Сведения об авторах**Принадлежность к организации**

Родионов Юрий Викторович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, rodionow.u.w@rambler.ru.

Щегольков Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: energynano@yandex.ru.

Никитин Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: vacuum2008@yandex.ru.

Зорин Александр Сергеевич – Генеральный директор ООО «З-лайн», Россия, г. Рассказово, e-mail: zorin619@bk.ru.

Author credentials**Affiliations**

Rodionov Yury – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru.

Shchegolkov Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: energynano@yandex.ru.

Nikitin Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: vacuum2008@yandex.ru.

Zorin Alexander – General Director of LLC “Z-Line”, Russia, Rasskazovo, e-mail: zorin619@bk.ru.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «Методология создания тепловых аккумуляторов на основе наномодифицированных теплоаккумулирующих материалов» № 18-43-680012.

Поступила в редакцию (Received): 10.01.2020 Принята к публикации (Accepted): 14.02.2020

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-1-50-59

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕРМОРАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА
ИЗНОШЕННЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ**

¹Ли Роман Иннокентьевич

¹Псарев Дмитрий Николаевич

¹Быконя Андрей Николаевич

¹Пчельников Андрей Витальевич

¹Мельников Антон Юрьевич

¹ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Реферат. Восстановление изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях техники полимерными материалами позволяет повысить ресурс последних, сократить затраты на ремонт, повысить надежность техники. Анализ литературы показал, что в настоящее время нет информации об инфракрасной обработке полимерных покрытий, нанесенных в ходе восстановления корпусных деталей техники. Для расчета технологических параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей типа II (подшипниковые шиты автомобильных и тракторных генераторов, электродвигателей) разработана модель инфракрасного нагрева корпусных деталей, позволяющая с учетом конструктивных параметров инфракрасной установки, расстояния от излучателя до детали, рассчитать время и температуру нагрева корпусных деталей.

Первоначально составили уравнение баланса мощности инфракрасного излучения при нагреве тела, которое представили как сумму мощностей излучения: полученную от излучателя, выделяемую телом в условиях свободного конвективного теплообмена с внешней средой в неограниченном объеме и затрачиваемую на нагрев тела, используя математические преобразования. Получили формулы для расчета мощностей инфракрасного излучения на основе законов Стефана-Больцмана и Ньютона-Рихмана. Далее учли теплоёмкость материала, массу и площадь поверхности подшипникового щита, конструктивные параметры детали (диаметр подшипникового щита, диаметр отверстия под подшипник), температуру окружающей среды и установившуюся температуру подшипникового щита при нагреве, конструктивные параметры установки инфракрасного излучения (угол рассеивания отражателя, мощность и КПД излучателя). Получили формулы для расчета скорости роста температуры тела и времени нагрева детали до заданной температуры при инфракрасном нагреве. Контрольным экспериментом установлена высокая сходимость расчетных и экспериментальных значений параметров нагрева корпусной детали, корректность полученной модели. Относительная погрешность при расчете температуры не превышала 4,3%, времени нагрева – 5,3%.

Ключевые слова: корпусная деталь, отверстие, износ, полимерное покрытие, качество, инфракрасный нагрев, температура, время.

THEORETICAL ASPECTS OF THERMAL RADIATION HEATING OF WORN-OUT CASE DETAILS OF EQUIPMENT DURING RESTORATION

¹Li Roman

¹Psarev Dmitry

¹Bykonya Andrew

¹Pchelnykov Andrew

¹Melnikov Anton

¹FSBEI HE "Lipetsk State Technical University"

Abstract. The restoration of worn landing holes in the body parts of the equipment with polymer materials can increase the resource of the latter, reduce repair costs, and increase the reliability of the equipment. An analysis of the literature showed that information on the infrared treatment of polymer coatings applied during the restoration of the hull parts of the equipment is currently missing. The model of infrared heating of body parts, which allows taking into account the design parameters of the infrared installation, the distance from the emitter to the part, to calculate the time and temperature of heating of body parts, was developed to calculate the technological parameters of infrared heating of body parts of type II (bearing shields of automobile and tractor generators, electric motors). The equation of the power balance of infrared radiation during heating of the body was initially compiled, which was presented as the sum of the radiation powers obtained from the emitter emitted by the body under conditions of free convective heat exchange with the external environment in an unlimited volume and spent on heating the body using mathematical transformations. Formulas for calculating infrared radiation powers based on the laws of Stefan-Boltzmann and Newton-Richmann were obtained. The heat capacity of the material, the mass and surface area of the bearing shield, the structural parameters of the part (diameter of the shield, diameter of the bore for the bearing), the ambient temperature and the steady temperature of the bearing shield when heated, the design parameters of the infrared radiation setting (reflector angle, power and efficiency emitter) are taken into account further. Formulas for calculating the rate of increase in body temperature and the heating time of a part to a given temperature with infrared heating were obtained. The high convergence of the calculated and experimental values of the heating parameters of the body part, the correctness of the obtained model was established using a control experiment. The relative error in calculating the temperature did not exceed 4.3%, the heating time - 5.3%.

