

УДК 621.762

doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-33-41

Методика определения теплового состояния втулки цилиндра при центробежном индукционном напекании

Р.Дж. Баширов, Ф.Г. Амиров

Азербайджанский технический университет

Method for Determining the Thermal State of the Cylinder Sleeve During Centrifugal Induction Sintering

R.J. Bashirov, F.G. Amirov

Azerbaijan Technical University

Распределение температуры во втулке цилиндра судового двигателя при ее нагреве и охлаждении — один из важнейших факторов, под действием которых формируются структура и свойства покрытий в процессе восстановления цилиндра методом центробежного индукционного напекания. Проведены экспериментальные исследования, позволившие получить графики распределения температуры по диаметрам втулки цилиндра судового двигателя при ее нагреве и охлаждении. Установлено, что на процесс напекания порошковых материалов существенно влияют теплофизические свойства втулки. Изменяя скорость нагрева, можно получать покрытия при различных значениях температуры и времени напекания. Выполнено моделирование распределения температуры в стенке втулки цилиндра при центробежном индукционном напекании в зависимости от времени напекания, а также с учетом геометрических параметров втулки, теплоотдачи, теплопроводности, материала втулки, температуры внешней среды и т. д. Получены выражения для определения распределения температуры в стенке втулки цилиндра при центробежном индукционном напекании. Задавая значения параметров центробежного индукционного напекания, по полученным формулам можно смоделировать и заранее получить распределение температуры в стенке втулки цилиндра. Для визуального отображения изменения температурного поля во втулке при центробежном индукционном напекании выполнено моделирование в среде Autodesk Fusion 360.

Ключевые слова: центробежное индукционное напекание, восстановление цилиндров, индукционный нагрев, порошковые покрытия, порошковый слой, тепловая энергия

The temperature distribution in the ship engine cylinder sleeve during its heating and cooling is one of the most important factors affecting formation of the structure and properties of coatings in the process of cylinder recovery by the method of induction centrifugal sintering. The article discusses experimental studies, which allow presenting graphs of the temperature distribution over the diameters of the ship engine cylinder sleeve during its heating and cooling. The thermophysical properties of the sleeve were found to significantly affect the process of sintering powder materials. By varying the heating rate, it is possible to obtain coatings at different temperatures and sintering time. Modeling the temperature distribution in the wall of the cylinder sleeve during centrifugal induction sintering depending on the sintering time is of interest as well as taking into account the geometrical parameters of the sleeve, heat trans-

fer, thermal conductivity, sleeve material, ambient temperature, etc. Expressions are obtained for determining the temperature distribution in the wall of the cylinder sleeve during induction centrifugal sintering. Using the obtained formulas, it is possible to simulate and obtain in advance the temperature distribution in the wall of the cylinder sleeve by setting the values of the parameters of centrifugal induction sintering. Modeling in the Autodesk Fusion 360 the temperature distribution in the sleeve during induction heating was obtained as well as visual display of the change in the temperature field in the sleeve during induction heating.

Keywords: induction centrifugal sintering, cylinder recovery, induction heating, powder coatings, powder layer, thermal energy

Центробежное индукционное напекание (ЦИН) относится к самым производительным методам нанесения порошковых покрытий. Таким методом можно наносить покрытия на внутренние, наружные и торцевые поверхности. Среди схем индукционного нагрева все большее применение находит нагрев токами высокой частоты со стороны внутренней поверхности детали [1–7].

Анализ основных особенностей ЦИН позволяет сделать вывод, что наиболее важной стадией технологического процесса, определяющей физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых двухслойных изделий, является изотермическая выдержка при температуре спекания порошкового материала.

Основная техническая задача на этой стадии — поддержание заданной средней температуры порошкового слоя (температуры спекания) в течение определенного промежутка времени (времени спекания). При этом термические режимы на предыдущих стадиях нагрева не оказывают существенного влияния на кинетику процесса напекания порошкового слоя на подложку.

Толщина порошкового слоя, как правило, значительно меньше толщины подложки и радиуса кривизны его поверхности. Свободную внутреннюю поверхность порошкового слоя и торцы двухслойного цилиндра можно считать теплоизолированными. Следовательно, термическим сопротивлением порошкового слоя можно пренебречь, а распределение температуры по ее толщине считать однородным и равным температуре внутренней поверхности подложки.

