

УДК 621.793

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, доцентзаведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин<sup>1</sup>

E-mail: mbelotser@gmail.com

**А.А. КУРИЛЕНКО**младший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин<sup>1</sup>

E-mail: AKTO13@mail.ru

**И.А. СОСНОВСКИЙ**старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин<sup>1</sup>

E-mail: sos3@tut.by

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13.04.2016.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

*Разработана математическая модель процессов индукционной наплавки порошковых материалов в исходном состоянии дисперсно-порошковой среды и содержащих в своем составе частицы упрочняющей фазы, представленной ультрадисперсными либо наноразмерными включениями тугоплавких оксидов или карбидов. Описаны результаты моделирования формирования контактных промежутков между частицами дисперсной фазы при упругом сжатии и влияние этого промежутка на характер перехода дисперсно-порошковой среды в твердотельное состояние. Предложены способы введения наноразмерных добавок в структуру покрытия. Разработанная модель позволяет рассчитывать режимы процесса наплавки с учетом особенностей дисперсно-порошковых сред, а также в условиях действия центробежных сил.*

**Ключевые слова:** порошковая шихта, антифрикционные покрытия, центробежная индукционная наплавка, наноразмерные компоненты, математическая модель

**Введение.** В машиностроении уделяется постоянное внимание развитию и совершенствованию технологий, способствующих получению деталей узлов трения и сопряжения, которые могут работать в условиях повышенных удельных механических и тепловых нагрузок, в том числе при ограниченной смазке или ее полном отсутствии [1–4]. При организации производства высоконагруженных деталей учитывается степень распространенности на предприятиях машиностроения необходимого технологического оборудования. Это обусловило применение методов газопламенного, плазменного напыления, электродуговой, лазерной, индукционной и электроконтактной наплавки износостойких и антифрикционных порошковых материалов [4–15]. При этом два последних метода относятся к наименее энергоемким технологиям.

К числу перспективных технологических приемов устранения несовершенств структуры в создаваемых антифрикционных покрытиях при индукционной наплавке относится включение в состав исходной порошковой шихты высокотвердых керамических наночастиц тугоплавких соединений — карбидов, нитридов, боридов, оксидов, позволяющих достигать диспергирования структурных составляю-

щих и равномерного их распределения [16, 17]. Следует ожидать, что модифицирование химического состава поверхности частиц наплавляемых порошков будет оказывать существенное влияние на процессы структурообразования покрытий. Особый интерес представляет введение в состав порошковой шихты комплексных модификаторов, включающих наночастицы тугоплавких соединений различной природы.

Целью работы, результаты которой представлены в данной статье, являлась разработка методов введения наноразмерных добавок в покрытие, обеспечивающих их равномерное распределение по объему.

**Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых материалов.** На первом этапе исследований были рассмотрены силы, действующие в системе «порошок — деталь» в процессе центробежной наплавки. Известно [3, 10, 11, 18, 19], что в состоянии свободной насыпки или упругого сжатия порошковая композиция представляет дисперсно-порошковую среду (ДПС), в которой дисперсной фазой являются твердотельные частицы (далее — частицы), а дисперсионной — окружающие эти частицы пустоты, которые могут заполняться газом, смесью газов, а в естественных условиях — воздухом с давлением порядка 100 кПа.

В зонах соприкосновения частиц возникают градиенты избыточных давлений и концентраций атомов с максимумами, лежащими в центрах контактных пятен частиц дисперсной фазы.

Учтем в разрабатываемой модели влияние седиментации на характер распределения образующейся в расплаве из дисперсно-порошковой среды дисперсно-упрочняющей фазы при индукционной наплавке, осуществляемой в поле центробежных сил. При этом отметим, что седиментация происходит, если направленное движение частиц под действием силы тяжести или центробежной силы преобладает над хаотическим тепловым движением частиц. Скорость седиментации зависит от массы, размера и формы частиц, вязкости и плотности среды, а также ускорения, возникающего при действии на частицы сил поля.

В исходном состоянии дисперсно-порошковой среды частицы упрочняющей фазы, представленной ультрадисперсными включениями тугоплавких оксидов или карбидов, распределены равномерно. Плотность этих частиц в два–три раза меньше плотности наплавляемого металла, составляющего основу порошковой композиционной системы, формирующей износостойкие и антифрикционные покрытия. Исходя из анализа работ [10, 11, 18], можно предположить, что до перехода дисперсно-порошковой среды в расплавленное состояние существенного перераспределения частиц упрочняющей фазы в ней не произойдет. При образовании расплава на эти частицы могут действовать силы тяжести, выталкивания, сопротивления, а также центробежные силы. Предположим, что эти силы уравновешены, тогда в определенных точках ци-

линдрической заготовки они будут направлены так, как показано на рисунке.

