

Л. В. АВТОНОМОВА, Е. Д. ГРОЗЕНОК, Э. А. СИМСОН, А. В. СТЕПУК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА

У роботі розглянуто технологічний процес виготовлення поковок підшипникового кільця з урахуванням технологічної спадковості. Приведено зв'язану математичну модель, яка описує процес індукційного нагріву і об'ємного штампування. Методом скінченних елементів чисельно вирішено зв'язані крайові задачі електромагнітного поля, теплопровідності і контактну задачу термов'язкопластичності. Знайдені розподіли полів температур і графіки зміни зусиль на штампі і пуансоні в процесі осаджування і формування показали необхідність урахування технологічної спадковості при визначенні раціональних параметрів технологічного процесу виготовлення кільця підшипника.

Ключові слова: кільце підшипника, температурне поле, індукційний нагрів, формування, осадання, термов'язкопластичність.

В работе рассмотрен технологический процесс изготовления поковок подшипникового кольца с учетом технологической наследственности. Приведена связанная математическая модель, которая описывает процесс индукционного нагрева и объемной штамповки. Методом конечных элементов численно решены связанные краевые задачи электромагнитного поля, теплопроводности и контактная задача термовязкопластичности. Найденные распределения полей температур и графики изменения усилий штампа и пуансона в процессе осадки и формовки показали необходимость учета технологической наследственности при определении рациональных параметров технологического процесса изготовления кольца подшипника.

Ключевые слова: кольцо подшипника, температурное поле, индукционный нагрев, формовка, осадка, термовязкопластичность.

The research approach and algorithms in technological process of manufacturing of a bearing ring forgings are studied in the paper considering the technological heredity. It is suggested the coupled mathematical model that describes the process of a cylindrical billet initial induction heating and its volumetric punching. The finite element method is used to numerically solve the coupled boundary value problems for the electromagnetic field, the thermal transfer, and the thermos composite contact problems for two alternatives of the initial conditions of the electrical, thermal, and physical-mechanical nonlinear characteristics of the material depending on temperature. The distribution of the temperature field in the cylindrical billet under the cooling process are found before the stamping process starts and meets the requirements to be less than maximum temperature change within the cylindrical billet. The temperature distribution is determined as the initial condition for solving the heat conduction problem and considers the thermal contact in the interaction zones of the blank-stamp, blank-punch or blank-matrix, when modeling the technological operation of draft or molding respectively. The diagrams of die and punch forces that appear during the plastic deformation of the cylindrical workpiece for two variations of a cylindrical billet's initial heating under regular temperature field distribution and its nonuniform field caused by induction heating were defined and built. The analysis of the temperature and force field within the die and punch have proved the technological heredity in determining the rational parameters of the bearing ring's manufacturing process to be considered.

Keywords: ring of bearing, temperature field, induction heating, moulding, sinking, thermo-viscoplasticity.

Введение и анализ последних исследований.

При эксплуатации железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров и грузов особое внимание уделяется вопросам обеспечения безопасности и экономичности за счет сокращения расходов на профилактическое техническое обслуживание и ремонт основных его высоконагруженных узлов, одним из которых является подшипниковый узел. Ресурс и долговечность подшипникового узла определяется разрушением основных несущих поверхностей подшипника, как правило, это выкрашивание дорожек качения или износ торцевых поверхностей колец подшипника. Одной из причин, приводящих к таким негативным явлениям и выходу из строя подшипникового узла, является некачественное изготовление его элементов – подшипниковых колец: использование низкокачественных конструкционных материалов и нарушение технологии изготовления. В условиях эксплуатации при интенсивном циклическом нагружении в подшипниковом кольце может возникнуть усталостное разрушение. Следовательно, повышение долговечности его необходимо осуществлять уже на стадии изготовления за счет выбора оптимальных параметров на каждом этапе технологического процесса, что позволит повысить надежность всего железнодорожного подшипникового узла [1]. К основным технологическим операциям формообразования подшипникового кольца относятся предварительный индукционный нагрев, объемная штамповка и