Начиная с определенного значения критерия Фурье, наступает квазистационарный режим теплопроводности, когда распределение температуры в подложке не изменяется по форме, но температура в каждой точке растет во времени с постоянной относительной скоростью. По достижении внутренней поверхно-

стью цилиндрической заготовки температуры спекания порошкового материала температуру этой поверхности поддерживают постоянной путем управления мощностью источника нагрева (генератора токов высокой частоты).

При этом распределение температуры по толщине заготовки является стационарным, а мощность, выделяемая внутренними источниками, равна тепловому потоку с ее наружной поверхности, который обусловлен конвективным и лучистым теплообменом с внешней средой [1–2, 8].

Контроль и регулирование температуры внутренней поверхности вращающейся заготовки или порошкового слоя в технологическом процессе ЦИН является технически сложной задачей, которую можно решить рационально только путем экспериментальных и теоретических исследований. Поэтому на практике, как правило, используют контроль температуры наружной поверхности бесконтактными пирометрическими методами.

Таким образом, для поддержания заданной температуры порошкового слоя на стадии режима напекания требуется определить температурный перепад по толщине заготовки путем решения стационарной задачи теплопроводности для полого цилиндра с внутренним источником тепла. Так как толщина стенки цилиндра существенно меньше его диаметра и перепад температуры относительно мал (меньше 1 К), зависимостью теплопроводности от температуры можно пренебречь [3, 9–13].

В процессе восстановления цилиндров судовых двигателей методом ЦИН распределение температуры во втулке цилиндра при ее нагреве и охлаждении является одним из важнейших факторов, под действием которых формируются структура и свойства покрытий.

Цель статьи — разработка методики определения теплового состояния втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 при ЦИН порошкового покрытия.

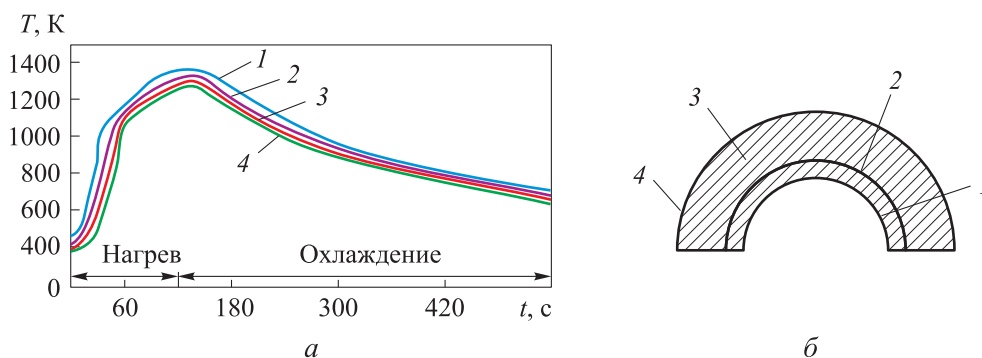


Рис. 1. Распределение температуры по диаметрам втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 при ЦИН порошкового покрытия (а) и схема расположения термопар 1–4 (б)

Проведены экспериментальные исследования, позволившие определить распределение температуры по диаметрам втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 во время ее нагрева и охлаждения при ЦИН порошкового покрытия. Номера кривых, показанных на рис. 1, а, соответствуют номерам термопар, установленных в контрольных точках втулки (рис. 1, б).

Как видно из рис. 1, а, основной нагрев втулки идет в зоне действия индуктора, где происходит напекание порошкового покрытия на основание (термопары 1, 2). Температура в этой зоне распределена равномерно, о чем свидетельствует совпадение кривых 1 и 2.

Нагрев втулки вне зоны напекания порошкового покрытия (термопары 3, 4) характеризуется значительной неравномерностью и происходит в основном за счет теплопередачи от более нагретой части втулки. Максимальная температура нагрева втулки в этой зоне достигается только после выключения индуктора. Для термопары 3 она составляет 1223 К, для термопары 4 — 975 К. В зоне напекания (термопары 1, 2) максимальная температура доходит до 1373 К.

В зоне напекания порошкового покрытия (термопары 1, 2) охлаждение втулки начинается сразу после выключения индуктора, в месте расположения термопары 3 — через 10...15 с, в районе термопары 4 — через 60...70 с. Охлаждение в местах расположения термопар 3 и 4 происходит с меньшей скоростью, чем в зоне напекания покрытия. При достижении температуры 473...423 К скорость охлаждения выравнивается во всех точках втулки [14–17].

