

**СЕКЦИЯ Е**  
**ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА, ТОРГОВЛИ, РЕКЛАМЫ**

УДК 621.793.

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕДИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ**

*А. А. Болдуева, доктор техн. наук, профессор О. Г. Девоино, канд. техн. наук, доцент М. А. Кардаполова, И. М. Косякова, БНТУ, г. Минск*

*Резюме – в статье приведены результаты упрочнения поверхности железоуглеродистых сплавов путем комбинированной обработки – плазменного напыления бронзового порошка с последующим лазерным модифицированием нанесенного покрытия.*

*Ключевые слова: газотермические покрытия, модифицирующие компоненты, физико-механические характеристики, параметры лазерной обработки, микроструктура, фазовый состав.*

**Введение.** Для решения проблем восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей, на замену которых ежегодно расходуются огромные средства, используются методы плазменного напыления [1]. В качестве материалов для повышения износостойкости и антифрикционных свойств поверхностей трения широкого распространения получили материалы на основе меди, в частности бронзы. Медные сплавы обладают высокими коррозионными свойствами, но из-за гранецентрированной структуры имеют малую твердость, пластичны, не обладают достаточным сопротивлением износу, при нагреве теряют термическую стабильность, при этом медь дорогой и дефицитный материал [2]. Сложнолегированные бронзы имеют оптимальное сочетание триботехнических свойств, однако, в процессе эксплуатации при удельных нагрузках свыше 6МПа происходит их быстрое разрушение [3]. Поэтому, создание для различных изделий из стали покрытия на основе бронзы, с износостойкостью 2-3 раза выше, чем у стандартных бронз является актуальной задачей для промышленности.

**Основная часть.** В настоящее время имеется большое количество антифрикционных сплавов на медной, стальной или алюминиевой основах. Исходя из экономических соображений и доступности получения материалов, в качестве материала для напыления выбрана порошковая алюминиевая бронза БрА7Н6Ф, с зернистостью порошка 40...100 мкм.

Таблица 1–Химический состав БрА7Н6Ф

Элементы	Al	Ni	P	Cu
Процентное содержание, (%)	7	5,5	1	86,5

При подготовке поверхности деталей к следующему напылению покрытий необходимо очистить поверхности детали от различного вида загрязнений и создать необходимую шероховатость, обеспечивающую хорошее сцепление покрытия с основой.

Для подготовки поверхности выбрана дробеструйная обработка – обдув колотой дробью. Для того чтобы процесс был максимально приближен к производственным условиям, все исследования по напылению антифрикционных материалов проводились на стандартной плазменной установке типа УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и с использованием плазмотрона типа ПП-25. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа в настоящей работе был выбран азот технический.

При выборе легирующих компонентов для модификации бронзовых покрытий принималось во внимание: способность данного компонента образовывать с материалом основы высокотвердые соединения, т.е. формирование в структуре покрытия вторичной упрочняющей фазы; упрочнение твердого раствора данным компонентом; смачиваемость компонента медью в расплавленном состоянии, т.е. возможность образования первичных твердых упрочняющих фаз. Легирующими компонентами, отвечающими всем требованиям, оказались WC, TiB<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Si [4]. Согласно металлографическому и рентгеноструктурному анализу определено, что карбид вольфрама хорошо смачивается медью, хотя вольфрам с медью не взаимодействуют в твердом состоянии. В легированном твердом растворе бронзового покрытия со шликерной обмазкой WC выявлены следующие фазы: WC (30%), W<sub>2</sub>C (5-7%), алюминиды меди (25%), Cu<sub>3</sub>P и CuO (по 5-7%). В случае использования диборида титана механизм его воздействия подобен тому, который наблюдался при использовании монокарбида вольфрама. Диборид титана при лазерной обработке частично разлагается с образованием моноборида TiB, в результате – оба соединения присутствуют в покрытии приблизительно в равном количестве, а титан при этом не вступает в твердый раствор. При применении в качестве шликерной обмазки карбидов хрома бронзовое покрытие, модифицированное лазером, включает карбиды хрома (20-25%, в основном Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) и алюминиды меди (25-30%), распределенные в твердом растворе хрома в меди. Кремний активно реагирует с медью, в результате чего после лазерной химико-термической обработки в поверхностном слое появляются силициды меди, вместе с которыми присутствуют оксиды меди и кремния, а также небольшое количество непрореагировавшего кремния.

