

вов / Абраимов Н.В., Шкретов Ю.П., Терёхин А.М. [и др.] // Коррозия: материалы, защита. – 2005. – № 10 – С.10-13.

14. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / [Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г. и др.]. – М.: Наука, 1982. – 263с.

Поступила в редколлегию 03.12.2018.

УДК 621.793.6:669.35

DOI 10.31319/2519-2884.33.2018.196

СЕРЕДА Б.П., д.т.н., профессор  
КРУГЛЯК И.В., докторант  
СЕРЕДА Д.Б., ассистент  
КРУГЛЯК Д.О.\*, к.т.н., доцент

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское  
\*Запорожская государственная инженерная академия

### ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНЫХ СПЛАВАХ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

**Введение.** В связи с ускоренным развитием техники крайне актуальными стали вопросы повышения надежности и долговечности деталей машин, приборов, установок, улучшения их качества и эффективности работы, а, следовательно, вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин и узлов ответственного назначения.

Решение этих задач связано с упрочнением поверхностных слоев изделий. Роль процессов поверхностного упрочнения в долговечности машин и механизмов особенно возросла в настоящее время, так как развитие машиностроительных отраслей промышленности связано с повышением механических нагрузок, температур, агрессивности сред, в которых работают ответственные детали.

Медь выделяется среди других металлов высокой тепло- и электропроводностью. Однако повышенные требования к металлу, предъявляемые новой техникой (в первую очередь, морским судостроением, авиастроением, электротехнической промышленностью, атомной техникой и космонавтикой), вызывают необходимость изучения создания надежных защитных покрытий на меди и сплавах [1]. Это позволит решить актуальные вопросы, связанные с повышением надежности и долговечности деталей из меди, – снижение коррозии металла при высоких температурах и увеличение износостойкости.

Одним из наиболее эффективных методов создания покрытий, обладающих высокими механическими и физико-химическими свойствами, является диффузионное поверхностное легирование металла в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2-9].

Защита меди и сплавов на ее основе путем их химико-термической обработки оказывается не только перспективным, но иногда и единственно возможным способом получения изделий с необходимым комплексом эксплуатационных свойств: повышенных значений механической прочности, коррозионной стойкости, сопротивления истиранию и окислению при высоких температурах с сохранением основных качеств сплавов на основе меди – высокой электро- и теплопроводности. Большое преимущество имеет насыщение поверхности металлов и сплавов одновременно несколькими элементами, что позволяет получать, как правило, более существенное улучшение свойств поверхностного слоя [10].

**Постановка задачи.** Задачей исследований является получение многокомпонентных защитных покрытий на медных сплавах для деталей трения, работающих при

высоких нагрузках и больших скоростях.

**Результаты работы.** На качество поверхности диффузионных слоев, их глубину и структуру существенное влияние оказывает процентное соотношение составляющих реакционных смесей. Изучение влияния составов порошков смеси на результаты насыщения поверхностного слоя медных сплавов позволяет установить наиболее подходящие для дальнейшего исследования соотношения частей насыщающей среды и режимов обработки.

Исходными материалами для исследования служили медь марки М1 и сплавы БрАЖ-9-4-1, ЛМцЖ-55-4-1. В качестве насыщающей среды использовали смесь порошков следующих материалов: оксида хрома ( $Cr_2O_3$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), металлических молибдена и алюминия, хлорида аммония ( $NH_4Cl$ ) и йода ( $I_2$ ). Обработку проводили при температурах 800...1000°C в течение 0,5...1,5 ч.

На основании анализа требований, предъявляемых к покрытиям на меди и способам насыщения металлов для получения защитных покрытий, выбрали диффузионный метод поверхностного насыщения из твердой фазы в активной газовой среде. Этот метод обеспечивает высокое качество поверхности, является наиболее простым и удобным в лабораторной практике, хорошо воспроизводимым в условиях производства и не требует специального сложного оборудования для своего осуществления.

