

УДК 621.793

А.А. КУРИЛЕНОК

младший научный сотрудник¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук

заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

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

Поступила в редакцию 20.01.2018.

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ ШИХТ

Разработана физико-математическая модель процесса формирования покрытий с наноразмерными модификаторами 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 индукционной центробежной наплавке покрытий, для различных материалов и технологических режимов. Реализация модели позволяет подобрать материалы и технологические режимы, сводящие к минимуму неоднородность концентрации частиц упрочняющей фазы и наноразмерных частиц в расплаве покрытия, либо, в зависимости от поставленной задачи, модель позволяет подобрать режимы наплавки для целенаправленного смещения наноразмерных частиц в необходимых нам пределах. Показано практическое применение полученных результатов для частиц TiC размером 20 нм.

Ключевые слова: физико-математическая модель динамического воздействия, порошковая шихта, антифрикционные покрытия, центробежная индукционная наплавка, наноразмерные модификаторы

Введение. Постановка задачи. Любая схема центробежного индукционного формования покрытий [1–4] представляет собой простейший вариант реализации технологии нанесения порошковых покрытий с наличием необходимых операций. Нагрев, вращение и их отличительные особенности исполнения определяют индивидуальную сущность процесса и характеризуются:

- расположением детали в пространстве;
- расположением источника тепла относительно нагреваемой поверхности;
- расположением осей вращения по отношению к оси детали.

На состав основных и вспомогательных операций, порядок и методы их реализации влияет первоначально выбранная схема наладки. Наладка представляет собой конструктивный вариант используемой нагрузки в колебательном контуре индукционной установки. Вместе с тем она отображает технологическую схему процесса и является основой для разработки технической документации (чертежей заготовки, индуктора, центров, крышек и прочей оснастки), проведения необходимых расчетов. При этом исходной схемой наладки заранее предусматривается вариант

осуществления операции засыпки порошка, метод его холодного формования (растеканием по поверхности при вращении, заполнением зазоров, впадин, проточек, углублений и т. д.), исполнение вида нагрева (локальный или пространственный) и его типа (внутренний или наружный) в операциях горячего формования, выбор для данных габаритов (диаметра, толщины стенки, длины и формы) заготовки необходимой мощности и частоты индукционной установки, конструкции индуктора (цилиндрического, полосового, секторного рамочного и т. д.), а также конструкции установки, обеспечивающей определенный принцип закрепления, центровки, вращения и съема заготовки. Кроме того, от исходной схемы наладки зависит выбор расчетных тепловых моделей для определения режимов нагрева и охлаждения.

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 были добавлены наноразмерные частицы тугоплавких соединений, и достигнуты диспергирования структурных составляющих и их

равномерного распределения [5, 6]. Допущения, использовавшиеся ранее при моделировании процесса индукционной центробежной наплавки, не позволяют оценить влияние наноразмерных модификаторов на процесс наплавки.

В связи с этим цель работы заключается в построении физико-математической модели процесса формирования покрытий с наноразмерными модификаторами (НРМ) индукционной центробежной наплавкой для различных материалов и технологических режимов. Это позволяет подобрать материалы и технологические режимы, сводящие к минимуму в условиях действия центробежных сил неоднородность концентрации частиц упрочняющей фазы и наноразмерных частиц в покрытии, либо, в зависимости от поставленной задачи, модель позволит подобрать режимы наплавки для целенаправленного смещения наноразмерных частиц в необходимых нам пределах.

Методика исследования. К настоящему времени разработаны и широко применяются различные схемы индукционной центробежной наплавки покрытий, использующие различные составы наплавляемых материалов, в зависимости от решаемых технологических задач. Вариант наиболее часто используемой в центробежном нанесении покрытий простейшей схемы показан на рисунке 1. Схема обеспечивает возможность осуществления технологии на оборудовании, исключающем необходимость продольного перемещения для нагрева заготовки относительно индуктора или, наоборот, индуктора относительно заготовки.