Если пренебречь силами смачивания и поверхностного натяжения расплава, то минимальная угловая скорость, обеспечивающая удержание в верхней точке (А) вращения цилиндрической заготовки при центробежной наплавке, может определяться по формуле:

$$\omega \geq \sqrt{\frac{g}{R_0 - h}}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — угловая скорость;  $g$  — ускорение свободного падения;  $R_0$  — внутренний радиус цилиндрической заготовки;  $h$  — толщина покрытия, м.

Условие равновесия в точках:

$$A: 0 = \overline{F_{ц.б.}} + \overline{F_{Арх.}} + \overline{mg} + \overline{F_{Ст.}}; B: 0 = \overline{F_{ц.б.}} + \overline{F_{Арх.}} + \overline{mg}.$$

В этом случае для стальных цилиндрических заготовок с радиусами порядка  $\sim 0,01-0,1$  м с толщинами наплавляемых покрытий порядка  $\sim 1$  мм минимальные угловые скорости будут иметь значения в пределах от 10 (для  $R_0 \sim 0,1$  м) до 33 (для  $R_0 \sim 0,1$  м) рад/с или 96–318 об/мин. При таких оборотах центробежное ускорение составит 1,2–1,6  $g$ . При таких угловых ускорениях, вплоть до угловых скоростей, обеспечивающих центробежное ускорение  $\leq 10 g$ , состояние равновесия в выбранных точках на рисунке будет определяться зависимостями:

$$\omega^2 (R_0 - X) = \frac{9}{2} \frac{\eta v}{r^2 \gamma_m} - \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) g; \quad (2)$$

$$\omega^2 (R_0 - X) = \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) g, \quad (3)$$

где  $R_0$  — внутренний радиус цилиндрической заготовки;  $X$  — глубина, на которой в расплаве достигается состояние равновесия;  $r$  — радиус частицы упрочняющей фазы;  $\gamma_0$  — плотность расплава;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Из анализа свойств зависимостей (2)–(3), схемы действия сил в выбранных точках равновесия, а также результатов действия центробежной силы расплава на ультрадисперсные частицы упрочняющей фазы следует, что в точке А на глубине погружения в расплав  $X$  эти частицы могут покоиться, в то время как в точке В они будут двигаться к поверхности расплава с некоторой постоянной скоростью. С учетом уравнения (3) скорость движения будет определяться зависимостью [13]:

$$v = \frac{2r^2}{9\eta} \left[ \omega^2 (R_0 - X) \gamma_m + (\gamma_0 - \gamma_x) \right]. \quad (4)$$

Исходя из зависимости (4), глубина, на которой в расплаве частицы будут переходить в состояние покоя при достижении точки А (см. рисунок), может определяться как

$$X(\omega) = R_0 - \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) \frac{g}{\omega^2}. \quad (5)$$

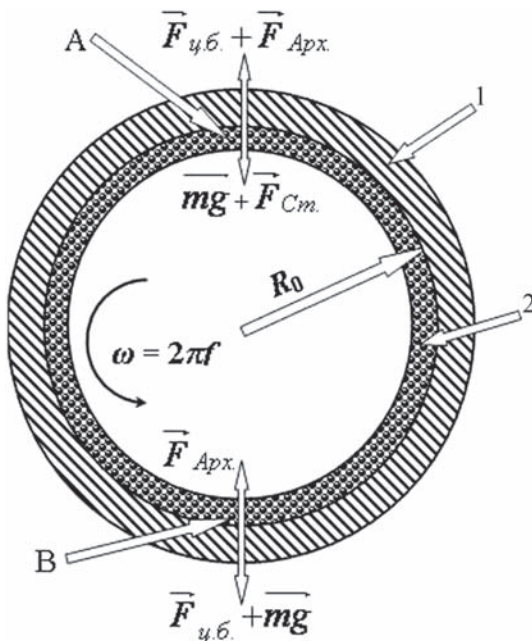


Рисунок — Схема действия сил в предполагаемых точках равновесия: 1 — заготовка; 2 — расплавленный слой покрытия;  $F_{ц.б.}$  — центробежная сила;  $F_{Арх.}$  — сила выталкивания (Архимеда);  $F_{Ст.}$  — сила сопротивления (Стокса);  $mg$  — сила тяжести;  $\omega$  — угловая скорость, рад/с;  $f$  — частота, Гц

Если центробежное ускорение вращающихся цилиндрических заготовок с внутренними радиусами порядка 0,01–0,1 метра превысит 10 g, то скорость ультрадисперсных частиц упрочняющей фазы следует рассчитывать по формуле [13]:

$$v = \frac{d(R_0 + X)}{dt} = \frac{2}{9} \frac{r^2(\rho_0 - \rho_x)\omega^2(R_0 + X)}{\eta}. \quad (6)$$

Полученные на основе разработанной модели результаты использованы при создании технологии введения наноразмерных модификаторов в состав наплавляемой шихты при индукционной центробежной наплавке и согласуются с теоретическими и экспериментальными данными, приведенными в работах [10–14].