Указанные компоненты в виде шликера наносились на поверхность газотермического покрытия (толщиной 0,6 мм) из алюминиевой бронзы БрА7Н6Ф. Толщина шликерной обмазки на покрытии составляла порядка 0,1 мм. В качестве связующего использовался клей БФ-2. Лазерное модифицирование газотермических покрытий из бронзы проводили на оптоволоконном лазере серии IPG максимальной мощности 2 кВт, длиной волны 1,07 мкм и транспортным волокном 50 мкм, меняя диаметр луча от 1 до 3 мм и скорость обработки от 200 до 700 мм/мин (рисунок 1). Эти режимы обеспечивали стабильный переплав покрытия на всю глубину и ширину зоны с

минимальным влиянием на основу (сталь 45) и, что немаловажно, одинаковый фазовый состав [5]. Перемещение детали относительно лазерного луча осуществляли с помощью токарного станка.

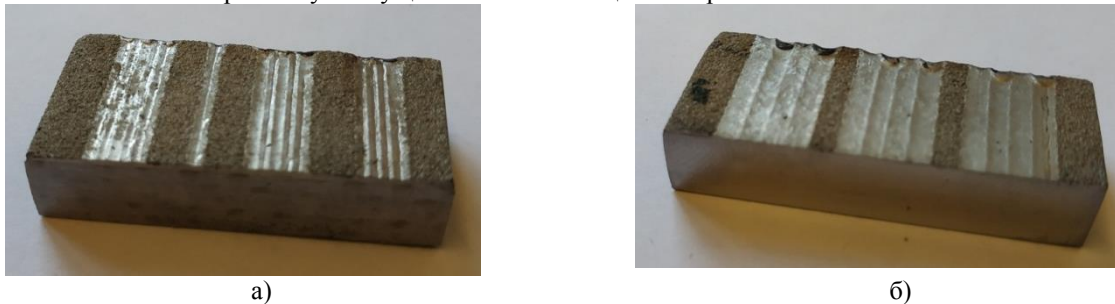


Рисунок 1 – Внешний вид лазерных дорожек бронзового покрытия при диаметре лазерного луча: а) 1 мм, б) 3 мм

Исследования структуры металла осуществлялись с использованием металлографического анализа шлифов на микроскопах «Mef-3» фирмы «Reichert» (Австрия).

Исследования микроструктуры покрытий напыленной порошковой бронзы, оплавленной при различных режимах с обмазкой (рисунок 2, б и 3) показали, что после сквозного проплавления (рисунок 3, б) она состоит из легированных дендритов твердого раствора, между ветвями которых кристаллизуются мелкодисперсные высокотвердые фазы (карбиды вольфрама и хрома, бориды титана). При неполном энерговкладе введенные фазы из обмазки не успевают раствориться полностью (рисунок 3, а), но покрытие остается работоспособным и может быть рекомендовано для работы в условиях трения с абразивом. Неоплавленное покрытие (рисунок 2, а) содержит большое количество оксидов.

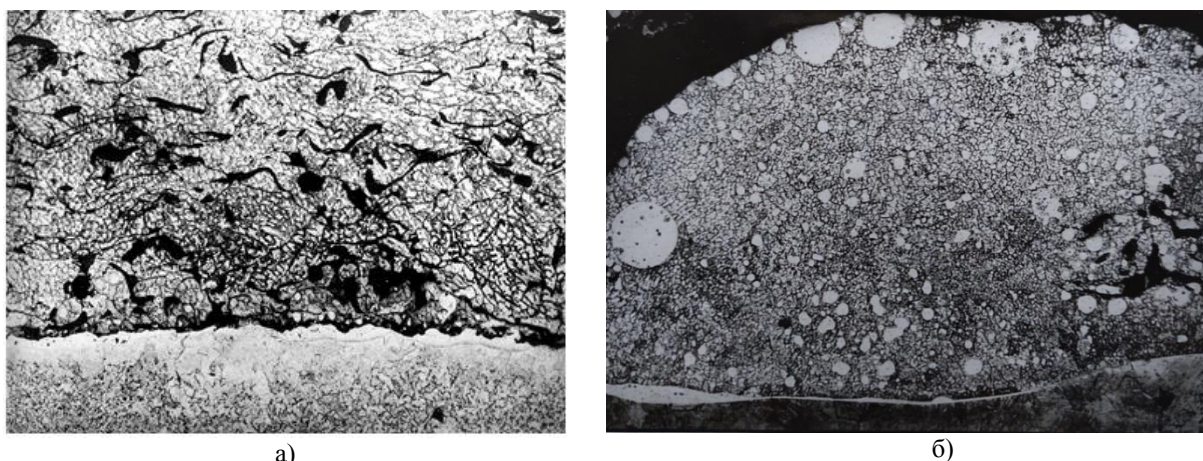


Рисунок 2 – Микроструктура покрытия из бронзы БрА7Н6Ф, х200:  
а) без оплавления; б) легированной карбидом вольфрама, скорость 200 мм/мин, диаметр 3 мм