Используя установку центробежной индукционной наплавки (конструкции ОИМ НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 об/мин, включающую генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен»),

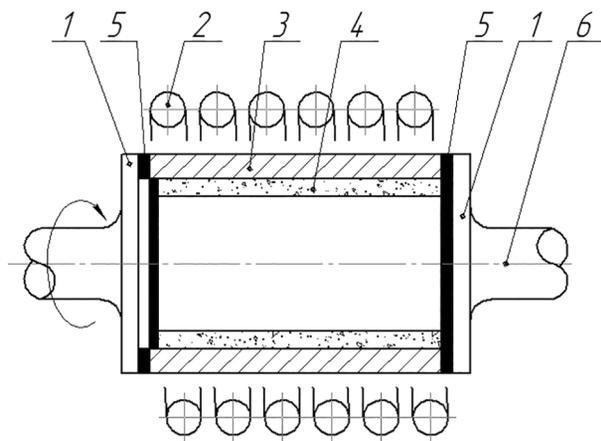


Рисунок 1 — Схема индукционной центробежной наплавки:
1 — прижимные крышки; 2 — индуктор; 3 — деталь;
4 — прилегаемый порошок; 5 — прокладки;
6 — собственная ось детали

инфракрасный пирометр TemPro-2200, были проведены исследования с целью определения возможности формирования покрытий.

Схема имеет горизонтальную ось вращения и отличается наружным расположением источника тепла по отношению к нагреваемой основе и слою. Для осуществления процесса центробежного формирования необходимо равномерное распределение порошка по внутренней поверхности. Оно осуществляется растеканием порошковой засыпки, обладающей достаточно хорошей сыпучестью. Сначала с помощью индукционных токов происходит разогрев вращающейся стальной цилиндрической заготовки до температур возможного фазового перехода из твердого в жидкое состояние материала частиц порошка. Затем в результате изотермической выдержки и теплообмена между разогретой внутренней поверхностью стальной цилиндрической заготовки и прижимаемого к ней центробежными силами порошка происходит послойное его расплавление с образованием после кристаллизации и охлаждения покрытий. Такая последовательность процесса нанесения покрытий позволяет полагать, что технологические режимы индукционной центробежной наплавки определяются следующими технологическими параметрами: длительностью процесса, мощностью и частотой электромагнитного излучения индуктора, линейными размерами стальной цилиндрической заготовки, мощностью создаваемого на ее поверхности теплового источника, удельным сопротивлением, плотностью и теплопроводностью стали. Эти технологические параметры индукционной центробежной наплавки определяют температурные режимы при нанесении покрытий.

Результаты исследований. Для построения модели процесса центробежной индукционной наплавки рассмотрим связь между удельной мощностью электромагнитного излучения индуктора, расположенного над внешней поверхностью заготовки и удельной мощностью теплового источника устанавливаемой с помощью КПД (η) индуктора, величину которого предложено оценивать следующим образом [7]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu \rho_{ст}}}}, \quad (1)$$

где D_1 — внутренний диаметр медного индуктора, м; D_2 — внешний диаметр стальной заготовки, м; ρ_m — удельное электрическое сопротивление меди, Ом·м; $\rho_{ст}$ — удельное электрическое сопротивление стали, Ом·м; μ — относительная магнитная проницаемость, показывающая во сколько раз проницаемость материала проводника больше проницаемости вакуума.

Глубина проникновения тока при нагреве индукционным током внешней поверхности сталь-

ной цилиндрической заготовки, расположенной под индуктором, в работе [8] определяется как

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

где Δ — глубина проникновения тока в проводнике, м; ρ — удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ — относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз проницаемость материала проводника больше проницаемости вакуума; ω — круговая частота, характеризует магнитное поле, Гц.

$$\omega = 2\pi f, \quad (3)$$

где f — частота тока установки ТВЧ, Гц.

$$\mu = \frac{\mu_b}{\mu_0}, \quad (4)$$

где μ_b — магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м.

При индукционном нагреве стальной заготовки изменяются ее удельное сопротивление и магнитная проницаемость, причем магнитная проницаемость слабо зависит от температуры примерно до 650–700 °С, после чего быстро уменьшается и достигает значения, примерно равного проницаемости вакуума [8]. В приближенных расчетах обычно считается, что она падает скачком до $\mu = 1$ в точке магнитных превращений (точке Кюри), примерно соответствующей температуре 750–770 °С.