**Введение наноразмерных модификаторов в состав наплавляемой шихты при индукционной центробежной наплавке.** Известны керамические композиционные материалы, получаемые путем спекания микропорошков оксида алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и карбида титана TiC, которые находят применение в качестве инструментальных материалов [19]. Микроразмерный порошок TiC также используется в качестве модификатора расплавов алюминиевых сплавов при создании алюмоматричных композиционных материалов [20]. Широкие возможности улучшения свойств материалов и покрытий триботехнического назначения открываются при их модифицировании наноразмерным порошком TiC, а также в его сочетании с другими керамическими тугоплавкими соединениями [16].

Для устранения несовершенств структуры в создаваемых антифрикционных покрытиях и обеспечения повышенного уровня их функциональных свойств, в том числе износостойкости и микротвердости, в состав исходной порошковой шихты добавляют наноразмерные частицы тугоплавких соединений, например керамических карбидов, нитридов, бори́дов, оксидов, позволяющих достигать диспергирования структурных составляющих и равномерного их распределения [16]. Модифицирование наноразмерными частицами оказывает существенное влияние на процессы структурообразования покрытий.

Предлагаемый метод формирования антифрикционного покрытия включает предварительную подготовку шихты — нагрев до температуры максимально линейного расширения с последующим резким охлаждением для получения более рельефной поверхности бронзовых порошинок. Предварительная подготовка шихты способствует лучшему перемешиванию и равномерному распределению в шихте наноразмерных частиц, а также повышает их сцепляемость, что позволяет улучшить структурные и триботехнические свойства наплавленного покрытия. Смешивание шихты с наноразмерными частицами тугоплавких соединений осуществляют механохимическим методом [21]. После предварительной подготовки шихту помещают в деталь и приступают к индукционной центробежной наплавке антифрикционного покрытия.

Введение наноразмерного карби́до-корундово-го модификатора в количестве 5 % в порошковую шихту приводит к ее фазово-структурным превращениям. Керамические тугоплавкие наночастицы TiC и  $\alpha$ -фазы, выступая в роли центров кристаллизации, способствуют образованию упрочняющих фаз наноразмерного диапазона (35–40 нм), которые образуются при более низких температурах, чем обычно. Кроме того, возможно прямое включение наночастиц TiC и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  или продуктов их фазово-структурного превращения в структуру покрытия, также способствующих уменьшению ликвации в покрытии. Данные факторы приводят к повышению триботехнических свойств покрытий — снижению коэффициента трения при одновременном повышении износостойкости и микротвердости. Таким образом возможно получить антифрикционные покрытия по предложенному методу с наноразмерными добавками и обеспечить их равномерное распределение в составе покрытия.

**Синтез наноразмерного модификатора в процессе формирования покрытия.** Анализ источников [22–24] показывает, что эффект упрочнения за счет увеличения центров кристаллизации и формирования стопоров дислокаций достигается при содержании нановключений оксидов, нитридов или карбидов, если их совокупная масса не превышает 0,5–1,5 % от общей массы покрытий. Непосредственное введение в порошок и перемешивание таких наночастиц может не обеспечить их равномерное распределение в шихте из-за эффекта механолегирования [23]. Учитывая относительно малую длительность процесса индукционной наплавки, это, в свою очередь, может также привести к неравномерному распределению нановключений в материале антифрикционного покрытия. Повышенное (свыше 1,5 %) содержание нановключений в отдельных областях материала антифрикционных покрытий способствует формированию дефектной структуры, которая способствует, с одной стороны, появлению и скоплению дислокаций, а с другой, при циклически меняющихся повышенных механических нагрузках, — трещинообразованию. Таким образом, повышенное содержание нановключений в отдельных областях материала антифрикционного покрытия способствует его разупрочнению.

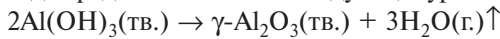
Снизить эффект механолегирования можно за счет введения в состав шихты раствора или суспензии, содержащей в полярном растворителе или полярной жидкости промежуточный продукт. При этом такой промежуточный продукт должен обеспечивать в результате химических превращений, в том числе в результате взаимодействия с окружающей средой (компонентами шихты, растворителя или жидкости, а также атмосферы) при температурах не выше температур наплавки, получение твердых, тугоплавких наночастиц. Наличие полярного растворителя в составе раствора или полярной жидкости в суспензии промежуточного продукта будет способ-

ствовать его относительно равномерному распределению в шихте при механическом смешивании. Всем этим требованиям удовлетворяет гидроксид алюминия  $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ , который при температурах ниже температуры наплавки разлагается до наноразмерного тугоплавкого оксида алюминия, а также обладает невысокой стоимостью и легкодоступностью [24–26].

