

Б.П. Середа, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

И.В. Кругляк, доцент, к.т.н.

Д.О. Кругляк, аспирант

Ю.В. Бондаренко, аспирант

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНЫХ СПЛАВАХ

*Запорожская государственная инженерная академия*

Виконано дослідження захисних шарів на бронзах і латунях, одержаних методом саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (СВС). Проведено аналіз характеристик захисних покриттів. Вивчено вплив додавання інертного компонента на температуру початку та завершення реакцій у СВС-суміші.

Выполнены исследования защитных слоев на бронзах и латунях, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Проведен анализ характеристик защитных покрытий. Изучено влияние добавки инертного компонента на температуру начала и окончания реакций в СВС-смеси.

*Введение.* В качестве антифрикционных материалов широко применяют дорогостоящие оловянистые бронзы, содержащие в них фосфора и свинца, которые повышают эксплуатационные характеристики. В связи с этим актуальной является замена дорогостоящих бронз сплавами на основе меди с последующим улучшением их характеристик поверхностным упрочнением.

Все безоловянистые бронзы достаточно стойки в атмосферных условиях, пресной и морской воде за исключением условий работы при высоких скоростях движения среды [1]. Алюминиевые бронзы применяют для изготовления обойм подшипников, направляющих втулок, маслоуплотнительных колец, зубчатых колес, фланцев и других мелких, но ответственных деталей в судостроении и авиационной промышленности, а также роторов насосов переменной производительности, венцов червячных колес редукторов секторных рулевых машин и др.

В атмосферных условиях латуни корродируют медленно. Влажный насыщенный пар при больших скоростях вызывает на латуни ударную коррозию. Действие азотной и соляной кислоты также сильно снижает коррозионную стойкость латуней. Сухие газы: фтор, бром, хлор, азот, а также оксид и диоксид углерода при температуре 20 °С и ниже практически не оказывают воздействия на латуни, но при наличии влаги воздействие галогенов резко снижает коррозионную стойкость латуни.

Одновременное насыщение бронз и латуней алюминием, титаном и кремнием (алюмотитаносилицирование) повышает их жаропрочность и коррозионную стойкость в ряде агрессивных сред [2].

К традиционно используемым методам повышения коррозионной и износостойкости относятся диффузионное поверхностное легирование, контактное легирование, лазерная химико-термическая обработка и др., однако все перечисленные технологии характеризуются значительной энергоемкостью и продолжительностью.

В этой связи актуальной является разработка новых технологий получения покрытий, обеспечивающих необходимые эксплуатационные характеристики при минимальном времени их формирования. Такими технологиями могут служить способы полу-

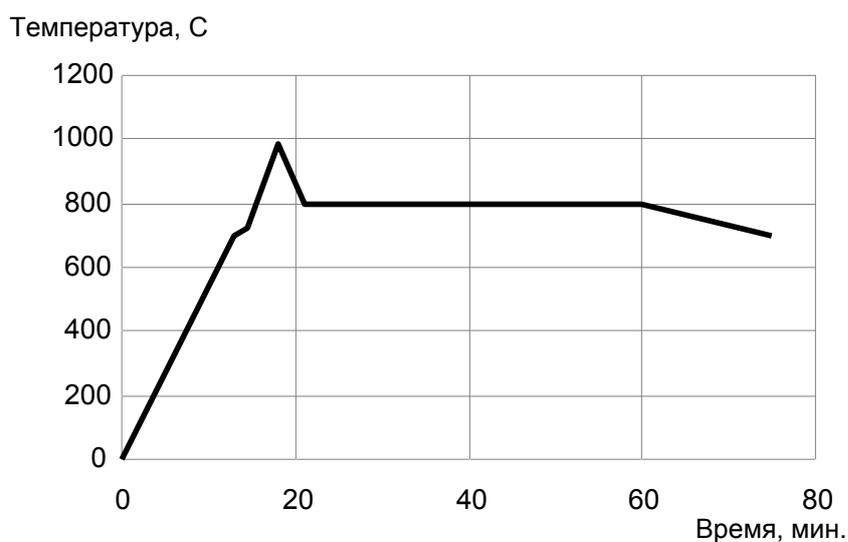
чения покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

*Постановка задачи.* Задачей исследований является получение многокомпонентных защитных покрытий на медных сплавах для деталей трения, работающих при высоких нагрузках и больших скоростях в условиях агрессивных сред.

*Основная часть исследований.* На качество поверхности диффузионных слоев, их глубину и структуру существенное влияние оказывает соотношение составляющих реакционных смесей. Изучение влияния составов порошковой смеси на результаты насыщения поверхностного слоя медных сплавов позволяет установить наиболее подходящие для дальнейшего исследования соотношения частей насыщающей среды и режимов обработки [3].