Анализ кривых охлаждения (см. рис. 1, а) показывает, что в зоне термопары 4 не должно происходить изменений в структуре чугуна втулки, так как температура нагрева в этой точке ниже температуры фазовых превращений. Перлит имеет двухфазную структуру, поэтому полиморфное превращение происходит сначала в зоне напекания порошкового покрытия (термопары 1, 2), а затем в районе термопары 3. После завершения процесса напекания в этой зоне возможны изменения в структуре чугуна втулки.

Распределение температуры по длине втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 при ЦИН порошкового покрытия показано на рис. 2, а, где

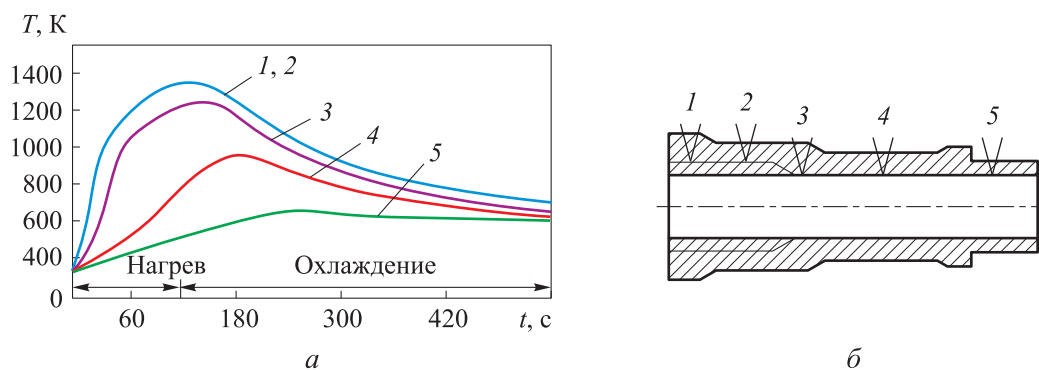


Рис. 2. Распределение температуры по длине втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 при ЦИН порошкового покрытия (а) и схема расположения термопар 1–5 (б)

номера кривых соответствуют номерам термодпар, установленных в контрольных точках (рис. 2, б). Результаты проведенных экспериментов показали, что нагрев зоны напекания характеризуется двумя одновременно протекающими процессами: тепловыделением и теплоотводом.

Первые 45 с нагрев порошкового материала происходит за счет теплопередачи от стенок втулки цилиндра, так как неуплотненный слой порошка из-за плохого электрического контакта между его частичками является практически прозрачным для электромагнитного поля индуктора, и непосредственно в порошке тепловая энергия не выделяется.

В период нагрева до точки Кюри индуктируемый ток распределен главным образом по внутренней поверхности втулки цилиндра. Этот период характеризуется опережающим нагревом поверхностного слоя внутренней поверхности втулки (в месте расположения термодпары 2). После перехода через точку Кюри (время нагрева 50...60 с) глубина проникновения тока в основной металл увеличивается, и втулка в зоне напекания прогревается на всю глубину. Вследствие теплопередачи греется порошковый материал [15, 16].

Нагрев начинается с частичек порошка, контактирующих с внутренней поверхностью втулки, распространяясь на всю толщину (время прогрева 60...100 с). При достижении температуры нагрева втулки в зоне термодпары 2 1073...1123 К в местах контакта порошка с поверхностью втулки начинается процесс образования бинарных эвтектик на основе Ni, Si, Cr, S, P, B, и Fe, температура плавления которых лежит в пределах 1043...1373 К. В это время образуются электрические мостики (контакты) между частичками порошка, и в порошковом слое начинают наводиться токи Фуко, приводящие к выделению тепловой энергии.

При повышении температуры нагрева количество бинарных эвтектик в переходной зоне увеличивается, образуются жидкие боросиликатные шлаки, порошковый слой оседает, уплотняется и уменьшается по толщине. Жидкие боросиликатные шлаки пропитывают весь порошковый слой, улучшают электрический контакт между частичками порошка и вследствие меньшего удельного веса частично вытесняются на свободную поверхность порошкового слоя.

На этом этапе происходит опережающий нагрев порошкового слоя. Максимальную тем-

пературу нагрева имеет порошковое покрытие (термодпара 1), далее она уменьшается, и на наружной поверхности втулки становится на 60...80 К ниже, чем на внутренней.

Охлаждение наружной поверхности втулки происходит с той же скоростью, что и внутренней, но температура первой на 60...80 К ниже, чем у второй, т. е. градиент температуры направлен от внутренней поверхности втулки к наружной.

Анализ результатов исследования показал, что на процесс напекания порошковых материалов существенно влияют теплофизические свойства втулки. Изменяя скорость нагрева, можно получать покрытия при различных значениях температуры и времени напекания.