Keywords: body part, hole, wear, polymer coating, quality, in-fractional heating, temperature, time.

Введение. Способы восстановления изношенных корпусных деталей техники полимерными материалами не требуют сложного технологического оборудования и высокой квалификации ремонтного персонала, отличаются низкими затратами, обеспечивают фреттингостойкость

посадочных отверстий под подшипники и повышают ресурс подшипниковых узлов [1 – 5]. Наиболее эффективно восстановление изношенных посадочных отверстий нанесением покрытий из раствора эластомера [6]. Для придания необходимых деформационно-прочностных свойств полимерное покрытие отверждают при повышенной температуре (110 – 150 °С). Термическую обработку покрытия осуществляют конвективным или терморadiационным способами [7].

Существенным недостатком конвективного способа сушки является пористость покрытий из-за испарения растворителя [8]. При конвективном способе тепло передается от горячего воздуха покрытию с внешней поверхности. Благодаря тому, что подвод тепла осуществляется снаружи покрытия, вначале отверждаются внешние слои полимерного покрытия (рисунок 1А). Впоследствии при нагреве нижних слоев покрытия, последние отверждаются. При этом пары растворителя образуют в вышележащих, уже отвержденных слоях покрытия, поры, через которые они выходят в окружающую среду. Повышенная пористость покрытия уменьшает ее ресурс, долговечность всего подшипникового узла и корпусной детали при эксплуатации [9 – 12].

Терморadiационный способ сушки отличается тем, что инфракрасные волны нагревают металлическую подложку (корпусную деталь), а не воздух. По этой причине вначале отверждается нижний слой, затем вышележащие слои полимерного покрытия [8]. При отверждении пары растворителя выходят в окружающую среду значительно в меньшей степени повреждая полимерное покрытие, то есть пористость при терморadiационном способе существенно ниже (рисунок 1Б).

Установки инфракрасной сушки имеют компактные размеры и мобильны, в сравнении с конвективным способом отличаются гораздо меньшим энергопотреблением, так как не тратится энергия на нагрев воздуха.

В настоящее время технологические параметры инфракрасной сушки лакокрасочных покрытий (установившаяся температура покрытия, соответствующие ей расстояние от излучателя до объекта и время нагрева) определяют экспериментально. Необходим метод расчета технологических параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей различного исполнения: корпуса коробок передач, раздаточных коробок, редукторов – тип I, подшипниковые щиты электродвигателей – тип II и др. [7].

Проведен литературный обзор, который показал, что в настоящее время нет информации об инфракрасной обработке полимерных покрытий, нанесенных в ходе восстановления корпусных деталей техники. Необходимы всесторонние исследования в этой области, что позволит повысить эффективность восстановления корпусных деталей, обеспечит снижение затрат на ремонт техники.

А – конвективный способ подвода тепла; Б – терморadiационный способ подвода тепла [8]

Рисунок 1 – Схема испарения растворителя в покрытии из раствора эластомера

Цель настоящих исследований заключалась в разработке модели инфракрасного нагрева корпусных деталей типа II (подшипниковые щиты автомобильных и тракторных генераторов, электродвигателей) и оценке ее корректности (исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Липецкой области в рамках научного проекта № 19-48-480008/19).

Результаты и их обсуждение. Модель инфракрасного нагрева корпусных деталей типа II.

Уравнение баланса мощности инфракрасного излучения при нагреве тела представили в следующем виде [15]

$$q_{изл} = q_1 + q_2 + q_3, \quad (1)$$

где $q_{изл}$ – мощность инфракрасного излучения, которая получена телом от излучателя; q_1 – мощность излучения, выделяемая нагретым телом при лучеиспускании; q_2 – мощность излучения, выделяемая телом в условиях свободного конвективного теплообмена с внешней средой в неограниченном объеме; q_3 – мощность излучения, затрачиваемая на нагрев тела.