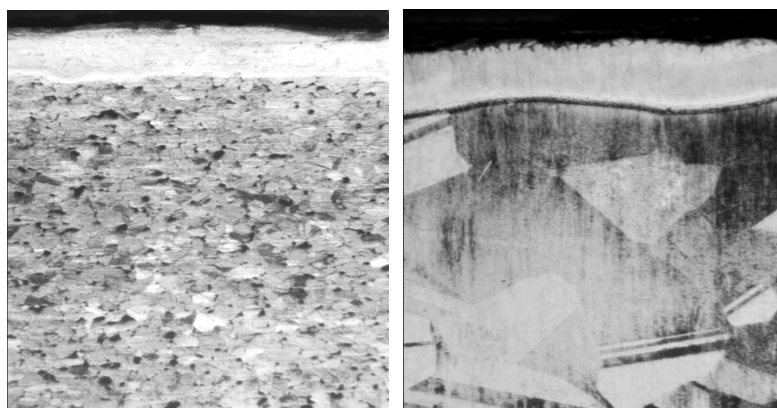
Для понимания механизма реакционной диффузии выявили относительную роль диффузии отдельных компонентов рассматриваемых систем в процессе образования и роста фаз, возникающих на поверхности металла.

На основании анализа реакций, проходящих при химико-термической обработке в режиме теплового самовоспламенения порошковой смеси, а также результатов экспериментов и металлографических исследований получили схему образования упрочненных слоев на медных сплавах. Этот процесс условно можно разделить на несколько стадий. Сначала реакционную смесь нагревают в печи до температуры воспламенения, то есть она проходит так называемую стадию инертного нагрева. Затем происходит взаимодействие между порошками оксидов хрома, алюминия, а также молибдена, алюминия и кремния, при этом температура в реакторе повышается до максимальной величины – стадия теплового самовоспламенения. На третьей стадии – стадии прогрева изделий – происходит выравнивание температуры по объему реактора, на которой активные атомы кремния, молибдена и других элементов начинают диффундировать в подложку. На следующей стадии – стадии изотермической выдержки – происходит дальнейший диффузионный рост покрытия.

В результате диффузионного поверхностного насыщения в условиях СВС были получены алюмосилицированные, молибденосилицированные и алюмомолибденосилицированные покрытия на медных сплавах. При этом максимальная толщина покрытий составляла 10...65 мкм. Измерение геометрических размеров образцов проводили до и после химико-термической обработки. Микроструктуру полученных покрытий исследовали на микроскопе «Neophot-2» (рис. 1).

Эффект, наблюдаемый при насыщении меди кремнием отдельно или совместно с другими элементами и указывающий на неравенство потоков атомов меди и легирующих компонентов, диффундирующих в противоположных направлениях, свидетельствует о вакансионном механизме диффузии при химико-термической обработке меди [11]. Показано, что образование защитного слоя осуществляется встречной диффузией элементов через решетку образующихся фаз, то есть наращивание диффузионной зоны происходит одновременно с обеих сторон.

Оценку прочности сцепления покрытий с основой и определение сопротивления сжатию производили на машине МТ-5. Учитывая особенности диффузионных слоев на меди и существующих методов периодического определения величины износа, использовали весовой метод определения износостойкости. Испытания проводили при сухом трении качения под нагрузкой 500 Н.



а) ЛАМцЖ66-6-3-2; б) БрХ08

Рисунок 1 – Микроструктуры многокомпонентных хромированных покрытий, легированных алюминием и кремнием в режиме теплового самовоспламенения СВС-шихт,  $t_{п} = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{в} = 45$  мин,  $\times 150$

мосилицирования по сравнению с необработанной медью.

При обработке образцов меди и сплавов на ее основе наблюдается формирование покрытий разной толщины в зависимости от продолжительности обработки. Данные, характеризующие кинетику роста покрытий, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость толщины слоя на меди и ее сплавах от продолжительности обработки при температуре  $860^{\circ}\text{C}$

Материал	Толщина слоя, мкм		
	Продолжительность обработки, ч		
	0,5	1,0	1,5
М1	10	22	50
ЛАМцЖ-55-4-1	16	32	58
БрАЖ-9-4-1	19	40	65

Химико-термическая обработка в режиме СВС существенно повышает износостойкость меди и ее сплавов. Эти свойства зависят от температуры и продолжительности насыщения, соотношения легирующих элементов в реакционной смеси и, в конечном итоге, от структуры диффузионных слоев.