При температуре выше 800 °С удельные сопротивления сталей различных сортов почти одинаковы. В среднем можно принять, что удельное сопротивление в интервале температур 800–900 °С приблизительно равно 10^{-6} Ом·м. При этом для сталей с содержанием углерода 0,4–0,5 % необходимо учитывать следующее [9]:

- в диапазоне температур от 10 до 800 °С удельное сопротивление возрастает примерно в пять раз;
- магнитная проницаемость до 650–700 °С остается практически неизменной, затем скачкообразно падает (уменьшается в 16 раз) практически до единицы;
- глубина проникновения индукционного тока при нагреве возрастает в 8–10 раз и при температурах, превышающих температуру магнитных превращений (температура Кюри), может быть оценена из выражения (2). При подстановке формул (3) и (4), а также значений $\rho = \rho_k = 10^{-6}$ Ом·м и $\mu = 1$, глубина проникновения принимает вид:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_b \cdot f}}. \quad (5)$$

Данное выражение показывает, что степень затухания поля зависит от частоты поля f , электросопротивления ρ и магнитной проницаемости металла μ_b .

Под глубиной проникновения тока понимают такое расстояние от поверхности проводника (по нормали к поверхности), на котором плотность электрического тока в плоском массивном проводнике уменьшается в e раз по сравнению с плотностью тока на поверхности.

Понятие глубины проникновения тока весьма важно по ряду причин. В слое толщиной Δ выделяется 86,5 % мощности. Использование понятия глубины проникновения тока часто позволяет упростить расчеты. Экспоненциальное распределение тока можно заменить более простым — прямоугольным, т. е. считать, что ток протекает только в слое глубиной Δ с равномерной плотностью $\delta/\sqrt{2}$ и за пределами этого слоя отсутствует, следовательно, в слое глубиной Δ выделяется вся тепловая энергия.

Далее рассмотрим процессы, происходящие в жидком расплаве при индукционной центробежной наплавке покрытий. Так, одним из наиболее значимых факторов в основах управления осаждением нано- и микрочастиц при индукционной наплавке покрытий в поле центробежных сил является процесс седиментации [10–14].

Известно [15, 16], что седиментация — это оседание или всплывание частиц дисперсной фазы (твердых крупинок, капелек жидкости, пузырьков газа) в жидкой или газообразной дисперсионной среде в гравитационном поле или поле центробежных сил. Седиментация происходит, если направленные 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. Для мелких не взаимодействующих между собой сферических частиц скорость седиментации определяется с учетом уравнения Стокса. Седиментация в дисперсных системах (особенно с газовой дисперсионной средой) часто сопровождается укрупнением седиментирующих частиц вследствие коагуляции или коалесценции.

В связи с этим при моделировании будем рассматривать процесс индукционной центробежной наплавки покрытия с наноразмерными модификаторами 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 сделаем следующие допущения:

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

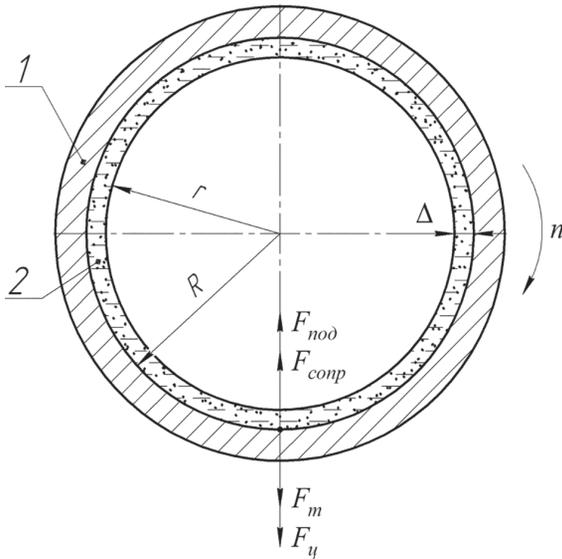


Рисунок 2 — Схема процесса индукционной центробежной наплавки покрытия на цилиндрическую заготовку:
 1 — цилиндрическая заготовка; 2 — расплавленный слой покрытия; $F_{под}$ — подъемная сила; $F_{ц}$ — центробежная сила; $F_{т}$ — сила тяжести; $F_{сопр}$ — сила гидродинамического сопротивления (Стокса); n — угловая скорость, об/мин

- отсутствуют силы смачивания и поверхностного натяжения расплава.