раскатка. Исследованиям каждой технологической операции при изготовлении подшипникового кольца посвящено большое количество работ [2-7], в которых представлены как экспериментальные, так и численно-аналитические модели анализа термовязкопластического состояния при формообразовании из цилиндрической заготовки. Для получения качественной поковки подшипникового кольца объемной штамповкой необходимо обеспечить нагрев заготовки до температуры $T=1150\text{C}^0$. В работах [2-3] рассматриваются задачи оптимального управления предварительным процессом индукционного нагрева заготовки, а также дана аналитическая оценка и проведен численный расчет температурного поля заготовки, полученный решением краевых задач электромагнитного поля и теплопроводности. Формообразование кольца (соответственно, дорожки качения) из цилиндрической заготовки происходит при помощи технологической операции объемной штамповки, которая включает в себя этапы осадки, формовки и вырубки. Исследованиям влияния различных технологических параметров (вид смазки, форма пуансона и т.д.) на качество поковки и моделированию процесса горячей раскатки посвящен ряд работ [5-7].

Целью данного исследования является математическое моделирование технологического процесса изготовления подшипникового кольца (индукционного нагрева и объемной штамповки) с учетом передачи технологической наследственности

(технологического состояния) по всей цепочке технологических операций.

Постановка задачи. В соответствие с технологическими требованиями, в процессе индукционного нагрева в цилиндрической заготовке должно создаваться температурное поле с перепадом температуры не более 50°C , которое не должно приводить к перегреву заготовки. Для обеспечения рекомендуемых физико-химических свойств и пластичности металла необходимо на стадии проектирования проводить анализ электромагнитного и температурного полей в заготовке. Для определения оптимальных параметров технологического процесса нагрева необходимо решать связанные краевые задачи электромагнитного поля и теплопроводности. Математическая модель [4] включает уравнения электромагнитного поля Максвелла и нестационарное уравнение теплопроводности Фурье с соответствующими граничными и начальными условиями с учетом зависимости термoeлектрических характеристик от температуры:

$$\text{rot}H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu(T) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$J = \sigma(T)E + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

где H - напряженность магнитного поля; E - напряженность электрического поля; B - магнитная индукция; J - плотность тока; D - электрическая индукция; $\sigma(T)$ - электрическая проводимость и $\mu(T)$ - магнитная проницаемость, нелинейно зависящие от температуры T .

Нелинейное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad}T) + Q(t) + p(t) + q_v(t) \quad (4)$$

$$p(t) = \sigma(T)E^2(t) = \frac{1}{\sigma(T)} J^2(t) \quad (5)$$

$$Q(t) = \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (6)$$

где ρ - плотность; $C(T)$ - теплоемкость и $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности металла, зависящие от температуры T ; $q_v(t)$ - скорость тепловыделения объемных источников тепла, $p(t)$ - плотность источников тепла электромагнитного поля, $Q(t)$ - плотность источников тепла при превращении структуры перлита в структуру аустенита, L - объемная плотность источника тепла, Ψ - доля превращенного аустенита. Граничные условия на поверхности заготовки - конвективная и лучистая теплоотдача:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{нов}} = \alpha_k (T_{\text{нов}} - T_{\text{cp}}) + \sigma_e (T_{\text{нов}}^4 - T_{\text{cp}}^4) \quad (7)$$

где α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией; σ_e - коэффициент теплоотдачи излучением; $T_{\text{нов}}, T_{\text{cp}}$ - температуры поверхности и окружающей среды.

Для анализа технологического процесса объемной штамповки подшипникового кольца необходимо решать связанную нелинейную термовязкопластическую контактную задачу с учетом больших деформаций и скоростей деформаций. Математическая модель, рассмотренная авторами в работе [7], включает систему уравнений закона сохранения массы, энергии и момента количества движения в виде:

$$\dot{\rho} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i},$$

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho r - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (8)$$

$$\rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i^B,$$

где $\rho, \dot{\rho}$ - плотность и скорость изменения плотности, v_i, \dot{v}_i - скорости и ускорения материальной точки, $e = e(\rho, T)$ - удельная внутренняя энергия, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений, r - внутренние распределенные источники тепла, q_i - компоненты вектора теплового потока, f_i^B - компоненты вектора объемных сил, T - температура.