Представляет интерес моделирование распределения температуры в стенке втулки цилиндра при ЦИН в зависимости от времени напекания, а также с учетом геометрических параметров втулки, теплоотдачи, теплопроводности, материала втулки, температуры внешней среды и т. д. [9–13, 15–20].

Исходя из указанных основных особенностей ЦИН и сделанных допущений, стационарную задачу теплопроводности на стадии припекания порошкового слоя к внутренней поверхности цилиндрической заготовки можно сформулировать следующим образом.

Пусть начальное распределение температуры задано в виде $T = 0$. Считаем, что начиная с некоторого момента $t = 0$ внутренняя поверхность втулки цилиндра за счет температуры напекания приобретает постоянную температуру T_0 , т. е. полагаем, что внутренняя поверхность втулки цилиндра при радиусе $r = r_1$ приобретает температуру T_0 внезапно [15–17, 21].

Краевую задачу теории теплопроводности о распределении температурного поля в стенке втулки цилиндра запишем в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad r_1 < r < r_2; \quad (1)$$

$$T = T_0 \text{ при } r = r_1, \quad t > 0; \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha_* (T - T_c) = 0 \text{ при } r = r_2, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$T = 0 \text{ при } t = 0, \quad r_1 < r < r_2,$$

где a — коэффициент теплопроводности втулки цилиндра; $T(t, r)$ — температурная функция; λ — коэффициент теплопроводности материала втулки; α_* — коэффициент теплоотдачи; T_c — температура внешней среды, которую

без нарушения общности можно считать равной нулю.

Для решения краевой задачи (1)–(3) используем преобразование Лапласа. Применим преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению (1) с граничными и начальными условиями (2), (3).

Таким образом, преобразование Лапласа свело дифференциальное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + 0,5 \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - q^2 \bar{T} = 0, \quad r_1 < r < r_2, \quad (4)$$

где $q = p/a$ (p — оператор Лапласа).

Граничные условия для изображения функции принимают вид

$$\begin{aligned} \bar{T} &= T_0/p \text{ при } r = r_1; \\ \lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \alpha_* \bar{T} &= 0 \text{ при } r = r_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (4) представляет собой уравнение Бесселя нулевого порядка. Решение уравнения (4) можно записать как

$$\bar{T} = AI_0(qr) + BK_0(qr), \quad (6)$$

где A, B — постоянные величины; $I_0(qr)$ и $K_0(qr)$ — функции Бесселя мнимого аргумента.

Постоянные величины A и B выбираем так, чтобы \bar{T} удовлетворяло условиям (5).

Подставляя их в выражение (6), имеем

$$\begin{aligned} AI_0(qr_1) + BK_0(qr_1) &= T_0/p; \\ q[AI_1(qr_2) - BK_1(qr_2)] + \\ + \frac{\alpha_*}{\lambda}[AI_0(qr_2) - BK_0(qr_2)] &= 0. \end{aligned}$$

Решая полученную систему из двух уравнений относительно A и B , получаем

$$\begin{aligned} A &= \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad B = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \\ \Delta_1 &= \frac{T_0}{p} \left[\frac{\alpha_*}{\lambda} K_0(qr_2) - qK_1(qr_2) \right]; \\ \Delta_2 &= \frac{T_0}{p} \left[qI_1(qr_2) + \frac{\alpha_*}{\lambda} I_0(qr_2) \right]; \\ \Delta &= I_0(qr_1) \left[\frac{\alpha_*}{\lambda} K_0(qr_2) - qK_1(qr_2) \right] - \\ &- K_0(qr_1) \left[qI_1(qr_2) + \frac{\alpha_*}{\lambda} I_0(qr_2) \right]. \end{aligned}$$

Для нахождения температурной функции T воспользуемся теоремой обращения. Согласно этой теореме, запишем

$$T(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma - i\infty}^{\gamma + i\infty} e^{\varepsilon t} \bar{T}(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Здесь γ — величина, которая должна быть настолько большой, чтобы все особые точки функции $\bar{T}(\varepsilon)$ лежали слева от линии $(\gamma - i\infty, \gamma + i\infty)$; ε — подынтегральная однозначная функция с простым полюсом при $\varepsilon = 0$ и простыми полюсами при $\varepsilon = -a\alpha_n^2$, где $\pm\alpha_n$ — корни уравнения

$$\begin{aligned} Y_0(\alpha r_1) \left[\alpha J_1(\alpha r_2) - \frac{\alpha_*}{\lambda} J_0(\alpha r_2) \right] - \\ - J_0(\alpha r_1) \left[\alpha Y_1(\alpha r_2) - \frac{\alpha_*}{\lambda} Y_0(\alpha r_2) \right] = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где Y_0, Y_1 — функции теплопроводности; α — коэффициент теплопроводности порошкового слоя.