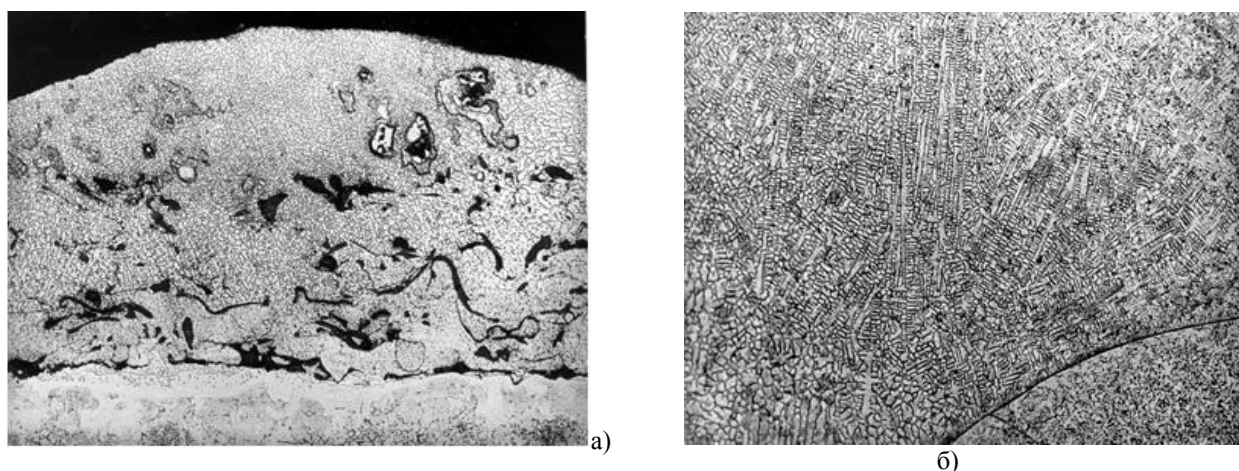


Рисунок 3 – Микроструктура покрытия из бронзы БрА7Н6Ф, х200: а) обработка лучом лазера с неполным расплавлением; б) обработка лучом лазера со сквозным переплавом

Измерение микротвердости зон упрочнения проводились с помощью микротвердомеров ПМТ-3 при нагрузке 100 г. по ГОСТ 9450-76. Микротвердость поверхностного слоя напыленной бронзы составляет 2,5 – 3,1 ГПа.

На рисунке 4 представлены графики изменения микротвердости по глубине упрочненного слоя после легирования различными компонентами со скоростями лазерного луча 100, 300, 600 мм/мин. и диаметром луча 2 мм. Микротвердость поверхностного слоя  $H_{\mu 100}$  линейно коррелирует (коэффициент корреляции составляет 0,95) со скоростью обработки, изменяясь:

- от 3,0 до 7,0 – 7,9 ГПа у покрытия, легированного WC;
- от 3,0 до 6,8–7,6 у покрытия, легированного  $Cr_3C_2$ ;
- от 3,0 до 7,0–7,3 у покрытия, легированного  $TiB_2$ ;
- от 3,0 до 6,6–7,0 у покрытия, легированного Si.