Предлагаемая технология нанесения антифрикционного покрытия включает предварительный нагрев детали с шихтой до температуры  $500^\circ\text{C}$  с изотермической выдержкой  $\tau$ , при этой температуре протекает термическое разложение гидроксида алюминия  $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$  в наноразмерный (рентгеноаморфный) оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  согласно следующей реакции:  $2[\text{Al}(\text{OH})_3] \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ , после выдержки происходит дальнейший нагрев до температуры наплавки шихты и изотермическая выдержка при этой температуре.

При нагреве до температуры ниже  $300^\circ\text{C}$  из-за существования двух направлений фазовых превращений в ходе термического разложения на воздухе не образуется рентгеноаморфный оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При температуре выше  $500^\circ\text{C}$  уже не происходит процесс разложения, а начинается кристаллизация рентгеноаморфного оксида алюминия с образованием мелкокристаллической структуры.

Для определения времени, необходимого на протекание реакции, была рассмотрена реакция разложения гидроксида алюминия, которая в суммарном виде представляет собой следующее уравнение:



Для расчета суммарного теплового эффекта химической реакции следует воспользоваться законом Гесса, который гласит:

$$\Delta H_{\text{х.р.}} = \sum \Delta H_{\text{продуктов}} - \sum \Delta H_{\text{исходных}}$$

Стандартные энтальпии образования соединений взяты из справочников и составляют:

$$\Delta H^\circ (\text{Al}(\text{OH})_3)(\text{аморфн.}) = -1276,0 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta H^\circ (\text{H}_2\text{O})(\text{г.}) = -241,82 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta H^\circ (\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)(\text{кр.}) = -1675,7 \text{ кДж/моль}$$

Тогда суммарный тепловой эффект  $\Delta H_{\text{х.р.}} = (\Delta H^\circ (\text{H}_2\text{O}) + \Delta H^\circ (\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)) - \Delta H^\circ (\text{Al}(\text{OH})_3)$  и равен  $\Delta H_{\text{х.р.}} = (-241,82 + (-1675,7)) - (-1276,0) = -641,3 \text{ кДж/моль}$ . Из чего следует, что реакция эндотермическая и для своего протекания требует дополнительной тепловой энергии в количестве  $641,3 \text{ кДж/моль}$  исходного вещества. Так как молекулярная масса исходного гидроксида алюминия равна  $78 \text{ г/моль}$ , учитывая коэффициенты в суммарном уравнении реакции, получаем, что для образования  $0,5 \text{ моль } \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (молекулярная масса  $102 \text{ г/моль}$ ) требуется к  $1 \text{ моль}$  гидроксида алюминия приложить дополнительно  $641,3 \text{ кДж}$  тепловой энергии. В простейшем применении получаем, что при разложении  $78 \text{ г}$  гидроксида алюминия получается  $51 \text{ г}$  оксида алюминия.

Рассчитав количество оксида алюминия, которое образуется в конце реакции, получили, что мас-

са оксида алюминия, который образуется в ходе реакции термического разложения, равна  $65 \%$  от массы гидроксида алюминия.

Время нагрева рассчитывается по формуле:

$$\tau = \frac{Q}{N}, \text{ с}, \quad (7)$$

где  $Q$  — теплота, необходимая для протекания реакции, кДж;  $N$  — мощность нагревателя, кВт.

Теплота рассчитывается следующим образом:

$$Q = Q_{\text{разлож}} + Q_{\text{испарения}} + Q_{\text{реакцион}}, \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{разлож}} = 641,3 \cdot \eta;$$

$$\eta = m / 78,$$

где  $Q_{\text{разлож}}$  — теплота, необходимая для поддержания реакции вплоть до ее завершения, кДж;  $\eta$  — количество вещества гидроксида алюминия, моль;  $m$  — масса гидроксида алюминия, г.

$$Q_{\text{испарения}} = 2256 \cdot m_{\text{воды}},$$

где  $Q_{\text{испарения}}$  — теплота, необходимая на испарение воды, выделившейся из гидроксида алюминия, кДж;  $m_{\text{воды}}$  — масса воды, кг.

$$Q_{\text{реакцион}} = c \cdot m \cdot \Delta T,$$

где  $Q_{\text{реакцион}}$  — теплота, необходимая для нагрева гидроксида алюминия до температуры начала реакции, кДж;  $c$  — теплоемкость аморфного гидроксида алюминия,  $c = 87,248 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$ ;  $m$  — масса гидроксида алюминия, кг;  $\Delta T$  — температура протекания реакции дегидратации,  $\Delta T = 350 \text{ K}$ .