Физические уравнения:

$$\sigma_{ij}^T = C_{ijkl} D_{kl}, \quad (9)$$

$$\sigma_{ij}^T = \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \sigma_{ij} - \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \sigma_{jk} - \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \sigma_{ik}, \quad (10)$$

$$D_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right) \quad (11)$$

где $\dot{\sigma}_{ij}$ - тензор скоростей напряжений, C_{ijkl} - тензор физической связи напряжения-деформации, D_{kl} - тензор скоростей деформаций при больших пластических деформациях, который включает пластическую и температурную составляющие:

$$D_{ij} = D_{ij}^p + D_{ij}^T, \quad (12)$$

Пластическое деформирование материала подчиняется ассоциированному закону теории течения в скоростной форме:

$$D_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (13)$$

где $\dot{\lambda}$ - параметр пластичности, F - пластический потенциал, который можно задать в виде соотношения:

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_y, \quad (14)$$

где σ_y - функциональная зависимость для текущего предела текучести, $f(\sigma_{ij})$ - функция пластичности. При высокоскоростном и высокотемпературном деформировании необходимо учитывать зависимость физико-механических свойств материала от уровня температур и скоростей деформаций. Определяющие соотношения представлены в виде:

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\varepsilon}_p, T), \quad (15)$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ - эквивалентная (эффе́ктивная) пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}_p$ - скорость эквивалентной пластической деформации, T - температура.

Контактная задача решается с учетом проскальзывания, т.е.

$$\begin{aligned} |\tau_t| &\leq \mu_s |p_n| \\ f_{cn}^I &= H^I f_{cn}^K, & f_{cn}^J &= H^J f_{cn}^K \end{aligned} \quad (16)$$

где $p_n = \sigma_n = f_{cn}$ и $\tau_t = f_{ct}$ - контактное давление и касательное усилие в точке контакта, μ_s - коэффициент трения.

Для определения термовязкопластического состояния заготовки при технологической операции объемной штамповки необходимо параллельно решать задачу нестационарной теплопроводности (4) - (7) с соответствующими граничными условиями конвективного теплообмена на свободных поверхностях матрицы и учетом контактного теплообмена в зонах контакта заготовка-матрица и пуансон-заготовка. Найденное распределение поля температур в заготовке при решении предыдущей краевой задачи (1) - (7) для индукционного нагрева является начальным состоянием для задачи термовязкопластичности. Решение рассмотренных нелинейных контактных задач можно получить итерационным методом Ньютона-Рафсона.

Численная реализация. В работе методом конечных элементов численно решались связанные нестационарные задачи электромагнитного поля, теплопроводности и термовязкопластичности. Для операций осадки и формовки решались две задачи контактного взаимодействия пуансона с предварительно нагретой цилиндрической заготовкой. В первом варианте начальное поле температур задавалось постоянным по всему объему заготовки ($T=1140^\circ\text{C}$), которое отвечало установленным требованиям технологического процесса штамповки. Во втором варианте при

решении задачи начальным условием задавалось неравномерное температурное поле с максимальной температурой $T_{\max} = 1140^\circ\text{C}$ и перепадом температуры $T_{\max} - T_{\min} = 50^\circ\text{C}$, которое было получено при решении задачи индукционного нагрева авторами в работе [4] для реальных условий нагрева. Конечно-элементная модель цилиндрической заготовки ($R_3=50\text{мм}$, $h_3=190\text{мм}$) включала 10573 элементов и 11024 узла. Материал заготовки Сталь ШХ15. Скорость движения пуансона $V_{II} = 100 \text{ мм/с}$. Коэффициент трения с учетом смазки на контактных поверхностях равен $\mu = 0,3$.

На рис.1 представлено распределение поля температур в цилиндрической заготовке подшипникового кольца: первый вариант рис.1, а - равномерное распределение температуры $T=1140^\circ\text{C}$ в заготовке; второй вариант рис.1, б - неравномерное распределение температуры по объему заготовки после индукционного нагрева.