Исходя из закона Стефана-Больцмана для серого тела [13], формула для расчета величины q_1 имеет вид

$$q_1 = \varepsilon \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F, \quad (2)$$

где ε – степень черноты серого тела, для чугуна $\varepsilon = 0,60 - 0,70$; C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$; T – абсолютная температура тела, К; F – площадь поверхности тела, м^2 .

Исходя из закона Ньютона-Рихмана, величина q_2 может быть определена по зависимости

$$q_2 = k \cdot (T - T_0) \cdot F, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$; T_0 – температура окружающей среды, К.

Величину q_3 следует рассчитывать по известной зависимости [14]

$$q_3 = C_v m \frac{dT}{d\tau}, \quad (4)$$

где C_v – теплоёмкость тела, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; m – масса тела, кг; $\frac{dT}{d\tau}$ – скорость повышения температуры тела; τ – время нагрева.

Формулы (2) – (4) подставили в формулу (1) и в результате получили

$$q_{изл} = \varepsilon \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F + k(T - T_0)F + C_v m \frac{dT}{d\tau}. \quad (5)$$

В виду того, что мощность излучения поглощаемая телом постоянна ($q_{изл} = const$), дифференциал $dq_{изл} = 0$ и, поэтому справедливо равенство

$$dq_1 + dq_2 + dq_3 = 0.$$

Далее определили соответствующие дифференциалы и в итоге получили равенство

$$C_v m \ddot{T} = -kF \dot{T} d\tau - \frac{\varepsilon C_0 F}{25} \left(\frac{T}{100} \right)^3 \dot{T} d\tau. \quad (6)$$

Для заданных постоянных условий нагрева тела предложена величина – константа нагревания, которая имеет вид

$$H = \frac{C_v m}{kF + \frac{\varepsilon C_0 F}{25} \left(\frac{T}{100} \right)^3} = const. \quad (7)$$

С учетом формулы (7) формула (6) получила вид

$$-H \times \ddot{T} = \dot{T}, \quad \ddot{T} = \frac{\dot{T}}{-H}. \quad (8)$$

Чтобы понизить порядок дифференциального уравнения (8) ввели переменную $z = \dot{T}$.

$$\frac{dz}{d\tau} = -\frac{z}{H}, \quad \int_{z_0}^z \frac{dz}{z} = -\frac{1}{H} \int_0^\tau d\tau, \quad \ln(z) - \ln(z_0) = -\frac{\tau}{H},$$

$$\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = -\frac{\tau}{H}, \quad \frac{z}{z_0} = \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right), \quad z = z_0 \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right).$$

Окончательно получили

$$\dot{T} = \dot{T}_0 \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right), \quad (9)$$

где $\dot{T}$ – скорость роста температуры тела; $\dot{T}_0$ – скорость роста температуры тела в начальный момент времени.

После интегрирования формулы (9) получили формулу зависимости температуры тела T от времени нагрева τ

$$\begin{aligned} \int_{T_0}^T dT &= \int_0^\tau \dot{T}_0 \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) d\tau, \\ T - T_0 &= \dot{T}_0 \left(-H \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \right) \Big|_0^\tau = -\dot{T}_0 H \left(\exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) - 1 \right), \\ T &= T_0 + \dot{T}_0 H \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Затем получили формулу для расчета температуры тела в установившемся режиме нагрева $T_{уст}$.

При $\tau \rightarrow \infty$, $T \rightarrow T_{уст}$, формула (10) преобразуется к виду

$$T_{уст} = T_0 + H \times \dot{T}_0, \quad (11)$$

Далее определили $\dot{T}_0$.

В начальный момент времени

$$q_{изл} = C_v m \frac{dT}{d\tau}.$$

Откуда

$$\dot{T}_0 = \frac{q_{изл}}{C_v m}.$$

Поэтому формула (11) преобразуется в виду

$$T_{уст} = T_0 + \frac{H q_{изл}}{C_v m}. \quad (12)$$

Для условий установившегося режима нагрева, т.е. при $\frac{dT}{d\tau} = 0$, по зависимости (1) получена формула для определения коэффициента теплоотдачи тела k

$$k = \frac{\frac{q_{изл}}{F} - \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4}{T_{уст} - T_0}. \quad (13)$$

Далее по выражению (10), получена формула времени нагрева тела τ до заданной температуры T

$$T - T_0 = \dot{T}_0 H \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \right), \quad 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) = \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}, \quad \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) = 1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}.$$

После логарифмирования по основанию e , получили выражение

$$\begin{aligned} -\frac{\tau}{H} &= \ln\left(1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}\right), \quad \tau = -H \ln\left(1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}\right), \\ \tau &= H \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Из выражения (9) видно, что при условии $\tau = 6H$ скорость роста температуры будет минимальной и прирост температуры составит $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/сек}$, т.е. через время равное $6H$, практически наступит установившийся режим $T_{уст} = 6H$.