Проведем расчет мощности, передаваемой на поверхность нагреваемой детали, используя методики, описанные в [27–29].

Мощность, передаваемая на нагретую деталь, рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{т}} = \pi D_2 \cdot a \cdot p_0, \quad (8)$$

где  $P_{\text{т}}$  — полезная мощность на поверхности детали, Вт;  $D_2$  — наружный диаметр детали, м;  $a$  — ширина индуктора, м;  $p_0$  — удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup>.

$$p_0 = \frac{\eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{и}} \cdot P_{\text{г}}}{a \cdot \pi D_2}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{г}}$  — мощность генератора, Вт;  $\eta_{\text{тр}}$  — КПД трансформатора;  $\eta_{\text{и}}$  — КПД индуктора.

Удельную мощность  $p_0$  рассчитываем для внешней поверхности детали. Так как мы используем в расчете формулы для плоской волны, разворачивая нагреваемый слой по расчетному диаметру, то и удельную мощность следует пересчитать на расчетную поверхность слоя:

$$p'_0 = \frac{\eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{и}} \cdot P_{\text{г}}}{a \cdot \pi D'_2}, \quad (10)$$

где  $p'_0$  — приведенное значение удельной мощности, Вт;  $D'_2$  — приведенный диаметр для цилиндрической заготовки и наименьший размер сечения для прямоугольной заготовки, м.

$$D'_2 = D_2 - \xi, \quad (11)$$

где  $\xi$  — глубина слоя, в котором выделяется главная часть энергии индуктированного тока, м;  $\xi = \Delta$ , при



$\frac{D_2}{\Delta} \geq 5$ ;  $D_2$  — наименьший размер поперечного сечения заготовки, м.

Теория электромагнитного поля дает следующее выражение для глубины проникновения тока в плоском массивном проводнике [28]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}}, \quad (12)$$

где  $\Delta$  — глубина проникновения тока в проводнике, м;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз проницаемость материала проводника больше проницаемости вакуума;  $\omega$  — круговая частота, характеризует магнитное поле, Гц.

$$\omega = 2\pi f,$$

где  $f$  — частота тока установки ТВЧ, Гц.

$$\mu = \frac{\mu_b}{\mu_0},$$

где  $\mu_b$  — магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м.

Тогда формула расчета мощности, передаваемой на деталь, времени выдержки примет вид:

$$P_r = \frac{\eta_{тр} \cdot \eta_n \cdot P_r \cdot D_2 \cdot \eta_n}{D_2 - \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}}}, \text{ кВт.} \quad (13)$$

Подставим полученные формулы в выражение (7) и введем поправочный коэффициент  $k$ , учитывающий возможные потери:

$$\tau = k \cdot m_c \frac{(\Delta H_{xp} / M_c + 0,35 \cdot L \cdot 10^{-3} + \Delta T \cdot c \cdot 10^{-6})}{\eta_{тр} \cdot \eta_n \cdot \eta_n \cdot P_r \cdot D_2} \times \left( D_2 - \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu}} \right), \text{ с,} \quad (14)$$

где  $k$  — поправочный коэффициент,  $k = 1,3-1,5$ ;  $m_c$  — масса гидроксида алюминия, г;  $\Delta H_{xp}$  — суммарный тепловой эффект химической реакции,  $\Delta H_{xp} = 641,3$  кДж/моль;  $M_c$  — молярная масса гидроксида алюминия,  $M_c = 78$  г/моль;  $L$  — удельная теплота парообразования воды,  $L = 2256$  кДж/кг;  $\Delta T$  — изменение температуры, К;  $c$  — теплоемкость гидроксида алюминия,  $c = 87,248$  Дж/кг·К;  $D_2$  — наружный диаметр детали, м;  $\eta_{тр}$  — КПД трансформатора,  $\eta_{тр} = 0,85$ ;  $\eta_n$  — КПД индуктора,  $\eta_n = 0,75$ ;  $\eta_n$  — КПД преобразователя частоты установки ТВЧ, для ламповых  $\eta_n = 0,5$ ; для машинных  $\eta_n = 0,7$ ; для терристорных  $\eta_n = 0,85$ .

Подставим в выражение (14) постоянные величины, с учетом того, что нагрев происходит до температуры 500 °С, при этой температуре  $\mu = 16$ ,  $\rho = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ом·м:

$$\tau = \frac{21,244 \cdot m_c}{\eta_n \cdot P_r} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{7,92}{f \cdot D_2^2 \cdot 10^3}} \right), \quad (15)$$

где  $\tau$  — время выдержки, с;  $m_c$  — масса гидроксида алюминия, г;  $\eta_n$  — КПД преобразователя частоты установки ТВЧ;  $P_r$  — мощность нагревательного элемента установки ТВЧ, кВт;  $f$  — частота тока установки ТВЧ, Гц;  $D_2$  — наружный диаметр детали, м.