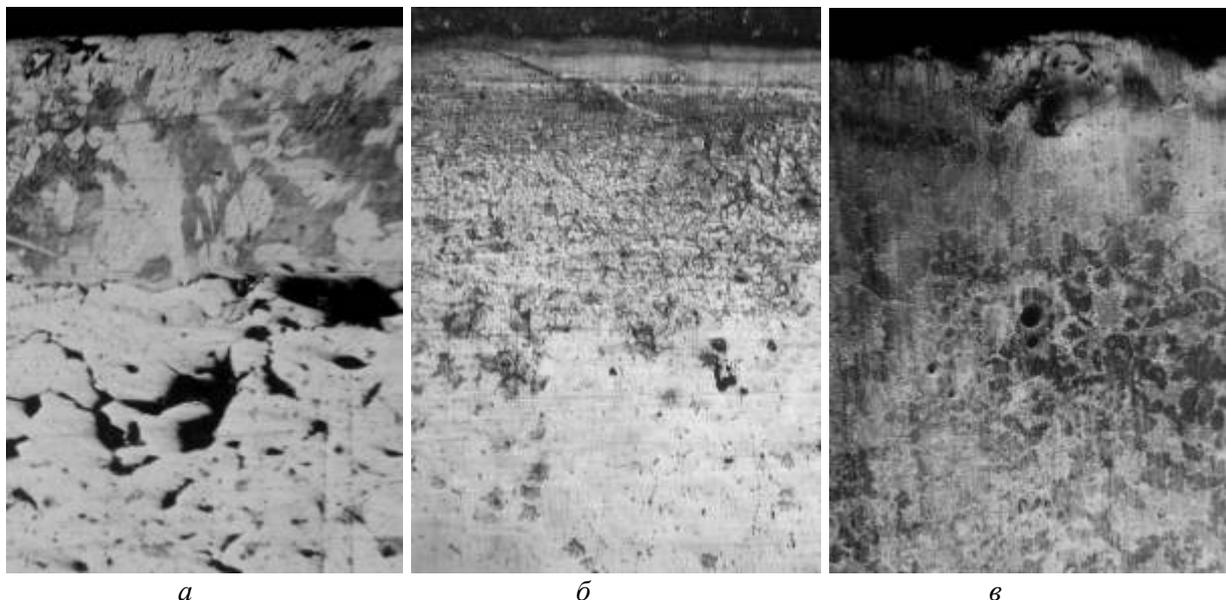
Исходными материалами для исследования служили сплавы на основе меди: БрАЖМц-10-3-1,5, БрАМц-9-2 и ЛМцЖ-55-4. В качестве насыщающей среды использовали смесь порошков следующих материалов: оксида хрома ( $Cr_2O_3$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), металлических титана, кремния и алюминия, хлорида аммония ( $NH_4Cl$ ) и йода ( $I_2$ ). Обработку проводили при температурах 800...900 °С в течение 0,5...1,0 ч.

На основании анализа реакций, проходящих при химико-термической обработке в режиме теплового самовоспламенения порошковой смеси, а также результатов экспериментов и металлографических исследований, разработали схему образования упрочненных слоев на медных сплавах. Данный 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. Далее 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, при которой активные атомы кремния, молибдена и других элементов начинают диффундировать в подложку. На завершающей стадии – стадии изотермической выдержки – происходит диффузионный рост покрытия [4]. Кривая изменения температуры на протяжении процесса СВС представлена на рис. 1.



**Рисунок 1** – Изменение температуры на протяжении процесса СВС

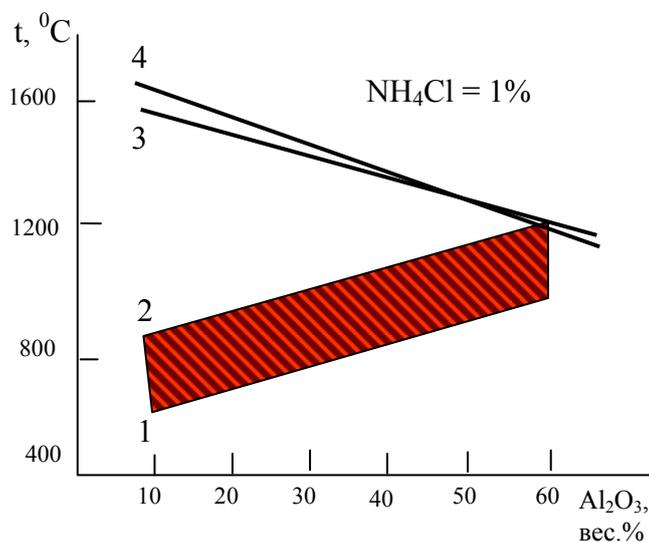
Большие скорости сгорания изменяют соотношение длительностей различных технологических стадий. Если в печной технологии синтез является одной из самых медленных стадий в общем технологическом цикле «сырье – продукты», то в СВС-технологии – самой быстропотекающей стадией. Благодаря этому обстоятельству промышленная организация СВС ставит задачу совершенствования вспомогательных операций [5].



а) БрАМц-9-2; б) БрАЖМц-10-3-1,5; в) ЛМцЖ-55-4-1  
**Рисунок 2** – Микроструктура титаноалюмосилицированных покрытий, полученных методом СВС на сплавах меди, x 100

Выбранный метод поверхностного упрочнения обеспечивает высокое качество поверхности, является наиболее простым и удобным в лабораторной практике, хорошо воспроизводимым в условиях производства и не требует специального сложного оборудования для своей реализации.

