

УДК 621.79:536.2

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доц.заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

А.А. КУРИЛЕНКОмладший научный сотрудник¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

В.С. АЛЕКСАНДРОВАнаучный сотрудник¹

E-mail: alixvera58@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13.08.2018.

ОСОБЕННОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

В статье выполнено физико-математическое моделирование динамического воздействия расплава на наноразмерную частицу в процессе формирования покрытий индукционной центробежной наплавкой. Определены силы, действующие на частицу, находящуюся в жидком расплаве во время изотермической выдержки при индукционной центробежной наплавке. Получена зависимость, определяющая скорость смещения наноразмерных частиц от начального положения в жидком расплаве при наплавке покрытия. Разработан метод формирования покрытий с наноразмерными добавками индукционной центробежной наплавкой, включающий предварительную подготовку бронзовой шихты. Показано, что введенная наноразмерная добавка в количестве 4 масс.% в порошковую шихту оловянистой бронзы, по предложенному методу, приводит к ее фазово-структурным превращениям, позволяющим достигнуть более высоких антифрикционных свойств бронзы, поскольку обеспечивается равномерное распределение твердой структурной составляющей по всему объему покрытия. Обнаруженные факторы приводят к повышению триботехнических свойств покрытий — снижению коэффициента трения при одновременном повышении износостойкости и микротвердости покрытий.

Ключевые слова: индукционная наплавка, индукционный нагрев, бронзовая шихта, наноразмерные добавки, динамическое воздействие, антифрикционные покрытия

Введение. В последние годы успешно используется в промышленности индукционная центробежная наплавка, которая является экономичным и простым в реализации методом нанесения антифрикционных покрытий на внутренние поверхности вкладышей подшипников скольжения, втулок поворотных устройств и других осесимметричных деталей трибосопряжений, имеющих внутренние полости [1–5]. Технологии наплавки обеспечивают наибольшую прочность сцепления покрытий, минимальную пористость, восстановление при максимальных износах и отличаются простотой выполнения операций. Наплавку порошковых материалов можно осуществлять практически на любые стали, она позволяет создавать биметаллические изделия, у которых выгодно сочетаются свойства наплавленного и основного металлов. Для этого применяют различные антифрикционные сплавы, диспергированные до частиц средним размером от 0,2 до 1,5 мкм. Как правило, обеспечение повышенных значений износостойкости и износостойкости по-

крытий достигается за счет добавок в шихту специальных наполнителей, известных из технологий порошковой металлургии, однако на их применение в методах динамической наплавки накладываются ограничения реологические особенности расплавленной шихты.

Показано [6–9], что одним из возможных и эффективных путей повышения триботехнических свойств наносимых покрытий является введение в шихту наноразмерных модификаторов, обуславливающих протекание необходимых фазово-структурных превращений. У покрытий с наноразмерными добавками, размер зерен менее 100 нм, происходит резкое улучшение физических характеристик. Наноразмерные частицы не только обладают высокой термической стабильностью, но и эффективно тормозят движение дислокаций, что приводит к устранению несовершенств структуры в создаваемых антифрикционных покрытиях и обеспечивает повышение уровня функциональных свойств, увеличение износостойкости и микротвердости, уменьшение коэффициента трения.

Основной проблемой остается равномерное распределение наноразмерных добавок в объеме покрытия и способ их введения.

Цель исследования — разработка технологии формирования покрытий с наноразмерными добавками индукционной центробежной наплавкой для узлов деталей машин и трибосопряжений технологического оборудования. Для достижения поставленной цели потребовалось разработать физико-математическую модель динамического воздействия расплава на наноразмерную частицу в процессе формирования покрытий индукционной центробежной наплавкой, изучить механизм введения наноразмерных тугоплавких добавок в наплавляемую порошковую шихту.

Оборудование, материалы, методика эксперимента. Поскольку среди антифрикционных материалов наиболее широкое распространение получили медные сплавы в виде латуней и бронз, то в исследованиях в качестве основного компонента шихты использовался порошок бронзы БрОФ10-1 (рисунок 1) состава: Cu — 86,9÷90,6%; Sn — 9÷11%; P — 0,4÷1,1%; примеси — 1%, с размером сферических частиц в диапазоне 240–315 мкм ГОСТ 28377-89. Для модифицирования бронзового порошка использовали наноразмерные частицы тугоплавких соединений карбида титана TiC и оксида алюминия Al₂O₃, синтезированные методом газофазного осаждения в восстановительной атмосфере аммиака и водорода. Наноразмерная добавка вводилась в количестве 4 масс.% и имела два состава с различным содержанием наноразмерных добавок (таблица 1).