На наноразмерную частицу, погруженную в жидкий металл, действуют различные силы (рисунок 3), смещающие ее от своего первоначального месторасположения [17], что влечет трудности с равномерным распределением наноразмерных частиц в расплаве. Также наноразмерные частицы обладают высокой поверхностной энергией, поэтому при введении в расплав они образуют конгломераты частиц размером до 5 мкм. Это приводит к сложностям обеспечения стабильности свойств и надлежащего уровня качества покрытий.

В рассматриваемом процессе индукционной центробежной наплавки можно предположить, что седиментация наноразмерных частиц в наплавляемых слоях будет проходить под действием не только сил тяжести, гидростатической силы

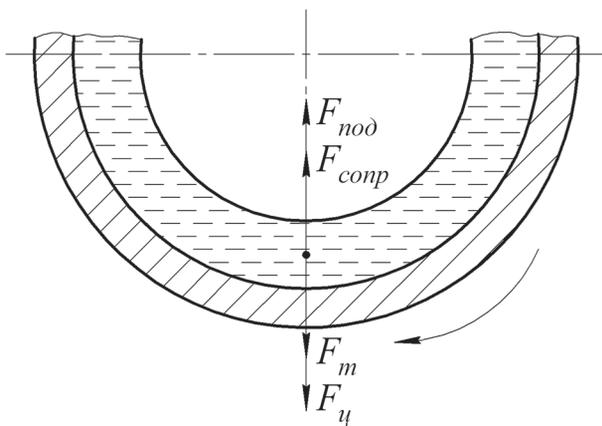


Рисунок 3 — Силы, действующие на наноразмерную частицу, погруженную в жидкий металл, при индукционной центробежной наплавки

выталкивания, но и центробежных сил, включая силы вязкого сопротивления среды (см. рисунок 3). Поэтому для определения того, что происходит с частицами, рассмотрим действующие на нее силы.

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 [18], откуда получаем, что подъемная сила равна:

$$F_{под} = V \cdot \omega^2 R' \cdot (\rho_b - \rho_m), \quad (6)$$

где $F_{под}$ — подъемная сила, действующая на частицу, погруженную в жидкий металл, Н; V — объем частицы, погруженной в жидкий металл, м³; ρ_b — плотность материала частицы, кг/м³; ρ_m — плотность жидкого металла, кг/м³; ω — угловая скорость, рад/с; R' — радиус центра сил инерции частицы, м.

$$R' = \sqrt{\frac{2}{5}} R, \quad (7)$$

где R — внутренний радиус цилиндрической заготовки, м.

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

$$F_{сопр} = 6\pi \cdot r_b \cdot \eta \cdot v, \quad (8)$$

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

$$v = \frac{d^2 \omega^2 R' (\rho_b - \rho_m)}{18\eta}, \quad (9)$$

где d — диаметр частицы, м.

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

$$F_t = mg, \quad (10)$$

где F_t — сила тяжести, Н; m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, 9,8067 м/с².

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 R, \quad (11)$$

где $F_{ц}$ — центробежная сила, Н; m — масса частицы, кг; 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 НРМ, 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 подобраны режимы индукционной наплавки, размеры детали, свойства наплавляе-

мых материалов, чтобы уравновесить силы, действующие на наноразмерную частицу.

Выполним оценочный расчет действующих на частицу сил, учитывая данные, приведенные в работе [19], и экспериментальные исследования. В качестве НРМ будем использовать TiC, плотность которого $\rho_b = 4930 \text{ кг/м}^3$, радиус частицы $r_b = 20 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, угловая скорость заготовки $\omega = 157,096 \text{ рад/с}$ (1500 об/мин), внутренний радиус цилиндрической заготовки $R = 0,05 \text{ м}$. Материал покрытия БрОФ 10-1 для жидкофазных бронзовых сплавов плотностью $\rho_m = 8300\text{--}8900 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\eta = 0,0033 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (при температуре 1100–1200 °С).