В результате испытания на истирание было установлено, что применение двухкомпонентных покрытий менее целесообразно, чем многокомпонентных. Причем при насыщении меди двумя элементами лучшие результаты показали двухфазные диффузионные слои, состоящие из твердого раствора легирующих элементов в меди и сплавах. Заметно повышает износостойкость силицирование при определенном соотношении вводимых компонентов, однако наиболее перспективной защитой от истирания является одновременное поверхностное легирование меди алюминием и кремнием, которое дает возможность получить максимальную износостойкость металла. При выбранном режиме износостойкость покрытий зависит лишь от общей продолжительности испытаний на трение.

#### Выводы.

1. Режим теплового самовоспламенения, характеризующийся небольшой длительностью, рекомендуется использовать вместо традиционных способов химико-тер-

мической обработки сплавов меди (азотирования, хромирования и др.).

2. Предлагаемый метод упрочнения способствует значительному повышению износостойкости медных сплавов в условиях сухого трения. Коррозионная стойкость сплавов меди в 3%-ном растворе хлорида натрия увеличивается в 1,5...1,8 раза.

3. Отличия в качестве поверхности, структуре, фазовом составе, микротвердости и содержании легирующих элементов в диффузионных слоях на меди определяются температурой процесса, временем выдержки и составом СВС-смеси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Серета Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія / Б.П.Серета, Н.Є.Калініна, І.В.Кругляк. – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2004. – 230с.
2. The protective coverings obtaining on copper alloys in condition of SHS / Sereda D., Sereda B., Kruglyak D. [and etc.] // Material Science & Tehnology Houston, Texas, USA. – 2010. – P.1247-1251.
3. The Researching of Deformational Parameters at Copper Alloys Rolling with Protective Coatings / Sereda D., Sereda B., Kruglyak I. [and etc.] // Material science and technology 2011. Conference and Exhibition. Columbus, Ohio USA. – 2011. – P.1710-1714.
4. Серета Б.П. Особенности формирования на бронзах защитных покрытий, полученных в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Серета Б.П., Кругляк Д.О. // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении: научный журнал. – 2011. – № 2. – С.65-68.
5. Получение хромоалитированных покрытий на углеродистых материалах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Б.П.Серета, Д.Б.Серета, Ю.А.Белоконь, И.В.Кругляк // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов ПГАСА. – Днепропетровск: ПГАСА. – 2015. – №80. – С.296-301.
6. Получение интерметаллидных соединений и покрытий при нестационарных температурных условиях / Б.П.Серета, Д.Б.Серета, И.В.Палехова, Ю.А.Белоконь // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2014. – № 2. – С.67-71.
7. Sereda B. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition. / B.Sereda, D.Sereda // Material science and technology. Pittsburgh. Pennsylvania. – USA, 2014. – P.482–486.
8. Исследование влияния дисперсности исходного порошка на параметры процесса горения в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Серета Б.П., Белоконь Ю.О., Бондаренко Ю.В. [и др.] // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении: научный журнал. – Запорожье: ЗНТУ. – 2011. – № 2. – С.53-56.
9. Sereda B. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. - P.931-934.
10. Удовицкий И.В. Механизм протекания при температурах близких к плавлению / И.В.Удовицкий // Физика твердого тела. – 1990. – Т. 32. – С.2515-2517.
11. Термодинамічний аналіз реакцій СВС-систем одержання багатокomпонентних силіційованих покриттів у режимі горіння / Б.П.Серета, І.В.Кругляк, Ю.О.Белоконь, Д.О.Кругляк // Металургія: наукові праці ЗДІА. – 2009. – Вип. 19. – С.67-72.
12. Создание износостойких слоев на медных изделиях / А.Е.Титлянов, А.Т.Радюк, В.Е.Кузнецов [и др.] // Материаловедение. – 1998. – № 12. – С.42-44.

Поступила в редколлегию 03.12.2018.