Индукционная центробежная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный индуктор, программный регулятор

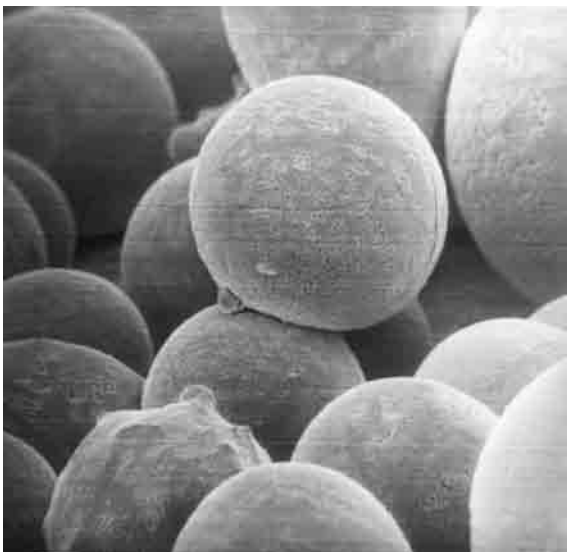


Рисунок 1 — Порошок оловянистой фосфористой бронзы БрОФ10-1 (×500)

Figure 1 — Powder of BrOF10-1 tin phosphorous bronze (×500)

Таблица 1 — Состав наноразмерных добавок, массовая доля в шихте Q, %

Table 1 — Composition of nanosized additives, mass fraction in charge Q, %

№	Состав	Q, %		
		TiC	Al ₂ O ₃	BN
1	26% TiC — 35% Al ₂ O ₃ — 10% BN	1,02	1,37	0,39
2	30% TiC — 45% Al ₂ O ₃	1,18	1,74	—

ТРМ 151 (ООО «Овен»), оптический пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции ОИМ НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 об/мин. Температура нагрева контролировалась пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВПР-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. При наплавке шихта размещалась в полости стальной втулки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-88). После наплавки, втулки с покрытиями подверглись механической обработке.

Структурно-фазовое состояние покрытий исследовалось методами металлографического и дюрOMETрического анализов. Морфология поверхности образцов покрытия изучалась металлографическим анализом на микроскопе МИМ-8, обеспечивающим цифровую регистрацию изображений. Для исследования структуры поверхности частиц БрОФ10-1 использовали сканирующий электронный микроскоп MIRA фирмы TESCAN (Чехия). Триботехнические испытания выполнялись на призматических образцах размером 10 × 6 × 6 мм в режиме граничного трения на трибометре МТВП-2 в среде синтетического масла 10W-40 по схеме возвратно поступательного скольжения контртела (материал Сталь 65Г) относительно неподвижного образца. Скорость скольжения составляла 0,1 м/с, номинальное давление p в процессе испытаний было различным 30, 50, 70 МПа. Продолжительность испытаний на каждое из давлений составляло $L = 1100$ м. В процессе триботехнических испытаний регистрировались коэффициент трения f , массовый износ Δm , определяемый по потере массы взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200 и интенсивность изнашивания $I_g = \Delta m / L$. Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,2 и 0,5 Н.

Физико-математическая модель динамического воздействия на наноразмерную частицу. Используемые ранее модели процесса индукционной центробежной наплавки не позволяют оценить влияние наноразмерных добавок на процесс формирования покрытия. В связи с этим при моделировании рассматривался процесс индукционной центробежной наплавки покрытия с наноразмерными

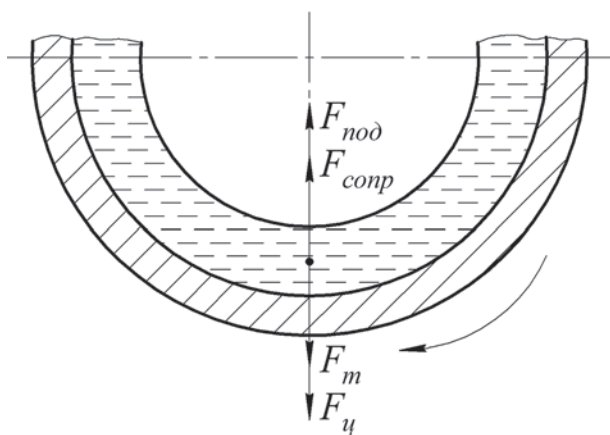


Рисунок 2 — Силы, действующие на наноразмерную частицу, погруженную в жидкий металл при индукционной центробежной наплавке

Figure 2 — Forces applied to nanoscale particle immersed in liquid metal during induction centrifugal surfacing

добавками на цилиндрической заготовке в момент изотермической выдержки (рисунок 2), когда расплавленный металл образует сплошное кольцо покрытия на внутренней поверхности заготовки, температура расплава постоянна и одинакова во всем объеме расплава.