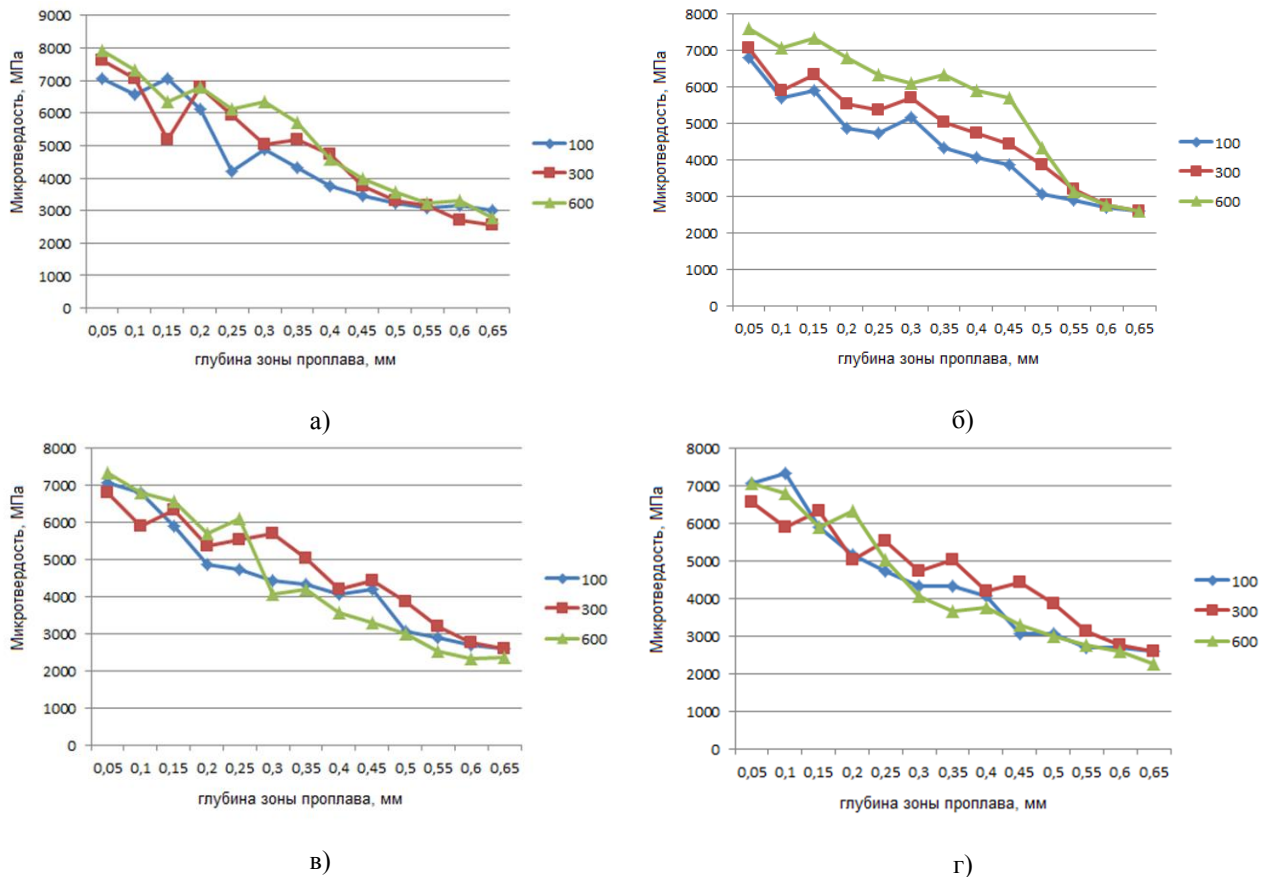


Рисунок 4 – Микротвердость бронзы БрА7Н6Ф, при различных скоростях движения луча лазера, диаметр 2 мм, легированной:  
а) WC; б)  $Cr_3C_2$ ; в)  $TiB_2$ ; г) Si.

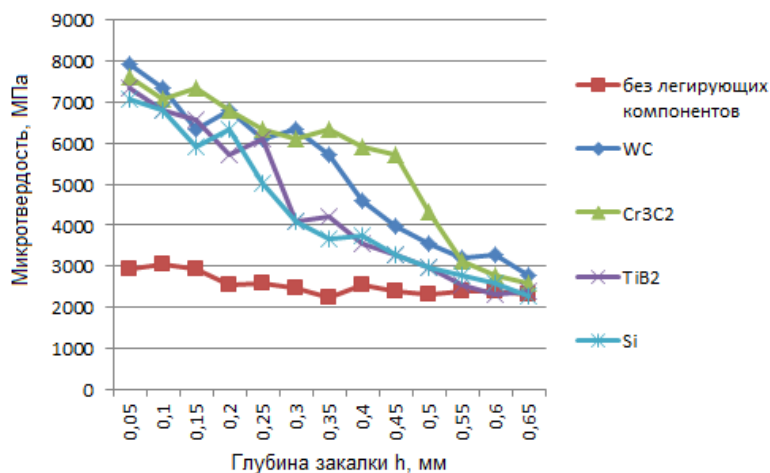


Рисунок 5 – Зависимость микротвердости ( $H_{\mu 100}$ ) и глубины зоны лазерной закалки ( $h$ , мм) покрытий на основе бронзы при скорости 600 мм/мин от легирующих компонентов

Наибольшая микротвердость получена у покрытия, легированного карбидом вольфрама за счет легирования вольфрамом матрицы сплава и большой твердости равномерно расположенных карбидных составляющих  $W_2C$  (рисунок 5).