При подстановке исходных данных в (6)–(11) получаем:

$$F_{\text{под}} = \frac{4}{3} \cdot 3,1415 \cdot (20 \cdot 10^{-9})^3 \cdot 157,0796^2 \times \\ \times \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot 0,05 \cdot (4930 - 8700) = -9,857 \cdot 10^{-17}, \text{ Н}; \\ F_{\text{сопр}} = 6 \cdot 3,1415 \cdot 20 \cdot 10^{-9} \times \\ \times 0,0033 \cdot (-7,9235 \cdot 10^{-8}) = -9,857 \cdot 10^{-17}, \text{ Н}; \\ F_{\tau} = 1,6520 \cdot 10^{-19} \cdot 9,8067 = 1,6201 \cdot 10^{-18}, \text{ Н}; \\ F_{\text{ц}} = 1,6520 \cdot 10^{-19} \cdot 157,0796^2 \cdot 0,05 = 2,0381 \cdot 10^{-16}, \text{ Н}.$$

Отрицательный знак показывает, что сила направлена к свободной поверхности жидкого металла. Тогда, составив уравнение действующих на частицу сил, в зависимости от их направления, и подставив численные значения, получаем, что действующие на частицу силы в левой и правой части приблизительно равны.

$$F_{\text{под}} + F_{\text{сопр}} = F_{\tau} + F_{\text{ц}}; 1,9714 \cdot 10^{-16} \approx 2,0543 \cdot 10^{-16}.$$

Отсюда следует, что перемещение наноразмерной частицы в жидком металле крайне маловероятно. Таким образом, используя данный расчет, становится возможным подобрать материал НРМ для индукционной центробежной наплавки (таблица 1), при использовании которого смещение наноразмерных частиц от своего первоначального месторасположения будет незначительным, и можно считать, что наноразмерные частицы 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 НРМ в необходимых нам 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.

Пусть после подготовки шихты наноразмерные частицы в ней распределены равномерно, а их плотность меньше в 2,5–3 раза плотности на-

Таблица 1 — Материалы НРМ для индукционной центробежной наплавки

Материал НРМ	Плотность ρ_b , кг/м ³	Температура плавления $T_{\text{плав}}$, °С
SiO ₂	2650	1600
SiC	3210	2730
Si ₃ N ₄	3440	1900
Al ₂ O ₃	3990	2044
TiC	4930	3260
ZrC	6730	3530

плавляемых покрытий. Тогда до перехода шихты в расплавленное состояние существенного перераспределения наноразмерных частиц в ней не произойдет.

Для получения сплошного кольца покрытия на внутренней поверхности заготовки необходимо, чтобы угловая скорость на внутренней поверхности заготовки обеспечила центробежную силу, превосходящую силу гравитации для наплавляемого покрытия. Угловую скорость определяют по формуле [20]:

$$n = \frac{5520}{\sqrt{\gamma \cdot r}}, \quad (12)$$

где n — угловая скорость, об/мин; γ — удельный вес материала покрытия, г/см³; r — радиус от оси вращения до свободной поверхности, см.

$$r = R - \Delta, \quad (13)$$

где R — внутренний радиус цилиндрической заготовки, см; Δ — толщина наплавляемого покрытия, см.

Определим минимальные угловые скорости для стальных цилиндрических заготовок с внутренними радиусами 50–15 мм и с толщиной наплавляемого покрытия 5 мм, получаем, что необходимые скорости равны 882,21–1871,45 об/мин. При таких скоростях центробежное ускорение составит 43,5–58,7g.

$$a = \omega^2 \cdot R, \quad (14)$$

где a — центробежное ускорение, м/с²; ω — угловая скорость, рад/с; R — внутренний радиус цилиндрической заготовки, м.

Проведем анализ действия сил в цилиндрической заготовке, они будут направлены так, как показано на рисунке 2, исходя из этого, можно составить уравнение равновесия:

$$0 = \vec{F}_{\text{под}} + \vec{F}_{\text{сопр}} + \vec{F}_{\tau} + \vec{F}_{\text{ц}} \text{ или } F_{\text{под}} + F_{\text{сопр}} = F_{\tau} + F_{\text{ц}}. \quad (15)$$

Запишем уравнение равновесия, подставив все указанные силы:

$$V \cdot \omega^2 R' \cdot (\rho_b - \rho_m) + 6\pi \cdot r_b \eta \cdot v = mg + m \cdot \omega^2 R; \quad (16)$$

$$6\pi \cdot r_b \eta \cdot v = V \rho_b \cdot g + V \rho_b \cdot \omega^2 R - V \cdot \omega^2 R' \cdot (\rho_b - \rho_m). \quad (17)$$