По закону Гесса был выполнен расчет суммарного теплового эффекта, а также получена зависимость (15) времени как функции, зависящей от массы добавок, вводимых в шихту, частоты тока установки ТВЧ, мощности нагревательного элемента установки ТВЧ и диаметра стальной втулки:  $\tau = f(m, f, P, D)$ . Предложенный метод отличается технологичностью, реакция термического разложения проходит при температуре 500 °С и не требует больших временных затрат, поэтому процесс наплавки можно продолжать дальше после изотермической выдержки. Таким образом, возможно получить антифрикционные покрытия с наноразмерными добавками в структуре, полученные термическим разложением микроразмерных добавок, обеспечив их равномерное распределение в составе покрытия. Это позволяет повысить триботехнические свойства покрытий — снижение коэффициента трения при одновременном повышении износостойкости и микротвердости.

**Заключение.** Разработанная модель индукционной наплавки порошковых материалов позволяет рассчитывать режимы процесса наплавки с учетом особенностей дисперсно-порошковых сред, а также в условиях действия центробежных сил, чтобы свести к минимуму перераспределение частиц упрочняющей фазы и наноразмерных частиц в расплаве покрытия.

Предложены технологические приемы введения наноразмерных добавок в структуру покрытия, причем как их непосредственное добавление в шихту, так и их термическое разложение из микроразмерного уровня в процессе наплавки, что можно использовать при формировании антифрикционных покрытий на контактных поверхностях высоконагруженных сопряжений.

## Список литературы

1. Современная трибология: Итоги и перспективы / под ред. К.В. Фролова. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — 480 с.
2. Гаркунов, Д.А. Триботехника (износ и безызносность): учеб. / Д.А. Гаркунов. — 4-е изд., доп. и перераб. — М.: МСХА, 2001. — 616 с.
3. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Путиная. — Киев: Наук. думка, 1980. — 404 с.
4. Ли, Р.И. Технология восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие / Р.И. Ли. — Липецк: ЛГТУ, 2014. — 379 с.
5. Гладкий, П.В. Плазменная технология. / П.В. Гладкий, Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев. — Киев: Экотехнология, 2007. — 292 с.
6. Фрумин, И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. — М.: Металлургия, 1961. — 424 с.
7. Костиков, В.И. Плазменные покрытия. / В.И. Костиков, Ю.А. Шестерин. — М.: Металлургия, 1978. — 160 с.
8. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев [и др.]. — М.: Металлургия, 1970. — 183 с.

9. Клименко, Ю.В. Электроконтактная наплавка / Ю.В. Клименко; под ред. Э.С. Каракозова. — М.: Металлургия, 1978. — 128 с.
10. Дорожкин, Н.Н. Получение покрытий методом припекания / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, В.И. Жорник. — Минск: Наука и техника, 1980. — 176 с.
11. Электрофизические методы нанесения металлических покрытий из металлических порошков / Н.Н. Дорожкин [и др.]. — Рига: Зинатне, 1985. — 131 с.
12. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин [и др.]. — Минск: Наука і тэхніка, 1993. — 159 с.
13. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов / К.Е. Белявин [и др.] // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. — Вып. 34, ч. 2. — 2013. — С. 58–71.
14. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновски, А.Л. Худолей // Вест. ФФИ. — 2013. — № 3(36). — С. 70–87.
15. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
16. 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.
17. Создание наноструктурированных композиционных модификаторов для сплавов алюминия / Витязь П.А. [и др.] // Докл. НАН Беларуси. — 2011. — № 5(55). — С. 91–96.
18. Бальшин, М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. — М.: Металлургия, 1978. — 184 с.
19. Матренин, С.В. Техническая керамика: учеб. пособие / С.В. Матренин, А.И. Слосман. — Томск: Изд-во ТПУ. — 2004. — 75 с.
20. Михеев, Р.С. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова. — М.: Матка, 2013. — 356 с.
21. Толбанова, Л.О. Методы получения наноматериалов: курс лекций / Л.О. Толбанова. — Томск: ТПУ, 2010. — 79 с.
22. Применение ультрадисперсных порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / А.Н. Черепанов [и др.] // Материаловедение. — 2000. — № 10 — С. 45–53.
23. Калинина, А.П. Структурообразование при охлаждении жидких металлов, содержащих ультрадисперсные частицы / А.П. Калинина. — Новосибирск: НГУ, 1999. — 105 с.
24. Получение нанокристаллов оксида алюминия в гидротермальных условиях / О.В. Альмяшева [и др.] // Неорганические материалы. — 2005. — № 5. — С. 1–8.
25. Иванова, А.С. Оксид алюминия: применение, способы получения, структура структура и кислотно-основные свойства / А.С. Иванова // Промышленный катализ в лекциях. — 2008. — № 8. — С. 7–61.
26. Очинский, В.Н. Получение металлургического глинозема под давлением пара при температурах ниже 1000°C / В.Н. Очинский, Ю.П. Насекан // Металлургия. — 2012. — № 7. — С. 26–33.
27. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
28. Гребенюк, В.Ф. Выбор конфигурации и расчет индуктора для высокочастотного нагрева: методические указания к курсовому и дипломному проектированию / В.Ф. Гребенюк, В.И. Хомутов, Е.В. Калмыков. — Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2002. — 31 с.
29. Корягин, Ю.Д. Индукционная закалка сталей: учеб. пособие / Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. — 52 с.