После анализа формул (14), (10), (7) и (13) установлено, что для расчета технологических параметров нагрева (времени и температуры нагрева), необходима формула расчета мощности инфракрасного излучения $q_{изл}$.

Расчёт мощности инфракрасного излучения $q_{изл}$ от инфракрасного излучателя

Фронт падающей на подшипниковый щит волны представили как цилиндрическую поверхность (без учёта краевых эффектов).

Формула для расчета расстояния S от т. А до т. В имеет вид (рисунок 2)

$$S^2 = L^2 + L^2 \operatorname{tg}^2 \beta + L^2 \operatorname{tg}^2 \alpha,$$

$$S^2 = L^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \beta} + \operatorname{tg}^2 \alpha \right).$$

1 – инфракрасный излучатель; 2 – деталь; L – расстояние от излучателя до детали;
 ℓ – длина излучателя; т. А – точка на элементарной площадке $d\delta$ поверхности детали;
 В и С – точки на элементарных участках излучателя; D – центр оси вращения детали;
 $\angle \alpha$ – угол в вертикальной плоскости, $0 \leq \angle \alpha \leq \alpha_0$;
 $\angle \beta$ – угол в горизонтальной плоскости, $0 \leq \angle \beta \leq \beta_0$

Рисунок 2 – Схема облучения подшипникового щита

Поверхность излучателя условно разбили на элементарные участки излучения длиной dl

$$dl = \frac{L}{\cos \beta} d\beta.$$

Ввели величину – удельная мощность излучения

$$q_{уд} = \frac{Q_{изл}}{l},$$

где $Q_{изл}$ – мощность излучателя электрическая, Вт.

В этом случае элементарную мощность (мощность элементарного участка излучения) можно определить по формуле

$$q_{yo}dl = \frac{Q_{u3l}}{l} \frac{L}{\cos \beta} d\beta.$$

Элементарная интенсивность волны от элементарного участка излучения в т. А

$$dI = \frac{2q_{yo}dl}{4\pi S^2} = \frac{2Q_{u3l}Ld\beta}{l \cos \beta 4\pi L^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \beta} + tg^2 \alpha \right)} = \frac{Q_{u3l}}{2\pi Ll} \frac{d\beta}{\left(\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times tg^2 \alpha \right)}.$$

Фиксируя значения α , можно записать для интенсивности волны, падающей на элементарную площадку $d\delta$ выражение

$$I = \frac{Q_{u3l}}{2\pi Ll} \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times tg^2 \alpha},$$

где β_0 – предельное значение угла β , $\beta_0 = \arctg\left(\frac{l}{2L}\right)$, рад.

При этом элементарная мощность от ИК-излучателя получит вид

$$dq_{u3l} = Id\delta.$$

Используя рисунок 2 определили элементарную площадку $d\delta$

$$d\delta = 2\sqrt{\frac{D^2}{4} - (Ltg\alpha)^2} \frac{L}{\cos \alpha} d\alpha.$$

После интегрирования получена формула мощности инфракрасного излучения от излучателя q_{u3l}

$$q_{u3l} = \frac{2Q_{u3l}}{\pi l} \int_0^{\alpha_0} \sqrt{\frac{D^2}{4} - (Ltg\alpha)^2} \frac{d\alpha}{\cos \alpha} \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times tg^2 \alpha}, \quad (15)$$

где $\alpha_0 = \arctg\left(\frac{D}{2L}\right)$ из рисунка 2.

Необходимо учитывать конструктивные параметры установки (угол рассеивания отражателя φ , КПД излучателя μ) и степень черноты тела ε . После ввода этих величин формула (15) получила вид

$$q_{u3l} = \frac{2Q_{u3l}\mu}{\pi l} \frac{2\pi\varepsilon}{\varphi} \int_0^{\alpha_0} \sqrt{\frac{D^2}{4} - (Ltg\alpha)^2} \frac{d\alpha}{\cos \alpha} \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times tg^2 \alpha},$$

где φ – угол рассеивания отражателя, рад; μ – КПД излучателя.