Корни уравнения (7) действительные и простые. Не рассматривая нахождение вычетов подынтегральной функции в полюсах, приведем окончательную формулу для температурной функции

$$\begin{aligned} T(r_1 t) &= \frac{T_0 r_1 [\lambda - \alpha_* r_2 \ln(r/r_2)]}{\lambda r_1 + \alpha_* r_1 r_2 \ln(r_2/r_1)} - \pi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-a\alpha_n^2 t} \times \\ &\times \frac{T_0 F_1(r_1 \alpha_n)}{F(\alpha_n)} [\lambda \alpha_n J_1(r_2 \alpha_n) - \alpha_n J_0(r_2 \alpha_n)]^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} F_1(r_1 \alpha_n) &= -J_0(r \alpha_n) Y_0(r_1 \alpha_n) + \\ &+ Y_0(r \alpha_n) J_0(r_1 \alpha_n); \\ F(\alpha_n) &= (\lambda^2 \alpha_n^2 + \alpha_*^2) [J_0(r_1 \alpha_n)]^2 - \\ &- [\lambda \alpha_n J_1(r_2 \alpha_n) - \alpha_* J_0(r_2 \alpha_n)]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Задаваясь значениями параметров ЦИН, по формулам (8) и (9) можно смоделировать и заранее определить распределение температуры в стенке втулки цилиндра при ЦИН.

Для визуального отображения изменения температурного поля во втулке при ЦИН, основные параметры (частота и плотность тока, зазор между стенкой втулки и индуктором) определены в соответствии с инженерной практикой, а распределения температуры во втулке цилиндра судового двигателя бЧ 12/14