В результате диффузионного поверхностного насыщения в условиях СВС были получены алюмотитаносилицированные покрытия на медных сплавах. При этом максимальная толщина покрытий составляла 30...70 мкм. Микроструктуру полученных покрытий исследовали на микроскопе «Neophot-2» (рис. 2).



- 1 - температура начала восстановления оксида хрома;
- 2 - температура начала восстановления титана, кремния;
- 3 - температура окончания реакции (эксперимент);
- 4 - температура окончания реакции (расчет)

**Рисунок 3** – Влияние добавки инертного компонента на температуру начала и окончания реакции в СВС-смеси:

С повышением содержания алюминия в смеси толщина титаноалюмосилицированных слоев увеличивается [2]. Наружная зона титаноалюмосилицированного слоя представляет собой эвтектид ( $\alpha+\gamma_2$ ) и выделения интерметаллидной фазы. Средняя зона данного слоя характеризуется доэвтектидной смесью  $\alpha+(\alpha+\gamma_2)$ . Внутренняя зона титаноалюмосилицированного слоя состоит из  $\alpha$ -твердого раствора алюминия в меди. Тем самым на поверхности титаноалюмосилицированных бронз и латуни формируются слои  $Cu_2Al$ , легированные титаном и кремнием, с микротвердостью  $\approx 6500$  МПа. В алюминиде меди наблюдаются включения силицида  $Ti_5Si_3$  с микротвердостью  $\approx 10000$  МПа. Следует отметить, что образование защитного слоя осуществляется встречной диффузией элементов через решетку образующихся фаз, то есть наращивание диффузионной зоны происходит одновременно с обеих сторон.

При изучении влияния добавки инертного компонента на температуру начала и окончания процесса насыщения образцов в условиях СВС была установлена прямая пропорциональная зависимость влияния количества добавки на температуру процесса (рис. 3).

Все исследуемые образцы с алюмотитаносилицированным покрытием подвергали испытанию на жаростойкость при температурах  $800...900$  °С на воздухе. Жаростойкость диффузионных покрытий определяли по привесу массы образцов на единицу площади поверхности и по изменению микроструктуры диффузионных слоев после испытания. Испытания образцов с покрытием, полученным в условиях СВС, показали улучшение в  $1,8...2,5$  раза показателей жаростойкости по сравнению с незащищенными образцами.

Химико-термическая обработка в режиме СВС существенно повышает износо-и окалиностойкость 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.

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  $25$  кг.

Были приняты следующие условия трения, соответствующие условиям эксплуатации узлов:  $V_{ск} = 1,5$  м/с,  $P = 0,8$  МПа. Поведение диффузионно-насыщенных образцов в условиях испытаний на износ показало перспективность поверхностного легирования как метода повышения износостойкости сплавов меди.

Механическими испытаниями на сжатие установлено, что роль диффузионного слоя не ограничивается только функциями защиты поверхности образцов, но оказывает существенное влияние на ее объемные свойства. Диффузионное насыщение сплавов титаном, алюминием и кремнием повышает предел прочности при сжатии на  $52$  %.

В результате испытания на истирание было установлено, что применение одно- и двухкомпонентных покрытий менее целесообразно, чем многокомпонентных. Титаноалюмосилицирование при определенном соотношении вводимых компонентов и при одновременном поверхностном легировании бронз и латуни, которое позволяет получить максимальную износостойкость металла.

*Выводы*

1. По сравнению с традиционными режимами комплексного легирования в порошках титана, алюминия, кремния и соответствующих переходных металлов исследуемый процесс имеет свои преимущества и позволяет получать диффузионные слои большей толщины.

2. В результате испытаний было установлено, что титаноалюмосилицированные защитные покрытия, наносимые на бронзовые и латунные образцы методом СВС, имеют высокие характеристики коррозионной стойкости, износостойкости и предела прочности при сжатии.

3. Варьирование температуры и состава насыщающих сред в достаточно узком диапазоне значений параметров приводит к существенным изменениям в толщине и фазовом составе покрытий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин В. А. Листы и ленты из тяжелых цветных металлов (производство, свойства, применение): Справочник / В. А. Головин, Г. Н. Кручер. – М.: Металлургия, 1985. – 384 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г. В. Борисенко, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин [и др.] – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Серета Б. П. Поверхнєве зміцнення матеріалів / Б. П. Серета, Н. Є. Калініна, І. В. Кругляк (Монографія). – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2004. – 230 с.
4. Серета Б.П. Поверхностное упрочнение меди и медных сплавов в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Б. П. Серета, І. В. Кругляк, Д. О. Кругляк // Металургія: наукові праці ЗДІА. – 2010. – Вип. 21. – С. 132-136.
5. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтеза материалов / А. Г. Мержанов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.

Стаття надійшла до редакції 13.10.2010 р.  
Рецензент, проф. Т.В. Критська