Таблица 2 — Скорость смещения наноразмерных частиц в расплаве бронзы при внутреннем радиусе цилиндрической заготовки $R = 0,05$ м

Размер частицы r_b , нм	Скорость смещения частицы v , нм/с				
	$n = 1000$ об/мин	$n = 1250$ об/мин	$n = 1500$ об/мин	$n = 1750$ об/мин	$n = 2000$ об/мин
20	38	60	85	116	151
30	87	135	193	262	341
40	155	240	343	465	606
50	243	375	536	727	948
60	350	540	773	1048	1365
70	476	735	1052	1426	1858
80	622	960	1374	1863	2427
90	787	1215	1739	2358	3071
100	972	1501	2147	2911	3792

Для упрощения уравнения (17) разделим левую и правую части на объем включения V и запишем полученное уравнение:

$$\frac{6\pi \cdot r_b \cdot \eta \cdot v \cdot 3}{4\pi \cdot r_b^3} = \rho_b \cdot g + \rho_b \cdot \omega^2 R - \omega^2 R' \cdot (|\rho_b - \rho_m|); \quad (18)$$

$$\frac{9 \cdot \eta \cdot v}{2 \cdot r_b^2} = \rho_b \cdot g + \omega^2 (R \cdot \rho_b - R' \cdot (|\rho_b - \rho_m|)). \quad (19)$$

Из уравнения (19) выразим скорость движения наноразмерной частицы, погруженной в жидкий металл, и запишем полученное уравнение:

$$v = \frac{2 \cdot r_b^2}{9 \cdot \eta} \cdot (\rho_b \cdot g + \omega^2 (R \cdot \rho_b - R' \cdot (|\rho_b - \rho_m|))). \quad (20)$$

где v — скорость включения, м/с; r_b — радиус включения, м; η — вязкость жидкого металла, Па·с; ρ_b — плотность материала включения, кг/м³; ρ_m — 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.

Подставив исходные данные в уравнение (20), получаем скорость смещения наноразмерной частицы, причем чем больше размер частицы, тем выше скорость смещения (таблица 2).

Из анализа расчетных данных (см. таблицу 2), полученных по уравнению (20), следует, что при центробежной наплавке с ускорениями не менее 43,52g, с внутренними радиусами 50 мм и с толщиной наплавляемого покрытия 5 мм получаем, что в различных условиях для частиц размером $r_b = 20$ нм скорость смещения может составлять $v = 38 \div 151$ нм/с, частиц размером $r_b = 100$ нм соответственно $v = 972 \div 3792$ нм/с.

Выводы. Выполнено физико-математическое моделирование процесса индукционной наплавки покрытий. Определены силы, действующие на частицу при индукционной центробежной наплавке. Получена зависимость, позволяющая определять скорость смещения наноразмерных

частиц от начального расположения в жидком расплаве при индукционной центробежной наплавке покрытий для различных материалов и технологических режимов.

Модель позволяет подобрать материалы и технологические режимы, сводящие к минимуму неоднородность концентрации частиц упрочняющей фазы и наноразмерных частиц в расплаве покрытия, формируемого центробежным методом. Кроме того, в зависимости от поставленной задачи модель позволяет определить режимы наплавки для целенаправленного смещения наноразмерных частиц в определенном направлении на необходимую величину.

Показано, что при внутреннем радиусе цилиндрической заготовки $R = 0,05$ м для частиц TiC размером $r_b = 20$ нм при угловой скорости $n = 1000$ об/мин, скорость смещения частицы составляет $v = 38$ нм/с.