В итоге мощность инфракрасного излучения от инфракрасного излучателя следует определять по формуле

$$q_{u3l} = \frac{4Q_{u3l}\mu\varepsilon}{\varphi l} \int_0^{\alpha_0} \sqrt{\frac{D^2}{4} - (Ltg\alpha)^2} \frac{d\alpha}{\cos \alpha} \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times tg^2 \alpha}. \quad (16)$$

С целью проверки корректности полученной модели провели контрольный эксперимент. Исследования проводили, нагревая подшипниковый щит электродвигателя 4A112-2. Для нагрева использовали установку, которая включала: отражатель марки QTSR и инфракрасную лампу QTS мощностью 750 Вт.

В таблице 1 приведены результаты контрольного эксперимента. На рисунке 3 показаны расчетная и экспериментальная зависимости температуры подшипникового щита T от времени нагрева τ .

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные значения параметров нагрева корпусной детали типа II

Расстояние L , м	Константа нагрева H , с	Температура t , °C		Время нагрева τ , мин	
		Расчетная	Экспериментальная	Расчетная	Экспериментальная
0,20	715,7	86,7	88,1	78,8	82,0
0,25	943,0	73,5	71,5	89,0	94,0
0,30	1128,8	68,5	65,7	124,3	130,0

Рисунок 2 – Расчетная и экспериментальная зависимости температуры подшипникового щита T от времени нагрева τ

Относительная погрешность при расчете температуры колеблется от 1,6% до 4,3%, времени нагрева – от 3,9 до 5,3%.

Выводы.

1. Проведены теоретические исследования и получена модель терморadiационного нагрева корпусных деталей типа II при восстановлении полимерными материалами. Модель позволяет с учетом конструктивных параметров инфракрасной установки, расстояния от излучателя до детали, рассчитать время и температуру нагрева корпусных деталей.

2. Контрольным экспериментом установлена высокая сходимость расчетных и экспериментальных значений параметров нагрева корпусной детали, корректность полученной модели.

Список литературы

1. Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Логачёв В.Н., Титов Н.В. Технология восстановления с упрочнением деталей машин на основе применения микродугового оксидирования // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 10. – С. 16–21.
2. Кононенко А.С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков // Дис. докт. техн. наук. (05.20.03) – Москва, 2012. – 405 с.

3. Жачкин С.Ю., Краснова М.Н., Пеньков Н.А., Краснов А.И. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 120. – С. 130 – 134.
4. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 1. С. 89 – 94.
5. Курчаткин В.В. Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами // Дис. докт. техн. наук. (05.20.03) – Москва, 1989. – 407 с.
6. Ли Р.И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники. Липецк: Изд-во ЛГТУ, – 2014. – 379 с.
7. Ли Р.И. Полимерные композиционные материалы для фиксации подшипников качения в узлах машин: монография. Липецк: Изд-во ЛГТУ, – 2017. – 224 с.
8. Курчаткин В.В., Тельнов Н.Ф., Ачкасов К.А., Батищев А.Н. Надежность и ремонт машин / под ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
9. Ли Р.И., Кирсанов Ф.А., Киба М.Р. Технология и оснастка для высокоточного восстановления полимером посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники // Клеи. Герметики. Технологии. – 2016. – №3. – С. 28 – 33.
10. Ли Р.И., Мироненко А.В. Восстановление корпусных деталей автомобильной техники полимер-полимерной композицией // Мир транспорта и технологических машин – 2016. – №4. – С. 9 – 15.
11. Машин Д.В. Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники композицией на основе эластомера Ф-40 // Дис. канд. техн. наук. (05.20.03) – Мичуринск, 2013. – 149 с.
12. Колесников А.А. Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобилей полимерными композиционными материалами после ультразвуковой обработки // Дис. канд. техн. наук. (05.22.10) – Орел, 2017. – 179 с.
13. Кузовлев, В. А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи / под ред. Л.Р. Стоцкого. – М.: Высшая школа, 1983. 680 с.
14. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2: Термодинамика и молекулярная физика – М, 2005. – 551 с.
15. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Быконя А.Н. Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом // Клеи. Герметики, Технологии. – 2019. – № 9. – С. 38 – 43.