При этом сделаны следующие допущения:

- отсутствует теплообмен между заготовкой и окружающей средой;
- расплавленный металл — несжимаемая жидкость;
- все частицы расплава имеют одинаковую угловую скорость, равную угловой скорости заготовки;
- отсутствуют силы смачивания и поверхностного натяжения расплава.

На погруженную в жидкий металл наноразмерную частицу действуют различные силы (см. рисунок 2), смещающие ее от своего первоначального месторасположения [10], что влечет трудности с равномерным распределением наноразмерных частиц в расплаве. Поскольку наноразмерные частицы обладают высокой поверхностной энергией, при введении в расплав они образуют конгломераты размером до 5 мкм, что не позволяет обеспечить стабильность свойств и требуемый уровень качества покрытий. Поэтому, для определения того, что происходит с частицами, рассмотрели действующие на нее силы [11–13].

Тело, погруженное в жидкость и вращающееся вместе с нею, находится под действием силы гидростатического давления, направленной к оси вращения и равной центробежной силе, развиваемой вытесненным объемом жидкости, откуда получаем, что подъемная сила равна:

$$F_{\text{под}} = V \cdot \omega^2 R' \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{м}}); \quad (1)$$

$$R' = \sqrt{\frac{2}{5}} R, \quad (2)$$

где $F_{\text{под}}$ — подъемная сила, действующая на частицу, погруженную в жидкий металл, Н; V —

объем частицы, погруженной в жидкий металл, м³; $\rho_{\text{в}}$ — плотность материала частицы, кг/м³; $\rho_{\text{м}}$ — плотность жидкого металла, кг/м³; ω — угловая скорость, рад/с; R' — радиус центра сил инерции частицы, м; R — внутренний радиус цилиндрической заготовки, м.

Сила лобового сопротивления, действующая на сферические объекты с очень маленькими числами Рейнольдса, в непрерывной вязкой жидкости:

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi \cdot r_{\text{в}} \eta \cdot v, \quad (3)$$

где $F_{\text{сопр}}$ — сила гидродинамического сопротивления, Н; $r_{\text{в}}$ — радиус частицы, м; η — вязкость жидкого металла, Па·с; v — скорость частицы, м/с.

$$v = \frac{d^2 \omega^2 R' (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{м}})}{18\eta}, \quad (4)$$

где d — диаметр частицы, м.

Уравнения для остальных сил, действующих на наноразмерную частицу в процессе индукционной центробежной наплавки:

$$F_{\text{м}} = mg; \quad (5)$$

$$F_{\text{ц}} = m \cdot \omega^2 R, \quad (6)$$

где $F_{\text{под}}$ — сила тяжести, Н; m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, 9,8067 м/с²; $F_{\text{ц}}$ — центробежная сила, Н; ω — угловая скорость заготовки, рад/с; R — внутренний радиус цилиндрической заготовки, м.

Основной задачей расчета являлось обеспечение стабильности свойств и надлежащего уровня качества покрытий с наноразмерными добавками, которое обеспечивается за счет их равномерного распределения в объеме покрытия. В рассматриваемом процессе индукционной центробежной наплавки, седиментация наноразмерных частиц в наплавляемых слоях проходит под действием сил, описанных выше. В связи с этим были определены режимы индукционной наплавки, размеры детали, свойства наплавляемых материалов, чтобы уравновесить силы, действующие на наноразмерную частицу.

Был выполнен оценочный расчет действующих на частицу сил, учитывая экспериментальные исследования. В качестве наноразмерной добавки использован TiC, плотность которого $\rho_{\text{в}} = 4930$ кг/м³, радиус частицы $r_{\text{в}} = 20 \cdot 10^{-9}$ м, угловая скорость заготовки $\omega = 157,096$ рад/с (1500 об/мин), внутренний радиус цилиндрической заготовки $R = 0,05$ м. Материал покрытия БрОФ10-1, для жидкофазных бронзовых сплавов плотность $\rho_{\text{м}} = 8300-8900$ кг/м³, и динамическая вязкость $\eta = 0,0033$ Па·с (при температуре 1100–1200 °С).