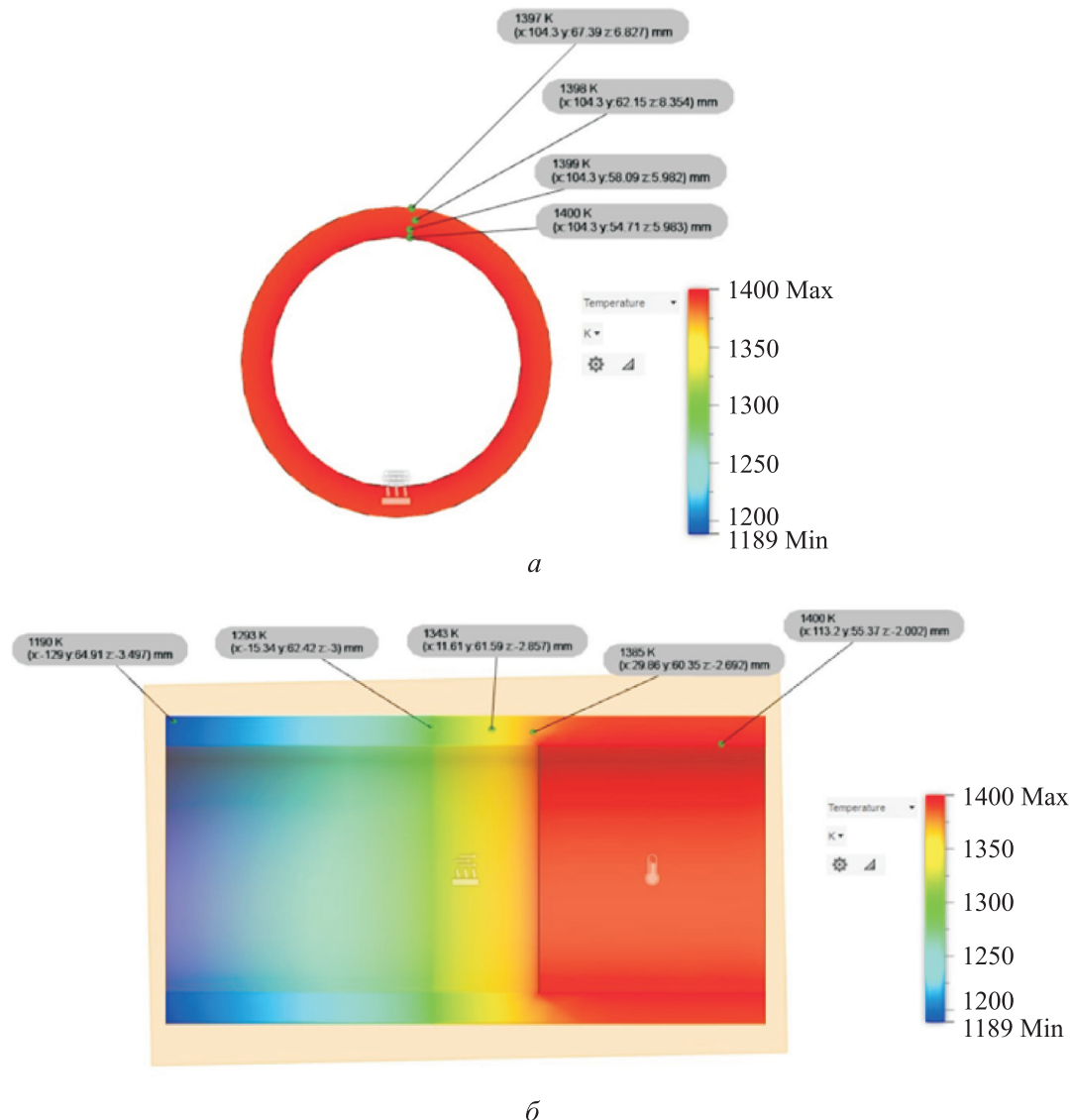


Рис. 3. Распределения температуры, К, по диаметрам (а) и длине (б) втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 при ЦИН порошкового покрытия, полученные в среде Autodesk Fusion 360

при ЦИН порошкового покрытия получены путем моделирования в среде Autodesk Fusion 360 (рис. 3, а и б).

Как видно из рис. 3, а, распределение температуры по втулке цилиндра таково, что у внешней стенки температура намного меньше, чем у внутренней. Это делает удобным напекание порошка на внутреннюю поверхность втулки, т. е. при сильном нагреве форма втулки и ее жесткость по диаметру остаются неизменными. Температура втулки с противоположной от индуктора стороны очень мала (см. рис. 3, б), что дает возможность ее жесткого закрепления в приспособлении.

Выводы

1. Получены выражения для определения распределения температуры в стенке втулки цилиндра при ЦИН порошкового покрытия.

2. Путем моделирования установлено, что температура внешней стенки втулки цилиндра судового двигателя 6Ч 12/14 при ЦИН порошкового покрытия намного меньше, чем у внутренней. Это делает удобным напекание порошка на внутренней поверхности втулки, т. е. при сильном нагреве форма и жесткость втулки по диаметру остаются неизменными. Температура втулки с противоположной от индуктора сто-

роны очень мала, что дает возможность ее жесткого закрепления в приспособлении.

3. Разработанная методика позволяет определять распределение температуры во втулке цилиндра при ЦИН порошкового покрытия, а также разность температур между внутренней и

внешней стенками втулки, для которых является главной величиной. Поэтому необходимо проанализировать характер изменения разности температур между внутренней и внешней стенками втулки, чтобы найти оптимальную группу параметров.

