионного слоя; максимальная толщина диффузионного слоя  $h_{\text{д.с.}} = 4,0–4,6$  мм достигается при  $t = 900$  °С и  $h_{\text{П}} = 2,5$  мм; микротвердость диффузионного слоя в 2–6 раз превосходит микротвердость меди и составляет 1140–3880 МПа против 460–590 МПа на медной основе.

В дальнейшем на поверхность двух пар, выведенных из эксплуатации узких стенок кристаллизаторов, было нанесено алюминиевое газотермическое покрытие толщиной около 2,0 мм<sup>4</sup>. Одна пара прошла термообработку в защитной среде (95%N<sub>2</sub>, 5%H<sub>2</sub>) при температуре 800 °С в течение 10 ч, а другая в защитной среде (H<sub>2</sub>) при температуре 900°С в течение 10ч<sup>5</sup> (рисунок 2).

В результате исследований образцов из стенки первой пары толщина диффузионного слоя составила 0,9–1,2 мм, а его

микротвердость 1650–3250 МПа. Однако такой толщины недостаточно для механической обработки поверхности стенок со стороны покрытия и получения остаточных значений толщин, обеспечивающих значительное увеличение их срока службы.

Осмотр второй пары стенок показал, что их термообработка в защитной среде при температуре 900 °С и времени выдержки 10 ч приводит к их короблению в результате данного процесса, которое не устраняется механическим способом<sup>6</sup>.

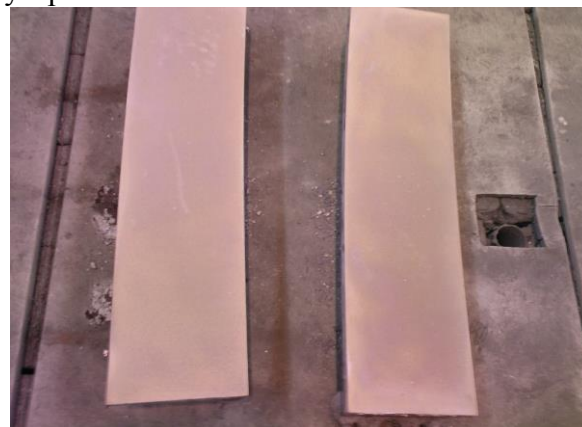


Рисунок 2. Стенки кристаллизатора после термообработки в защитной среде (H<sub>2</sub>) при температуре 900 °С в течение 10 ч

<sup>4</sup> В работе принимал участие Н.И. Крикунов

<sup>5</sup> В работе принимал участие А.А. Петухов

<sup>6</sup> В работе принимал участие Н.В. Андросов

## Заключение

Результаты исследований, повышения стойкости узких стенок кристаллизаторов МНЛЗ позволяют заключить следующие:

- существуют режимы термообработки, обеспечивающие получение диффузионного слоя на поверхности медных образцов без язвин и разрывов, толщиной более 4,0 мм и высокой твердости;
- увеличение толщины напыляемого покрытия и повышение температуры термообработки, как правило, приводят к увеличению толщины диффузионного слоя;
- изменение защитной среды с 95%N<sub>2</sub>+5%Н<sub>2</sub> на 100%Н<sub>2</sub> практически не изменяет толщину диффузионного слоя;
- максимальная толщина диффузионного слоя  $h_{д.с.} = 4,0-4,6$  мм достигается при  $t = 900$  °С и  $h_{п} = 2,5$  мм;
- микротвердость диффузионного слоя в 2–6 раз превосходит микротвердость меди и составляет 1140–3880 МПа против 460–590 МПа на медной основе.

Целесообразно нанесение на рабочие узкие стенки кристаллизатора алюминиевого газотермического покрытия с последующей термической обработкой в защитной среде по скорректированным режимам и испытание кристаллизатора на МНЛЗ с оценкой состояния стенок в процессе эксплуатации и изменения качества разливаемого металла.

## Библиографический список

1. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
2. Радюк А.Г. Формирование диффузионных слоев на поверхности меди и ее сплавов / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, А.Е. Украинцев // Цветные металлы. – 2007. – №5. – С. 95–97.
3. Зайт В. Диффузия в металлах / В.Зайт. – М.: Металлургия, 1966. – 654 с.
4. Минкевич А.Н. Химико–термическая обработка металлов и сплавов / А.Н.

Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.

5. Вавиловская Н.Г. Окалиностойкость и сопротивление истиранию меди, диффузионно-насыщенной алюминием, никелем, цирконием / Н.Г. Вавиловская, Л.Г. Тимонина // Защитные покрытия на металлах. – 1971. – вып. 5. – С. 177–179.
6. Дубинин Г.Н. Жаростойкость и коррозионная стойкость меди и бронзы после алитохромирования / Г.Н. Дубинин, В.С. Соколов // Защитные покрытия на металлах. – 1979. – вып. 13. – С. 79–82.
7. Радюк А.Г. Совершенствование работы деталей металлургического оборудования из меди напылением газопламенных покрытий / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов // Сталь. – 2011. – №3. – С. 7–9.
8. Какуевицкий В.А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин. – Киев: Техника, 1989. – 174 с.
9. Поляк М.С. Технология упрочнения: в 2-х т. / М.С. Поляк. – М.: Машиностроение, 1995. – 832 С. ISBN 5-217-02810-6, Т.1.
10. Радюк А.Г. Свойства поверхностного слоя на меди, образующегося после нанесения и термообработки алюминиевого газотермического покрытия / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Э.М. Самедов // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2007. – №3. – С. 70–74.