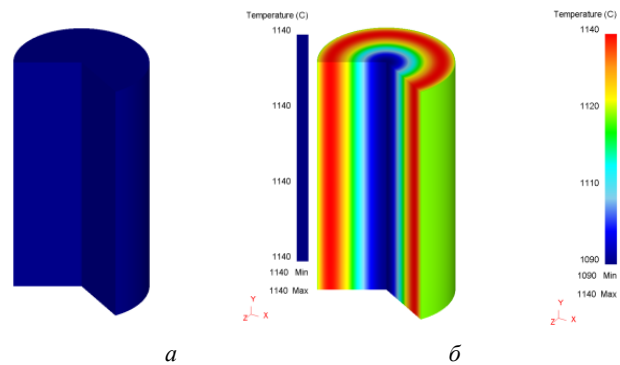


Рис. 1 – Распределение температурного поля в заготовке: а - постоянное, б - после индукционного нагрева

На рис.2 представлено распределение поля температуры в поковке подшипникового кольца после операции осадки при объемной штамповке: первый вариант рис.2, а - предварительный нагрев заготовки с равномерным распределением температуры $T=1140^\circ\text{C}$; второй вариант рис. 2, б - неравномерный предварительный нагрев заготовки.

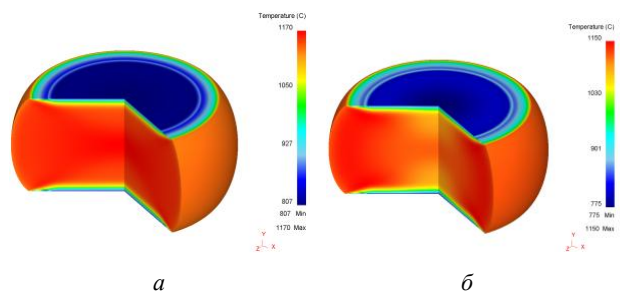


Рис.2 – Распределение температурного поля в поковке после осадки: а - предварительное постоянное распределение температуры, б - предварительное неравномерное распределение температуры

Сравнение решений двух вариантов краевой задачи теплопроводности для осадки показало, что учет предварительного неравномерного нагрева

приводит к снижению температуры в объеме поковки. Это соответствует реальным условиям и свидетельствует о связанности технологических процессов индукционного нагрева и осадки заготовки подшипникового кольца за счет передачи технологической наследственности (температуры). Решение связанной контактной задачи термовязкопластичности позволило определить усилие на штампе в процессе осадки для рассматриваемых двух вариантов. На рис.3 приведены графики изменения усилия: нижняя кривая – при постоянном предварительном нагреве заготовки до температуры $T_{\text{max}} = 1140^{\circ}\text{C}$ (вариант *a*), верхняя кривая - при предварительном неравномерном нагреве заготовки (вариант *б*).

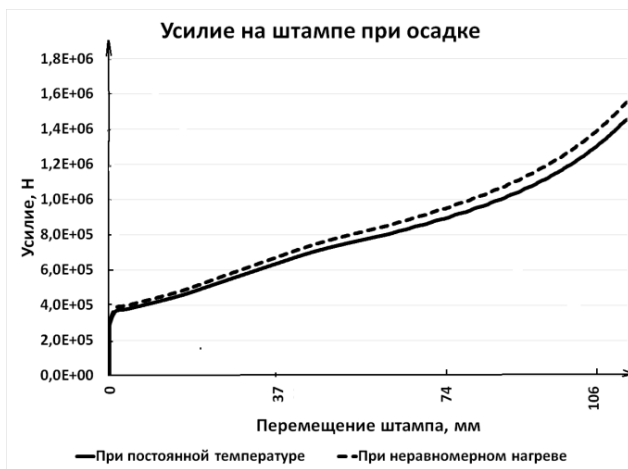


Рис.3 –Изменение усилия штампа в процессе осадки

Далее для определения усилия, прикладываемого к пуансону при проведении следующей технологической операции формовки поковки подшипникового кольца, также решалась краевая контактная задача термовязкопластичности с начальными условиями. Для краевой задачи теплопроводности начальное распределение поля температур было получено при решении задачи моделирования процесса осадки. На свободной поверхности матрицы задавались условия конвективного теплообмена, на контактных поверхностях пуансон-поковка и поковка - матрица выполнялись условия теплового контакта. Найденное распределение напряжений и деформаций в поковке для двух вариантов задач моделирования процесса осадки было использовано как начальное состояние при решении задачи формообразования поковки кольца подшипника операцией формовки. На рис.4 представлены графики изменения усилий на пуансоне для двух соответствующих вариантов начальных состояний для решения задачи термовязкопластичности при моделировании операции формовки. Нижняя кривая соответствует варианту *a*, верхняя кривая соответствует варианту *б*, соответственно вариантам рассмотренных задач для осадки.