При подстановке исходных данных в (1)–(6) получили, что некоторые силы имеют отрицательный знак, который показывает, что сила направлена к свободной поверхности жидкого металла. Составив уравнение, действующих на частицу сил, в зависимости от их направления, и подставив

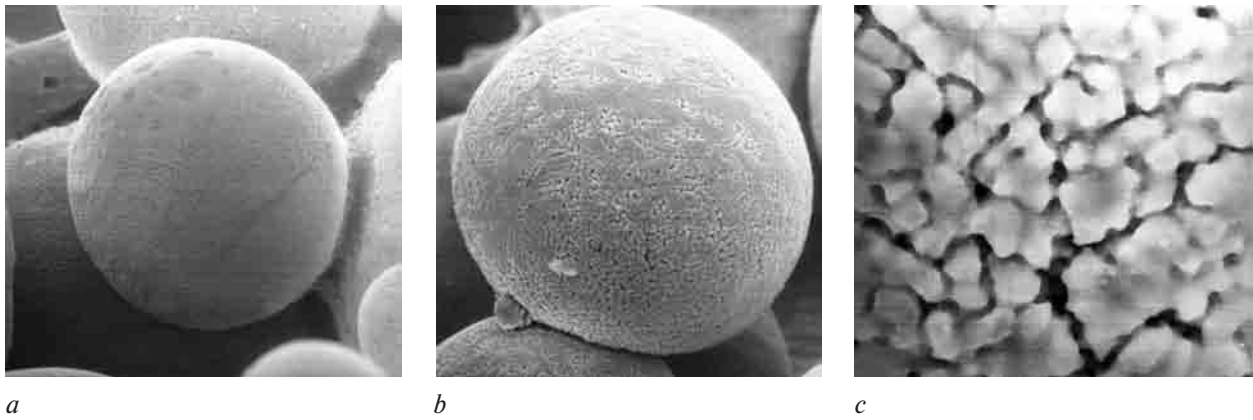


Рисунок 3 — Структура поверхности частиц БрОФ10-1 до предварительной подготовки шихты (а), после предварительной подготовки шихты (b, c): a — $\times 1000$; b — $\times 1000$; c — $\times 7500$

Figure 3 — Structure of BrOF10-1 particles surface before preliminary preparation of charge (a), after preliminary preparation of charge (b, c): a — $\times 1,000$; b — $\times 1,000$; c — $\times 7,500$

численные значения, получили, что действующие на частицу силы в левой и правой части приблизительно равны.

$$F_{\text{под}} + F_{\text{сопр}} = F_m + F_{\text{ц}};$$

$$1,9714 \cdot 10^{-16} \approx 2,0543 \cdot 10^{-16}.$$

Отсюда следует, что перемещение наноразмерной частицы в жидком металле маловероятно.

Таким образом, используя данный расчет, становится возможным выбрать материал и технологические режимы индукционной центробежной наплавки, при использовании которых смещение наноразмерных частиц от своего первоначального месторасположения будет незначительным и можно считать, что наноразмерные добавки в расплаве распределены равномерно. Это обеспечит стабильность свойств покрытия по всему его объему и надлежащий уровень качества покрытий. Кроме этого расчет позволяет подбирать режимы наплавки для целенаправленного смещения наноразмерных добавок в необходимых пределах. В связи с этим, для упрощения расчетов и большей наглядности численной оценки, определим скорость смещения наноразмерных частиц при изотермической выдержке при индукционной центробежной наплавке покрытия.

Записав баланс сил и выразив скорость движения наноразмерной частицы погруженной в жидкий металл, получили уравнение:

$$v = \frac{2 \cdot r_b^2}{9 \cdot \eta} \cdot (\rho_b \cdot g + \omega^2 (R \cdot \rho_b - R' \cdot (\rho_b - \rho_{\text{ж}}))), \quad (7)$$

где v — скорость включения, м/с; r_b — радиус включения, м; η — вязкость жидкого металла, Па·с; ρ_b — плотность материала включения, кг/м³; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкого металла, кг/м³; g — ускорение свободного падения м/с²; ω — угловая скорость, рад/с; R — внутренний радиус цилиндрической заготовки, м; R' — радиус центра сил инерции частицы, м.

Экспериментальные исследования. Для устранения несовершенств структуры и обеспечения по-

вышенного уровня износостойкости и снижения коэффициента трения, был разработан метод введения в состав исходной порошковой шихты наноразмерных частиц тугоплавких соединений, позволяющих достигать диспергирования структурных составляющих и равномерного их распределения.

Формирование антифрикционного покрытия при использовании разработанного метода включает предварительную подготовку шихты — нагрев бронзового порошка до температуры 200–300 °С с последующим резким охлаждением со скоростью 0,3–0,5·10³ град/с — для получения более рельефной поверхности и формирования микротрещин на бронзовых частицах. Структура поверхности частиц БрОФ10-1 представлена на рисунке 3. Проведенные исследования показали, что относительная площадь трещин на поверхности частиц $S_{\text{отн}}$ (8) значительно возрастает при увеличении скорости охлаждения бронзового порошка $v_{\text{охл}}$ до 300 град/с (рисунок 4).

$$S_{\text{отн}} = \frac{S_1}{S_{\text{общ}}}, \quad (8)$$

где S_1 — площадь поверхности, покрытая трещинами, %; $S_{\text{общ}}$ — общая площадь поверхности частицы, %.