**Заключение:** Полученные экспериментальные данные процессов лазерного легирования бронзы БрА7Н6Ф. показали увеличение микротвердости в 2-2,5 раза по сравнению неоплавленным покрытием из бронзы. Освоение технологии позволит увеличить физико-механические и эксплуатационные свойства деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов, И.О. Исследование влияния нанокремниевых компонентов на твердость композиционных газотермических покрытий / И.О. Соколов, Д.В. Куис, Д.Н. Лобко // Техника и технологии: инновации и качество: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Барановичи: БарГУ, 2017. – С. 76-78.
2. Попов, В.О. Лазерное модифицирование бронз и нержавеющей сталей. / В.О. Попов, Т.Г. Чеснокова // РИТМ. – 2018. – №7. – С. 32-33.
3. Мальцев, М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М: Металлургия, 1970. – 368 с.
4. Болдуева, А.А. Лазерное модифицирование бронзовых плазменных покрытий / А.А. Болдуева, О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, И.М. Косякова // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: Материалы 16-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 18-ой междунар. научно-техн. конф. – Программный комитет С.В. Харитончик, А.В. Данильченко [и др.]. – 2020.
5. Девойно, О.Г. Получение износостойких композиционных порошковых покрытий оплавлением модифицирующих обмазок лазерным лучом / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова // прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Вып.16. – С. 56-65.

УДК 691.9.048.4

#### МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Е. И. Воробьева, доктор техн.наук, профессор Н. М. Чигринова, БНТУ, г. Минск*

*Резюме – предложен вариант расширения технологических возможностей серийного оборудования для анодного микродугового оксидирования за счет использования системы квазикатодов сетчатой формы в электролизной ванне и дополнительного ультразвукового воздействия с целью интенсификации электрохимических и диффузионных процессов и получения термодинамически стабильных оксидов обрабатываемого металла, что приводит к повышению сплошности покрытия, увеличению его коррозионной стойкости и минимальным энергетическим потерям.*

*Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамикоподобные покрытия, квазикатоды, энергия ультразвуковых колебаний.*

Устройство для электрохимического нанесения защитных покрытий относится к технологическому оборудованию, предназначенному для электролитической обработки поверхностей деталей и изделий, выполненных из металлов и сплавов, в частности, к технологическому оборудованию для осуществления микродугового оксидирования, и может быть использовано в различных отраслях промышленности, в том числе в машиностроении, приборостроении, авиационной, химической, электронной и электротехнической промышленности. Технология анодного микродугового оксидирования применяется для формирования керамикоподобных покрытий на основе оксидной керамики на поверхностях вентильных металлов, к которым относятся алюминий, титан, тантал, цирконий и их сплавы. Оксидная керамика формируется на основе термодинамически стабильных оксидов обрабатываемого металла. Для осуществления процесса микродугового оксидирования (МДО) объектов из вентильных металлов с высокой интенсивностью химических реакций и стабильностью искрения необходимо расширение технологических возможностей серийного оборудования с целью получения керамикоподобных покрытий улучшенного качества. Эта задача может быть достигнута тем, что в устройстве для электрохимического нанесения керамикоподобных покрытий методом МДО содержится источник питания постоянного тока, сменные держатели для обрабатываемых заготовок, конструкции которых приспособлены для удержания в растворе объектов любой конфигурации и размеров, рабочая ванна с электролитом, на днище и боковых стенках которой укреплены акустические пакеты, обеспечивающие постоянное с ультразвуковой частотой перемешивание электролита, и варьлируемое количество дополнительных квазикатодов сетчатой формы, ориентирование которых в пространстве ванны обеспечивается за счет их крепления на сетчатом каркасе с легко изменяющейся конфигурацией направляющих.

Применение ультразвукового барботажа электролита в ванне, оснащенной акустическими пакетами, через которые с помощью ультразвукового генератора мощностью 4,2 кВт и частотой 22 кГц происходит ее «озвучивание» в процессе всего цикла обработки, стандартные приемы приготовления и регенерации