Список литературы

1. Рябцев, И.А. Индукционная наплавка / И.А. Рябцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2005. — № 11. — С. 37–40.
2. Gafo, Yu.N. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings / Yu.N. Gafo, I.A. Sosnovskij // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2009. — Vol. 48, No. 1–2. — Pp. 105–111.
3. Дорожкин, Н.Н. Теоретические основы получения деталей с припеченным слоем / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, Л.П. Кашицин // Докл. Акад. наук БССР. — 1974. — 18, № 5. — С. 428–431.
4. Данильченко, Б.В. Наплавка / Б.В. Данильченко. — Киев: Наук. думка, 1983. — 75 с.
5. 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.
6. Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения: справ. / Г.В. Самсонов, И.М. Винницкий. — М.: Металлургия, 1976. — 560 с.
7. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
8. 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.
9. Корягин, Ю.Д. Индукционная закалка сталей: учеб. пособие / Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. — 52 с.
 10. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов. — Минск: Технопринт, 2000. — 268 с.
 11. Управление технологическими режимами центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И.А. Сосновский [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: IV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 окт. 2009 г.: в 3 кн. — Кн. 2: Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование для упрочнения и восстановления свойств поверхности материала / ФТИ НАН Беларуси, редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2009. — С. 233–236.
 12. Control and stabilization of technological modes of powder materials centrifugal induction sintering on cylindrical parts internal surface / I. Sosnovsky [et al.] // Euro PM 2007: Proc. of Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Toulouse, France, 14–17 Oct. 2007. — Vol. 2. — Pp. 117–119.
 13. Гафо, Ю.Н. Определение термических параметров центробежного индукционного припекания порошковых покрытий / Ю.Н. Гафо, И.А. Сосновский // Порошковая металлургия. — 2009. — № 1/2. — С. 15–18.
 14. 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. / БНТУ. — Минск, 2010. — С. 49–51.
 15. Ходаков, Г.С. Седиментационный анализ высокодисперсных систем / Г.С. Ходаков, Ю.П. Юдкин. — М.: Высш. шк., 1981. — 496 с.
 16. Коллоидная химия: учеб. для ун-тов и хим.-технолог. вузов / Е.Д. Шукин [и др.]. — М.: Высш. шк., 2004. — 445 с.
 17. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — 3-е изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — Т. VI: Гидродинамика. — 736 с.
 18. Юдин, С.Б. Центробежное литье / С.Б. Юдин, М.М. Левин, С.Е. Розенфельд. — М.: Машиностроение, 1972. — 280 с.
 19. Михеев, Р.С. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова. — М.: Маска, 2013. — 356 с.
 20. Гуляев, Б.Б. Литейные процессы / Б.Б. Гуляев. — М.: Машгиз, 1960. — 416 с.

KURILYONOK Artem A.

Junior Researcher¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

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

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 20 January 2018.

EVALUATION OF DYNAMIC IMPACT ON NANOSIZED PARTICLES IN THE PROCESS OF CENTRIFUGAL SURFACING OF POWDER CHARGE

A physico-mathematical model of the process of formation of coatings with nanosized modifiers by induction centrifugal surfacing has been developed. The forces acting on a particle in a liquid melt during isothermal holding during induction centrifugal surfacing are determined. A dependence is obtained that determines the rate of displacement of nanoscale particles from the initial position in the liquid melt during induction centrifugal surfacing of coatings, for various materials and technological regimes. The implementation of the model allows selecting materials and technological regimes that minimize the heterogeneity of the concentration of particles of the strengthening phase and nano-sized particles in the melt of the coating, or, depending on the task, the model allows selecting the deposition regimes for the purposeful displacement of nanoscale particles within the required limits. The practical application of the obtained results for particles of TiC with a size of 20 nm is shown.

Keywords: *physico-mathematical model of dynamic impact, powder charge, antifriction coatings, centrifugal induction surfacing, nanosized modifiers*

References

1. Rjabcev I.A. Indukcionnaja naplavka [Induction weld]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija* [Repairs. Recovery. Modernization], 2005, no. 11, pp. 37–40.
2. Gafo Yu.N., Sosnovskij 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.
3. Dorozhkin N.N., Abramovich T.M., Kashicin L.P. Teoreticheskie osnovy poluchenija detalej s pripechenym sloem [Theoretical basis for obtaining parts with a baked layer]. *Doklady Akademii nauk BSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR], 1974, vol. 18, no. 5, pp. 428–431.
4. Danilchenko B.V. *Naplavka* [Surfacing]. Kiev, Nauova Dumka, 1983. 75 p.
5. Komarov A.I. Sintez nanostrukturirovannykh tugoplavkikh napolnitelej, ikh vlijanie na strukturu i svojstva siluminov [Synthesis of nanostructured refractory fillers, their effect on the structure and properties of silumin]. *Perspektivnye*