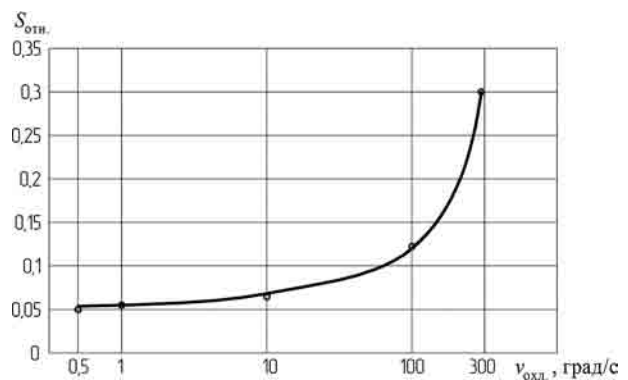


Рисунок 4 — Зависимость относительной площади трещин на поверхности частиц от скорости охлаждения
Figure 4 — Dependence of relative crack area on particle surface on cooling rate

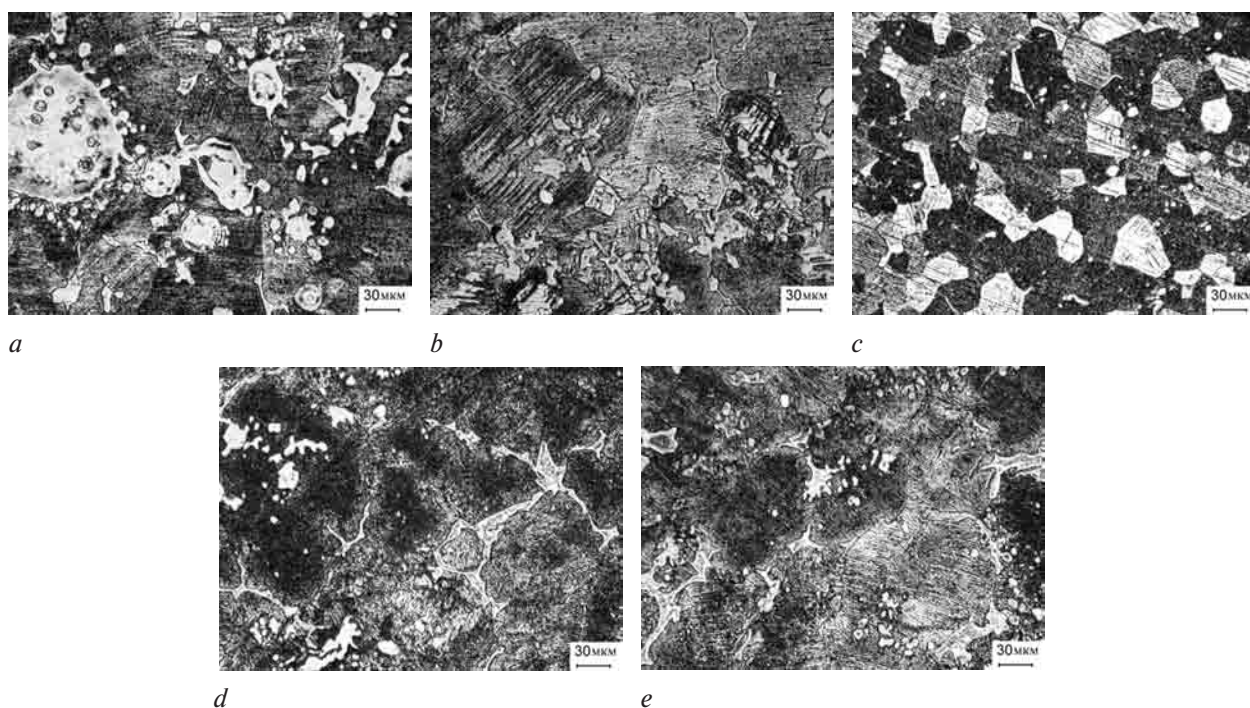


Рисунок 5 — Микроструктура поверхности покрытий из BrOF10-1 без добавок (а), с наноразмерной добавкой № 1 (b, c), с наноразмерной добавкой № 2 (d, e)
 Figure 5 — Microstructure of surface of coatings from BrOF10-1 without additives (a), with nanosized additive № 1 (b, c), with nanosized additive № 2 (d, e)

После предварительной обработки шихты, полученный порошок оловянистой бронзы смешивали с наноразмерными частицами TiC и α -Al₂O₃ (4% массы шихты) механохимическим методом [14, 15], для получения шихты для наплавки. Нормальное ускорение рабочих тел составляло 120–130 м/с², радиус круговых колебаний 4–6 мм, круговая частота 152 с⁻¹, продолжительность обработки 1,5 ч.