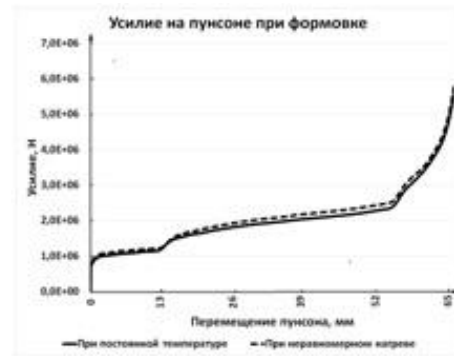


Рис.4 –Изменение усилия штампа в процессе формовки

Анализ графиков изменения усилий на штампе и пуансоне, полученных при моделировании процессов технологических операций осадки и формовки, показал, что учет характера начального предварительного нагрева заготовки влияет на решения термовязкопластичной задачи. Значения усилий, которые соответствуют варианту *б* (неравномерность предварительного нагрева заготовки), превышают значения усилий, полученные при равномерном начальном нагреве заготовки кольца подшипника, в среднем на 7%.

Выводы. В работе представлен подход и математическая модель, которая описывает термонапряженное состояние и процесс формообразования поковки подшипникового кольца, которое вызвано индукционным нагревом и последующим пластическим деформированием при технологических операциях осадки и формовки. Для определения полей распределения температуры и параметров напряженного-деформированного состояния заготовки были решены связанные краевые задачи электромагнитного поля, теплопроводности и термовязкопластичности. Анализ изменения температурных полей и изменения значений усилий на штампе и пуансоне при осадке и формовке показал необходимость учета технологической наследственности в виде температурного поля и предварительного напряженно-деформированного состояния при моделировании технологических операций изготовления повок под подшипникового кольца. Это позволит получить рациональные параметры технологического процесса изготовления подшипникового кольца повышенной долговечности на этапе проектирования.

Список литературы

1. SKF/ Повреждения подшипников качения и их причины. Авторское право SKF AB, 2002, Санкт-Петербург .
2. Данилушкин А. И. Математическая модель индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед раскаткой / А. И. Данилушкин, С. В. Князев, С. И. Семенов // Вестник ВГТУ. 2012. №10-1 С. 101-103.
3. Плещивцева Ю. Э. Оптимальное по быстродействию и энергопотреблению управление периодическим процессом индукционного нагрева металла / Ю. Э. Плещивцева, А. В. Попов, А. И. Дьяконов. // Альманах современной науки и образования. 2013. №2 (69) С.135-142.
4. Грозенок Е. Д. Численное моделирование температурного поля заготовок при индукционном нагреве для изготовления