BELOTSERKOVSKY Marat A., Dr. Techn. Sc., Associate Professor  
Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Hardening of Machine Parts<sup>1</sup>  
E-mail: mbelotser@gmail.com

KURILYONOK Artem A.  
Junior Researcher<sup>1</sup>

SOSNOVSKIY Igor A.  
Senior Researcher<sup>1</sup>  
E-mail: sos3@tut.by

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 13 April 2016.

## THE THEORETICAL ANALYSIS OF THE PROCESS OF INDUCTION CENTRIFUGAL WELD DEPOSITION OF COATINGS WITH NANOSIZED MODIFIERS

*The mathematical model of the processes of induction weld deposition of powder materials in the initial state of dispersion-powder medium and containing the strengthening phase particles represented by ultrafine or nanosized inclusions of refractory oxides or carbides is developed. The results of the modeling of the contact gaps formation between the particles of the dispersed phase in the elastic compression and the impact of this period on the type of transition of dispersion-powder medium into solid state are described. The methods of implementation of nanosized additives in the coating structure are proposed. The developed model allows the calculation of weld deposition process modes with account for the dispersion-powder materials characteristics and centrifugal forces influence.*

**Keywords:** powder charge, anti-friction coatings, centrifugal induction weld deposition, nanosized components, mathematical model