Затем в шихту добавляли порошки флюсующих материалов, перемешивали и размещали во внутренней поверхности втулки, осуществляли ее центробежное формование на установке, нагрев токами высокой частоты до температуры, обеспечивающей наплавку шихты, для BrOF10-1 это 1100 °С, и изотермическую выдержку при этой температуре. Полученные образцы были подвергнуты механической обработке, а затем исследованы.

Металлографический анализ показал, что на микроструктурах образцов немодифицированной

бронзы (рисунок 5 а) виден значительный разброс размера упрочняющих фаз в диапазоне 2–40 мкм в связи с ликвацией олова в твердом растворе. В образцах, модифицированных наноразмерной добавкой № 1 (см. рисунок 5 b, c), наблюдается диспергирование фаз эвтектоида, тенденция расположения частиц фаз вдоль границ зерен α -фазы. В образцах, модифицированных наноразмерной добавкой № 2 (см. рисунок 5 d, e), наблюдается резкое изменение структуры, бронза имеет полиэдрическое строение.

Анализ результатов исследований дюрометрических и триботехнических характеристик наплавленных покрытий (таблица 2, рисунок 6) показал, что введение наноразмерных добавок карбида титана и оксида алюминия в количестве 4 масс.% в порошковую шихту оловянистой бронзы приводит к ее фазово-структурным превращениям и повышению износостойкости в 2,33–2,65 раза, микротвердости в 1,39–1,41 раза при одновременном снижении коэффициента

Таблица 2 — Дюрометрические и триботехнические характеристики покрытий
 Table 2 — Durometric and tribotechnical characteristics of coatings

Характеристики		Бронза BrOF10-1	Бронза + добавка № 1	Бронза + добавка № 2
Микротвердость H_{μ} , МПа	до испытаний	2115	2957	2941
	после испытаний	2342	3292	3040
Интенсивность изнашивания $I_q \cdot 10^{-5}$, мг/м		27,7	10,44	11,88
Коэффициент трения f	30 МПа	0,019	0,0095	0,0095
	50 МПа	0,024	0,014	0,0125
	70 МПа	0,027	0,016	0,0136

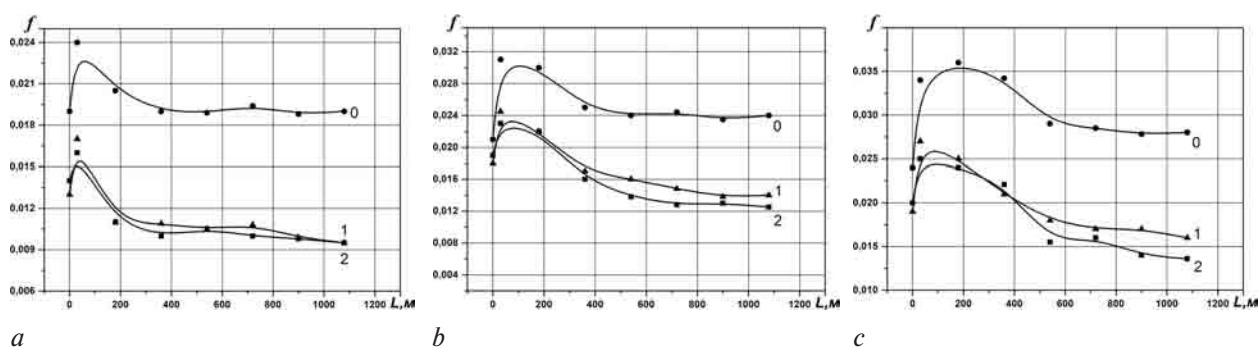


Рисунок 6 — Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний при различных нагрузках: a — 30 МПа; b — 50 МПа; c — 70 МПа образцов без добавок (0) с наноразмерной добавкой № 1 (1), № 2 (2)
 Figure 6 — Dependence of friction coefficient on duration of tests at different loads: a — 30 MPa; b — 50 MPa; c — 70 MPa of samples without additives (0), with nanosized additive № 1 (1), № 2 (2)

трения в зависимости от приложенной нагрузки в 2 раза при 30 МПа, в 1,71–1,92 раза при 50 МПа, в 1,68–1,98 раза при 70 МПа по сравнению с базовым покрытием.