- подшипниковых колец / *Е. Д. Грозенко, Э. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергин* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х. : НТУ «ХПІ», – 2016. – № 26 (1198). – С. 50-53.
5. *Унксов Е. П.* Теорияковки и штамповки / *Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др.]*. – М. : Машиностроение, 1992. – 720с.
6. *Володин И.М.* Моделирование процессов горячей объемной штамповки Текст: Монография / *И.М. Володин*. – М.: Машиностроение - 1. - 2006. 253 с.
7. *Банньих О. А.* Штамповка поковок с направленным волокнистым строением / *О. А. Банньих, О. А. Белокуров* // Вестник машиностроения. – 2000 – №10. – С. 33-37.
8. *Автономова Л.В.* Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника / *Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенко, Э.А. Симсон* // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 4 (1113). – С. 158-161.
3. *Pleshivtseva Yu. E., Popov A. V., Dyakonov A. I.* Optimalnoe po byistrodeystviyu i energopotrebleniyu upravlenie periodicheskim protsessom induktsionnogo nagreva metalla [Optimal speed and power consumption control of the periodic induction heating processes in metal]. *Almanah sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2013, no 2 (69), pp.135-142.
4. *Grozenok E. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu.* Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya zagotovok pri induktsionnom nagreve dlya izgotovleniya podshipnikoviyh kolets [Numerical modeling of the temperature field in billets during induction heating for bearing rings manufacturing]. *Vіsник NTU «HPІ». Seriya: Dinamika i mišnist mashin*. Kharkov, NTU «HPІ», 2016, no 26 (1198), pp. 50-53.
5. *Unksov E. P., Dzhonson U., Kolmogorov V. L. i dr.* *Teoriya kovki i shtampovki* [Theory of forging and stamping]. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 720 p.
6. *Volodin I.M.* *Modelirovanie processov gorjachej ob#emnoj shtampovki* [Modeling of hot bulk forging processes]. Tekst: Monografija / *I.M. Volodin*. - Moscow: Mashinostroenie - 1. - 2006. 253 p. Slobodyuk A. P.
7. *Banniyh O. A., Belokurov O. A.* Shtampovka pokovok s napravlenyim voloknistyim stroeniem [Forging with rapt fibrous structure]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2000, no 10. 33 p.
8. *Avtonomova L.V., Grozenok E. D., Simson E. A.* *Modelirovanie protsessy goryachej raskatki kolec podshpivnika* [Modeling the process of the bearing rings hot rolling]. *Vіsник NTU «HPІ». Seriya: Dinamika i mišnist mashin*. Kharkov, NTU «HPІ», 2015, no 4 (1113), pp. 158-161.

Поступила (received) 07.04.2017

References (transliterated)

1. Povrezhdeniya podshipnikov kacheniya i ih prichiny [Damages to rolling bearings and their causes]. Avtorskoe pravo SKF AB, 2002, Sankt-Peterburg.
2. *Danilushkin A. I., Knyazev S. V., Semenov S. I.* Matematicheskaya model induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok pered raskatkoj [Mathematical model of induction heating of cylindrical billets before rolling]. *Vestnik VGTU*, 2012, no10-1, pp. 101-103.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання процесу об'ємної штамповки підшипникового кільця/ Л.В. Автономова, Є.Д. Грозенко, Е. А. Сімсон, О.В. Степук// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 14(1236). – С. 135-139. – Бібліогр. 8 назв. – ISSN 2079-0066.

Моделирование процесса объемной штамповки подшипникового кольца/ Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенко, Э. А. Симсон, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 14 (1236). – С.135-139. – Бібліогр: 8 назв. – ISSN 2079-0066.

Modeling the process of the bearing ring bulk stamping/ L.V. Avtonomova, E. D. Grozenok, E. A. Simson, A.V.Srepuk// Bulletin of NTU "KhPI". Series: . – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 14 (1236). . – P. 135-139. – Bibliogr: 8. – ISSN 2079-0066.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Автономова Людмила Володимирівна – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Автономова Людмила Владимировна – кандидат технічних наук, ведучий научний співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Avtonomova Ludmila - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), leading researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Грозенко Евгений Денисович – аспірант кафедри опору матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Грозенко Евгений Денисович – аспірант кафедри сопроотивлення матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Grozenok Ievgen - postgraduate student of strength of materials chair, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Сімсон Едуард Альфредович – доктор технічних наук, професор кафедри опору матеріалів НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: simson@upec.ua.

Симсон Эдуард Альфредович – доктор технічних наук, професор кафедри сопроотивлення матеріалів НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: simson@upec.ua.

Simson Eduard – Doctor of Sciences (High Ph. D.) Strength of materials' Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78; e-mail: simson@upec.ua.

Степук Олександр Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: : abtop@yahoo.com

Степук Александр Владимирович – кандидат фізико-математических наук, старший научний співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: : abtop@yahoo.com

Stepuk Alexander- Candidate of Physics -Mathematical Sciences (Ph. D.), sr. researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com