Литература

- [1] Дорожкин Н.Н., ред. *Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях*. Минск. Наука и техника. 1993. 159 с.
- [2] Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Жорник В.И. *Получение покрытий методом припекания*. Минск, Наука и техника, 1980. 176 с.
- [3] Fu X., Wang B., Tang X. et al. Study on induction heating of workpiece before gear rolling process with different coil structures. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, vol. 114, pp. 1–9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.192>
- [4] Wrona E., Nacke B., Schwenk W. Solving complex induction hardening tasks by numerical methods. *Proc. Int. Symp. on Heating by Electromagnetic Sources*, 2004, pp. 593–598.
- [5] Fang X., Wang J., Cao W. Induction heating of large-diameter thin-walled elbow based on skin effect. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, vol. 36, no. 8, pp. 958–963.
- [6] Liu S., Shi H., Feng L. Transformer harmonic loss model considering skin effect and proximity effect. *Dianli Zidonghua Shebei / Electr. Power Autom. Equip.*, 2015, vol. 35, no. 3, pp. 133–139, doi: <http://dx.doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2015.03.021>
- [7] Mitschang P., Rudolf R., Neitzel M. Continuous induction welding process, modelling and realisation. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2002, vol. 15, no. 2, pp. 127–153, doi: <https://doi.org/10.1177%2F0892705702015002451>
- [8] Гафо Ю.Н. *Определяющие уравнения феноменологической теории ползучести порошковых материалов*. Минск, Тонпик, 2006, с. 18–19.
- [9] Nagy S. Optimizations of induction heating installations. *Acta Electrotehnica*, 2004, vol. 45, pp. 117–121.
- [10] Novac M. Numerical modeling of induction heating process using inductors with circular shape turns. *J. Electr. Electron. Eng.*, 2008, no. 1, pp. 107–110.
- [11] Lupi S. Modeling for research and industrial development in induction heating. *4th Int. Conf. on EM Processing of Material EPM*, 2003, pp. 32–33.
- [12] Jankowski T.A. Experimental observation and numerical prediction of induction heating in a graphite test. *COMSOL Conf.*, 2009. 354 p.
- [13] Doležel I., Kropík P., Ulrych B. Induction heating of thin metal plates in time-varying external magnetic field solved as nonlinear hard-coupled problem. *Appl. Math. Comput.*, 2013, vol. 219, pp. 7159–7169, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2011.08.042>
- [14] Баширов Р.Д. Технологическое обеспечение состояния поверхностного слоя. *Ученые записки*, 1996, № 2, с. 43–47.
- [15] Баширов Р.Д. Определение оптимальной температурно-временной области при индукционном напекании втулки цилиндра. *Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта. Мат. 3-й регион. науч.-тех. конф.* Новороссийск, НГМА, 2002, с. 150–153.
- [16] Баширов Р.Д. О влиянии технологических параметров центробежного напекания на сцепляемость покрытия с основой втулки цилиндра. *Вестник Одесского Национального морского университета*, 2002, № 2, с. 224–228.
- [17] Баширов Р.Д. Моделирование распределения температуры в стенке втулки цилиндра при центробежном индукционном напекании. *Вестник Астраханского государственного университета*, 2004, № 1, с. 184–186.
- [18] Сосновский И.А., Белявин К.Е., Худолей А.Л. Технология индукционного нагрева в процессах центробежного нанесения покрытий. В: *Перспективные материалы и технологии*. Т. 1. Витебск, ВГТУ, 2015, с. 300–313.
- [19] Белоцерковский М.А., Куриленок А.А., Сосновский И.А. Получение наноразмерных компонентов в антифрикционном покрытии при индукционной центробежной

наплавке порошковых шихт на основе медных сплавов. *Инновационные технологии в машиностроении. Мат. Межд. науч.-тех. конф.* Новополоцк, ПГУ, 2015, с. 23–25.

- [20] Гафо Ю.Н., Сосновский И.А. Кинетика уплотнения при центробежном индукционном припекании покрытий из металлических порошков. *Новые материалы и технологии в машиностроении*, 2011, № 13, с. 9–11.
- [21] Мягков Л.Л., Сивачев В.М. Методика определения теплового состояния среднеоборотного дизеля с учетом кипения охлаждающей жидкости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 7, с. 22–28, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-7-22-28>