Триботехническими испытаниями установлено (см. таблицу 2), что с увеличением нагрузки происходит увеличение коэффициента трения, причем для покрытий с наноразмерной добавкой состава № 1 коэффициент трения увеличивается в 1,68 раза, а для покрытий с наноразмерной добавкой № 2 увеличивается в 1,43 раза. Можно отметить, что абсолютные значения коэффициента трения у модифицированных покрытий значительно ниже, чем у покрытий из немодифицированной бронзы.

Заключение. В результате исследования антифрикционных покрытий, полученных по предложенному методу с использованием предварительной подготовки бронзовой шихты, и с использованием исследований динамического воздействия на наноразмерные частицы в процессе наплавки, показано, что введенная наноразмерная добавка в количестве 4 масс.% в порошковую шихту оловянистой бронзы приводит к ее фазово-структурным превращениям, позволяющим достигнуть более высоких антифрикционных свойств бронзы, поскольку обеспечивается равномерное распределение твердой структурной составляющей по всему объему наплавки. Фосфид улучшает литейные свойства, повышает твердость, прочность, износостойкость, упругие и антифрикционные свойства. Кроме того, возможно прямое включение наноразмерных частиц TiC и $\alpha-Al_2O_3$ или продуктов их фазово-структурного превращения в структуру бронзы. Обнаруженные факторы приводят к повышению триботехнических свойств покрытий — снижению коэффициента трения при одновременном повышении износостойкости и микротвердости покрытий. Таким образом, удалось получить антифрикционные покрытия с наноразмерными добавками и обеспечить их равномерное распределение, что позволило повысить качество наносимого покрытия.

Список литературы

1. Данильченко, Б.В. Наплавка / Б.В. Данильченко. — Киев: Наук. думка, 1983. — 75 с.
2. Рябцев, И.А. Индукционная наплавка / И.А. Рябцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2005. — № 11. — С. 37–40.
3. Gafo, Yu.N. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings / Yu.N. Gafo, I.A. Sosnovskij // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 48, No. 1–2. — 2009. — Pp. 105–111.
4. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худoley // Вестн. фонда фундаментальных исследований. — 2013. — № 3 (36). — С. 70–87.
5. Бабкин, В.Г. Литые металломатричные композиты / Бабкин В.Г., Тереньтев Н.А., Перфильева А.И. // Журнал Сибирского Федерального университета: Материаловедение и технологии. — 2014. — Т. 4, № 7. — С. 416–423.
6. Комаров, А.И. Синтез наноструктурированных тугоплавких наполнителей, их влияние на структуру и свойства силуминов / А.И. Комаров // Перспективные технологии: под ред. В.В. Клубовича. — Витебск: ВГТУ, 2015. — Т. 2, гл. 12. — С. 202–223.
7. Михеев, Р.С. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова. — Москва: Маска, 2013. — 356 с.
8. Использование наноструктурных модификаторов при индукционной центробежной наплавке антифрикционных порошковых покрытий / И.А. Сосновский [и др.] // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сб. материалов II Междунар. науч.-практич. конф. 27–28 мая 2010 г. — Минск: БНТУ, 2010. — С. 49–51.
9. Создание наноструктурированных композиционных модификаторов для сплавов алюминия / П.А. Витязь [и др.] // Докл. НАН Беларуси. — 2011. — Т. 55, № 5. — С. 91–96.
10. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учеб. Пособие: в 10 т. — Т. VI: Гидродинамика. — 3-е изд., перераб. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Наука. Пл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 736 с.
11. Ходаков, Г.С. Седиментационный анализ высокодисперсных систем / Г.С. Ходаков, Ю.П. Юдкин. — М.: Высш. шк., 1981. — 496 с.
12. Юдин, С.Б. Центробежное литье / С.Б. Юдин, М.М. Левин, С.Е. Розенфельд. — М.: Машиностроение, 1972. — 280 с.
13. Гуляев, Б.Б. Литейные процессы / Б.Б. Гуляев. — М.: Машгиз, 1960. — 416 с.
14. Ловшенко, Ф.Г. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов: монография / Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко. — Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. — 420 с.
15. Ловшенко, Ф.Г. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий: монография / Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко. — Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. — 215 с.

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.
Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

KURILYONOK Artem A.
Junior Researcher¹
E-mail: AKTO13@mail.ru

ALEXANDROVA Vera S.
Researcher¹
E-mail: alixvera58@gmail.com

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 13 August 2018.