- tehnologii* [Advanced technologies]. Vitebsk, VGTU, 2015, vol. 2, pp. 202–223.
6. Samsonov G.V., Vinnickij I.M. *Tugoplavkie soedinenija: Spravochnik* [Refractory Compounds: Handbook]. Moscow, Metallurgija, 1976. 560 p.
 7. Slukhockij A.E., Ryskin S.E. *Induktory dlja indukcionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad, Energija, 1974. 264 p.
 8. Grebenjuk V.F., Khomutov V.I., Kalmykov E.V. *Vybor konfiguracii i raschet induktora dlya vysokochastotnogo nagreva: metodicheskie ukazanija k kursovomu u diplomnomu proektirovaniju* [Choice of configuration and calculation of inductor for high-frequency heating: guidelines for course and diploma design]. Orenburg, GOU VPO OGU, 2002. 31 p.
 9. Korjagin Ju.D., Filatov V.I. *Indukcionnaja zakalka stalej* [Induction hardening of steels]. Chelyabinsk, JuUrGU, 2006. 52 p.
 10. Mroček Zh.A., Kozhuro L.M., Filonov I.P. *Progressivnye tehnologii vosstanovlenija i uprochneniya detalej mashin: ucheb. posobie* [Progressive technologies of restoration and hardening of machine parts: a manual]. Minsk, Tehnoprint, 2000. 268 p.
 11. Sosnovskij I.A., Gafo Ju.N., Kacshicin L.P., Sosnovskij A.V., Grudko I.I., Trembickij I.P. *Upravlenie tekhnologicheskimi rezhimami centrobezhnogo indukcionnogo nanesenija poroshkovyh pokrytij* [Control of technological regimes of centrifugal induction powder coatings]. *Sbornik materialov 6 Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov"* [Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference "Modern methods and technologies of the creation and processing of materials"]. Minsk, FTI, 2009, vol. 2, pp. 233–236.
 12. Sosnovsky I., Gafo Y., Kashitsyn L., Sosnovsky A. Control and stabilization of technological modes of powder materials centrifugal induction sintering on cylindrical parts internal surface. *Materials Powder Metallurgy Congress Exhibition "Euro PM 2007"*. France, 2007, vol. 2, pp. 117–119.
 13. Gafo Ju.N., Sosnovskij I.A. *Opređenje termicheskikh parametrov centrobezhnogo indukcionnogo pripekanija poroshkovykh pokrytij* [Determination of the thermal parameters of the centrifugal induction coating of powder coatings]. *Poroshkovaja metallurgija* [Powder metallurgy], 2009, no. 1–2, pp. 15–18.
 14. Sosnovskij I.A., Gafo Ju.N., Kuznechik O.O., Klimentko S.E., Grudko I.I., Trembickij I.P. *Ispolzovanie nanostrukturnykh modifikatorov pri indukcionnoj centrobezhnoj naplavke antifrikcionnykh pokrytij* [Use of nanostructured modifiers for induction centrifugal surfacing of antifriction powder coatings]. *Sbornik materialov 2 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Inzhenerija poverkhnostnogo sloja detalej mashin"* [Proceedings of the 2th International Scientific and Practical Conference "Engineering of the surface layer of machine parts"]. Minsk BNTU, 2010, pp. 49–51.
 15. Khodakov G.S., Judkin Ju.P. *Sedimentacionnyj analiz vysokodispersnyh sistem* [Sedimentation analysis of highly disperse systems]. Moscow, Vysshaja shkola, 1981. 496 p.
 16. Schukin E.D. *Kolloidnaja khimija: Uchebnik dlja universitetov i khimiko tekhnologicheskikh vuzov* [Colloid Chemistry: A Textbook for Universities and Chemical Technology Universities]. Moscow, Vysshaja shkola, 2004. 445 p.
 17. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoreticheskaja fizika: Uchebnoe posobie. T. 6: Gidrodinamika* [Theoretical physics: Textbook, Vol. 1: Hydrodynamics]. Moscow, Nauka, 1986. 736 p.
 18. Judin S.B., Levin M.M., Rozenfeld S.E. *Centrobezhnoe litje* [Centrifugal casting]. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 280 p.
 19. Mikheev R.S., Chernyshova T.A. *Aljumomatrichniye kompozicionnye materialy s karbidnym uprochnenijem dlja resheniya zadach novoj tekhniki* [Alumomatrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology]. Moscow, Maska, 2013. 356 p.
 20. Guljaev B.B. *Litejnye process* [Foundry processes]. Moscow, Mashgiz, 1960. 416 p.