References

- [1] Dorozhkin N.N., ed. *Tsentrobeznoye pripekanie poroshkovykh pokrytiy pri peremennykh silovykh vozdeystviya* [Centrifugal bake-on of powder coatings using force impact]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1993. 159 p. (In Russ.).
- [2] Dorozhkin N.N., Abramovich T.M., Zhornik V.I. *Poluchenie pokrytiy metodom pripekaniya* [Producing of coating by bake-on method]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 176 p. (In Russ.).
- [3] Fu X., Wang B., Tang X. et al. Study on induction heating of workpiece before gear rolling process with different coil structures. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, vol. 114, pp. 1–9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.192>
- [4] Wrona E., Nacke B., Schwenk W. Solving complex induction hardening tasks by numerical methods. *Proc. Int. Symp. on Heating by Electromagnetic Sources*, 2004, pp. 593–598.
- [5] Fang X., Wang J., Cao W. Induction heating of large-diameter thin-walled elbow based on skin effect. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, vol. 36, no. 8, pp. 958–963.
- [6] Liu S., Shi H., Feng L. Transformer harmonic loss model considering skin effect and proximity effect. *Dianli Zidonghua Shebei / Electr. Power Autom. Equip.*, 2015, vol. 35, no. 3, pp. 133–139, doi: <http://dx.doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2015.03.021>
- [7] Mitschang P., Rudolf R., Neitzel M. Continuous induction welding process, modelling and realisation. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2002, vol. 15, no. 2, pp. 127–153, doi: <https://doi.org/10.1177%2F0892705702015002451>
- [8] Gafo Yu.N. *Opredelyayushchie uravneniya fenomenologicheskoy teorii polzuchesti poroshkovykh materialov* [Defining equations of phenomenological creep theory of powder materials]. Minsk, Tonpik Publ., 2006, pp. 18–19. (In Russ.).
- [9] Nagy S. Optimizations of induction heating installations. *Acta Electrotehnica*, 2004, vol. 45, pp. 117–121.
- [10] Novac M. Numerical modeling of induction heating process using inductors with circular shape turns. *J. Electr. Electron. Eng.*, 2008, no. 1, pp. 107–110.
- [11] Lupi S. Modeling for research and industrial development in induction heating. *4th Int. Conf. on EM Processing of Material EPM*, 2003, pp. 32–33.
- [12] Jankowski T.A. Experimental observation and numerical prediction of induction heating in a graphite test. *COMSOL Conf.*, 2009. 354 p.
- [13] Doležel I., Kropík P., Ulrych B. Induction heating of thin metal plates in time-varying external magnetic field solved as nonlinear hard-coupled problem. *Appl. Math. Comput.*, 2013, vol. 219, pp. 7159–7169, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2011.08.042>
- [14] Bashirov R.D. Technological support of surface layer state. *Uchenye zapiski*, 1996, no. 2, pp. 43–47. (In Russ.).
- [15] Bashirov R.D. [Determination of optimum temperature-time field at induction bake-on of cylinder sleeve]. *Problemy bezopasnosti morskogo sudokhodstva, tekhnicheskoy i kommercheskoy ekspluatatsii morskogo transporta. Mat. 3-y region. nauch.-tekh. konf.* [Safety Problems of Sea Shipping, technical and Commercial Exploitation of Marine Transport. Proc. 3rd Sci.-Tech. Conf.]. Novorossiysk, NGMA Publ., 2002, pp. 150–153. (In Russ.).
- [16] Bashirov R.D. On effect of technological parameters of axial bake-on on coating adhesiveness with cylinder sleeve base. *Vestnik Odesskogo Natsional'nogo morskogo universiteta*, 2002, no. 2, pp. 224–228. (In Russ.).

- [17] Bashirov R.D. Simulation of temperature distribution on cylinder sleeve wall at centrifugal induction bake-on [Vestnik of Astrakhan State Technical University], 2004, no. 1, pp. 184–186. (In Russ.).
- [18] Sosnovskiy I.A., Belyavin K.E., Khudoley A.L. Tekhnologiya induktsionnogo nagreva v protsessakh tsentrobezhnogo nanoseniya pokrytiy [Induction heating technology in processes of centrifugal coating deposition]. V: *Perspektivnye materialy i tekhnologii*. T. 1 [In: Prospective materials and technologies. Vol. 1]. Vitebsk, VGTU Publ., 2015, pp. 300–313. (In Russ.).
- [19] Belotserkovskiy M.A., Kurilenok A.A., Sosnovskiy I.A. [Manufacture of nanocomponents with antifriction coating by inductive centrifugal weld deposition of powders based on copper alloys]. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Mat. Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative Technologies in Machine Building. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Novopolotsk, PGU Publ., 2015, pp. 23–25. (In Russ.).
- [20] Gafo Yu.N., Sosnovskiy I.A. Kinetics of tightening at centrifugal inductive weld deposition of metal powder coatings. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 13, pp. 9–11. (In Russ.).
- [21] Myagkov L.L., Sivachev V.M. Methods for determining the thermal state of medium-speed diesel engines taking into account boiling of the coolant. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 7, pp. 22–28, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-7-22-28> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.03.2022

Информация об авторах

БАШИРОВ Расим Джавад оглы — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальные материалы и средства». Азербайджанский технический университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az).

АМИРОВ Фариз Гачай оглы — доктор технических наук, профессор кафедры «Специальные технологии и оборудование». Азербайджанский технический университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

Information about the authors

BASHIROV Rasim Javad — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Special Materials and Tools. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave. Bldg. 25, e-mail: rasim_agma@aztu.edu.az).

AMIROV Fariz Gachay — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Special Technologies and Equipment. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave. Bldg. 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Баширов Р.Дж., Амиров Ф.Г. Методика определения теплового состояния втулки цилиндра при центробежном индукционном напекании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 33–41, doi: [10.18698/0536-1044-2022-8-33-41](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-33-41)

Please cite this article in English as:

Bashirov R.J., Amirov F.G. Method for Determining the Thermal State of the Cylinder Sleeve During Centrifugal Induction Sintering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, pp. 33–41, doi: [10.18698/0536-1044-2022-8-33-41](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-33-41)