PECULIARITIES OF CENTRIFUGAL INDUCTION MELTING OF TIN BRONZE WITH NANOSCALE ADDITIONS

The article presents the physico-mathematical modeling of the dynamic effect of the melt on a nanoscale particle during the formation of coatings by induction centrifugal surfacing. The forces acting on the particle in the liquid melt during the isothermal holding under induction prismatic welding are determined. A dependence is obtained that determines the rate of displacement of nano-sized particles from the initial position in the liquid melt during surfacing of the coating. A method for the formation of coatings with nano-sized additives is developed by induction centrifugal surfacing, including preliminary preparation of the bronze charge. It is shown that the introduced nanoscale additive in an amount of 4 wt.% to the powdered charge of tin bronze, according to the proposed method, leads to its phase-structural transformations, which allows achieving higher anti-frictional properties of bronze, since a uniform distribution of the solid structural component throughout the whole coating is ensured. The detected factors lead to an increase in the tribotechnical properties of coatings — a reduction in the coefficient of friction with simultaneous increase in wear resistance and micro-hardening of coatings.

Keywords: induction surfacing, induction heating, bronze charge, nanoscale additives, dynamic action, antifriction coatings

References

- Danilchenko B.V. *Naplavka* [Surfacing]. Kiev, Naukovaya Dumka Publ., 1983. 75 p.
- Zyabtsev I.A. Induktsionnaya naplavka [Induction weld]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Recovery. Modernization], 2005, no. 11, pp. 37–40.
- Gafo Yu.N., Sosnovskiy I.A. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2009, vol. 48, no. 1–2, pp. 105–111.
- Belyavin K.E., Sosnovskiy I.A., Khudoley A.L. Induktsionnyy nagrev v protsessakh tsentrobezhnogo naneseniya pokrytiy [Induction heating in the processes of centrifugal coating]. *Vestnik fundamentalnykh issledovaniy* [Bulletin of the Foundation for Fundamental Research], 2013, no. 3(36), pp. 70–87.
- Babkin V.G., Terentev N.A., Perfilova A.I. Liteye metallo-matrichnye kompozity [Cast metal matrix composites]. *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo universiteta: Materialovedenie i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University: Materials Science and Technology], 2014, vol. 4, no. 7, pp. 416–423.
- Komarov A.I. Sintez nanostrukturirovannykh tugoplavkikh napolniteley, ikh vliyaniye na strukturu i svoystva siluminov [Synthesis of nanostructured high-melting fillers, their influence on the structure and properties of silumins]. *Perspektivnye tekhnologii* [Advanced technologies], 2015, vol. 2, ch. 12, pp. 202–223.
- Mikheev R.S., Chernyshova T.A. *Alyumomatrichnye kompozitsionnye materialy s karbidnym uprochneniem dlya resheniya zadach novoy tekhniki* [Alumomatrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology]. Moscow, Maska Publ., 2013. 356 p.
- Sosnovskiy I.A., Gafo Yu.N., Kuznechik O.O., Klimentko S.E., Grudko I.I., Trembitskiy I.P. Ispolzovanie nanostrukturnykh modifikatorov pri induktsionnoy tsentrobezhnoy naplavke antifriktsionnykh pokrytiy [Use of nanostructured modifiers for induction centrifugal surfacing of antifriction coatings]. *Sbornik materialov 2 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Inzheneriya poverkhnostnogo sloya detaley mashin"* [Proc. 2th International Scientific and Practical Conference "Engineering of the surface layer of machine parts"]. Minsk, 2010, pp. 49–51.
- Vityaz P.A., Komarov A.I., Komarova V.I., Shipko A.A., Senyut V.T. Sozdanie nanosturirovannykh kompozitsionnykh modifikatorov dlya splavov alyuminiya [Creation of nanostructured composite modifiers for aluminum alloys]. *Doklady NAN Belarusi* [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus], 2011, vol. 55, no. 5, pp. 91–96.
- Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: Uchebnoye posobie. T. 6: Gidrodinamika* [Theoretical physics: Textbook. Vol. 6: Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p.
- Khodakov G.S., Yudkin Yu.P. *Sedimentatsionnyy analiz vysokodispersnykh sistem* [Sedimentation analysis of highly disperse systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 496 p.
- Yudin S.B., Levin M.M., Rozenfeld S.E. *Tsentrobezhnoe lite* [Centrifugal casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 280 p.
- Gulyaev B.B. *Liteynye protsessy* [Foundry processes]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 416 p.
- Lovshenko F.G., Lovshenko G.F. *Zakonomernosti formirovaniya fazovogo sostava, struktury i svoystv mekhanicheski legirovannykh materialov* [Regularities in the formation of the phase composition, structure, and properties of mechanically alloyed materials]. Mogilev, Belorussko-Rossiyskiy Universitet Publ., 2016. 420 p.
- Lovshenko F.G., Lovshenko G.F. *Kompozitsionnye nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye poroshki dlya gazo-termicheskikh pokrytiy* [Composite nanostructured mechanically alloyed powders for gas-thermal coatings]. Mogilev, Belorussko-Rossiyskiy Universitet Publ., 2013. 215 p.