References

1. Kolomejchenko A.V., Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Logachyov V.N., Titov N.V. Tekhnologiya vosstanovleniya s uprochneniem detalej mashin na osnove primeneniya mikrodogovogo oksidirovaniya // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 2014. – № 10. – S. 16–21.
2. Kononenko A.S. Povyshenie nadezhnosti nepodvizhnykh flancevykh soedinenij sel'skoxozyajstvennoj tekhniki ispol'zovaniem nanostrukturirovannykh germetikov // Dis. dokt. texn. nauk. (05.20.03) – Moskva, 2012. – 405 s.
3. Zhachkin S.Yu., Krasnova M.N., Pen'kov N.A., Krasnov A.I. Modelirovanie mexanicheskogo vozdejstviya instrumenta pri poluchenii gal'vanicheskix kompozitnyx pokrytij // Trudy GOSNITI. – 2015. – T. 120. – S. 130 – 134.
4. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Povyshenie stojkosti polimernyx kompozitov xolodnogo otverzhdeniya k vozdejstviyu rabochix zhidkostej ispol'zovaniem nanomaterialov // Mezhdunarodnyj tekhniko-e'konomicheskij zhurnal. – 2015. – № 1. S. 89 – 94.
5. Kurchatkin V.V. Vosstanovlenie posadok podshipnikov kacheniya sel'skoxozyajstvennoj tekhniki polimernymi materialami // Dis. dokt. texn. nauk. (05.20.03) – Moskva, 1989. – 407 s.
6. Li R.I. Teknologii vosstanovleniya i uprochneniya detalej avtotraktornoj tekhniki. Lipeck: Izd-vo LGTU, – 2014. – 379 s.
7. Li R.I. Polimernye kompozicionnye materialy dlya fiksacii podshipnikov kacheniya v uzлах mashin: monografiya. Lipeck: Izd-vo LGTU, – 2017. – 224 s.

8. Kurchatkin V.V., Tel'nov N.F., Achkasov K.A., Batishhev A.N. Nadezhnost' i remont mashin / pod red. V. V. Kurchatkina. – M.: Kolos, 2000. – 776 s.

9. Li R.I., Kirsanov F.A., Kiba M.R. Tekhnologiya i osnastka dlya vysokotochnogo vosstanovleniya polimerom posadochnyx otverstij v korpusnyx detal'nyx avtotraktornoj tekhniki // Klei. Germetiki. Tekhnologii. – 2016. – №3. – S. 28 – 33.

10. Li R.I., Mironenko A.V. Vosstanovlenie korpusnyx detal'nyx avtomobil'noj tekhniki polimer-polimernoj kompoziciej // Mir transporta i tekhnologicheskix mashin – 2016. – №4. – S. 9 – 15.

11. Mashin D.V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya posadochnyx otverstij v korpusnyx detal'nyx avtotraktornoj tekhniki kompoziciej na osnove e'lastomera F-40 // Dis. kand. texn. nauk. (05.20.03) – Michurinsk, 2013. – 149 s.

12. Kolesnikov A.A. Povyshenie kachestva vosstanovleniya korpusnyx detal'nyx avtomobilej polimernymi kompozicionnymi materialami posle ul'trazvukovoj obrabotki // Dis. kand. texn. nauk. (05.22.10) – Orel, 2017. – 179 s.

13. Kuzovlev, V. A. Texnicheskaya termodinamika i osnovy teploperedachi / pod red. L.R. Stockogo. – M.: Vysshaya shkola, 1983. 680 s.

14. Sivuxin D.V. Obshhij kurs fiziki. Tom 2: Termodinamika i molekulyarnaya fizika – M, 2005. – 551 s.

15. Li R.I., Psarev D.N., Bykonya A.N. Matematicheskaya model' infrakrasnogo nagreva korpusnyx detal'nyx pri vosstanovlenii polimernym materialom // Klei. Germetiki, Tekhnologii. – 2019. – № 9. – S. 38 – 43.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ли Роман Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: romanlee@list.ru.

Псарев Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Быконя Андрей Николаевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: loseroff@mail.ru.

Пчельников Андрей Витальевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: lime-ebay@rambler.ru.

Мельников Антон Юрьевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Li Roman – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: romanlee@list.ru.

Psarev Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Bykonya Andrew – post graduate student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: loseroff@mail.ru.

Pchelnikov Andrew – post graduate student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: lime-ebay@rambler.ru.

Melnikov Anton – post graduate student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 26.12.2019 Принята к публикации (Accepted): 31.01.2020