## References

1. Frolov K.V. *Sovremennaja tribologija: Itogi i perspektivy* [Modern tribology: Results and Prospects]. Moscow, Izdatel'stvo LKI, 2008. 480 p.
2. Garkunov D.A. *Tribotehnika (iznos i bezyznosnost')* [Tribotechnology (wear and wearlessness)]. Moscow, MSHA, 2001. 616 p.
3. Fedorchenko I.M., Putina L.I. *Kompozicionnye spechennye antifrikcionnye materialy* [Composite sintered antifriction materials]. Kiev, Naukova dumka, 1980. 404 p.
4. Li R.I. *Tehnologija vosstanovlenija i uprochnenija detalej avtotraktornoj tehniki* [Technology of restoration and hardening of details of automotive engineering]. Lipetsk, LGTU, 2014. 379 p.
5. Gladkiy P.V., Pereplechikov E.F., Rjabcev I.A. *Plazmennaja tehnologija* [Plasma technology]. Kiev, Jekotehnologija, 2007. 292 p.
6. Frumin, I.I. *Avtomatskaja jelektrodugovaja naplavka* [Automatic arc welding]. Moscow, Metallurgija, 1961, 424 p.
7. Kostikov V.I., Shesterin Ju.A. *Plazmennye pokrytija* [Plasma coatings]. Moscow, Metallurgija, 1978. 160 p.
8. Tkachev V.N. [et al.]. *Indukcionnaja naplavka tverdyh splavov* [The induction hardfacing]. Moscow, Metallurgija, 1970. 183 p.
9. Klimenko Ju.V., Karakozva Je.S. *Jelektrokontaktnaja naplavka* [Electric-contact building-up welding]. Moscow, Metallurgija, 1978. 128 p.
10. Dorozhkin N.N., Abramovich T.M., Zhornik V.I. *Poluchenie pokrytij metodom pripekaniya* [Coating-making with sintering]. Minsk, Nauka i tehnika, 1980. 176 p.
11. Dorozhkin N.N. *Jelektrofizicheskie metody nanesenija metallicheskih pokrytij iz metallicheskih poroshkov* [Electrophysical methods of metal powders application]. Riga, Zinatne, 1985. 131 p.
12. Dorozhkin N.N. [et al.]. *Centrobezhnoe pripekanie poroshkovyh pokrytij pri peremennyh silovyh vozdejstvija* [The centrifugal sintering of powder coatings with variable impact power]. Minsk, Navuka i tjehnika, 1993. 159 p.
13. Belyavin K.E. [et al.]. *Impul'snye jelektrofizicheskie tehnologii poluchenija pokrytij i modifikirovanija poverhnosti materialov* [Pulsed electrical technology for coatings and surface modification of materials]. *Trudy Metallurgija* [Proc. of Metallurgy], 2013, no. 34, pp. 58–71.
14. Belyavin K.E., Sosnovski I.A., Hudoley A.L. *Indukcionnyj nagrev v processah centrobezhnogo nanesenija pokrytij* [Induction heating processes centrifugal coating]. *Vestnik fonda fundamental'nyh issledovanij* [The bulletin of fundamental research fund], Minsk, 2013, no. 3(36), pp. 70–87.
15. Grigoryanc A.G. *Osnovy lazernoj obrabotki materialov* [Fundamentals of laser materials processing]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 304 p.
16. Komarov A.I., Klubovich V.V. *Sintez nanostrukturirovannyh tugoplavkih napolnitelej, ih vlijanie na strukturu i svojstva siluminov* [Synthesis of nanostructured refractory fillers, their influence on the structure and properties of silumin]. *Perspektivnye tehnologii* [Advanced technologies], Vitebsk, 2015, vol. 2, pp. 202–223.
17. Vityaz P.A. [et al.]. *Sozdanie nanostrukturirovannyh kompozicionnyh modifikatorov dlja splavov aljuminija* [Creation of nanostructured composite modifiers for aluminum]. *Dokl. NAN Belarusi* [NASB reports], 2011, no. 5(55), pp. 91–96.
18. Balshin M.Ju., Kiparisov S.S. *Osnovy poroshkovej metallurgii* [Fundamentals of powder metallurgy]. Moscow, Metallurgija, 1978. 184 p.
19. Matrenin S.V., Slosman A.I. *Tehnicheskaja keramika* [Technical ceramics]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2004. 75 p.
20. Miheev R.S., Chernyshova T.A. *Aljumomatrixnye kompozicionnye materialy s karbidnym uprochneniem dlja reshenija zadach novoj tehniki* [Aluminium matrix composite materials with carbide hardening to meet challenges of emerging technologies]. Moscow, Maska, 2013. 356 p.
21. Tolbanova L.O. *Metody poluchenija nanomaterialov: kurs lekcij* [Methods for producing nanomaterials: lectures]. Tomsk, Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet, 2010. 79 p.
22. Cherepanov A.N. [et al.]. *Primenenie ul'tradispersnyh poroshkov dlja uluchshenija svojstv metallov i splavov* [The use of ultrafine powders to improve the properties of metals and composites]. *Materialovedenie* [Materials science], 2000, no. 10, pp. 45–53.
23. Kalinina A.P. *Strukturoobrazovanie pri ohlazhdenii zhidkih metallov, sodержashhij ul'tradispersnye chasticy* [Structure formation during cooling of liquid metals, containing ultrafine particles]. Novosibirsk, NGU, 1999. 105 p.
24. Al'mjashveva O.V. [et al.]. *Poluchenie nanokristallov oksida aljuminija v gidrotermal'nyh uslovijah* [Preparation of aluminium oxide at hydrothermal conditions]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 2005, no. 5, pp. 1–8.
25. Ivanova A.S. *Oksid aljuminija: primenenie, sposoby poluchenija, struktura i kislotno-osnovnye svojstva* [Aluminium oxide: usage, methods of preparation, structure and properties of the acid-base]. *Promyshlennyj kataliz v lekcijah* [Industrial catalysis in lectures], 2008, no. 8, pp. 7–61.
26. Ochinskiy, V.N., Nasekan Ju.P. *Poluchenie metallurgicheskogo glinozema pod davleniem para pri temperaturah nizhe 1000 °S* [Preparation of metallurgical alumina under a pressure at temperatures below 1000 °C]. *Metallurgija* [Metallurgy], 2012, no.7, pp. 26–33.
27. Sluhockiy A.E., Ryskin S.E. *Induktory dlja indukcionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad, Jenergija, 1974. 264 p.
28. Grebenyuk V.F., Homutov V.I., Kalmykov E.V. *Vybor konfiguracii i raschet induktora dlja vysokochastotnogo nagreva: metodicheskie ukazaniya k kursovomu i diplomnomu proektirovaniju* [Configuring and inductor calculation for high-frequency heating: methodical instructions to course and degree engineering]. Orenburg, GOU VPO OGU, 2002. 31 p.
29. Koryagin Ju.D., Filatov V.I. *Indukcionnaja zakalka stalej: ucheb. posobie* [Induction steel hardening]. Chelyabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2006. 52 p.