

УДК 621.77

*Л.В. АВТОНОМОВА, Е.Д. ГРОЗЕНОК, А.В. СТЕПУК, С.Ю. ПОГОРЕЛОВ***ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ УСИЛИЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ РАСКАТКЕ
ЗАГОТОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА**

Методом конечного элемента проведено численное моделирование процесса горячей раскатки заготовки подшипникового кольца. Для определения параметров напряженно-деформированного состояния была решена нестационарная контактная краевая термовязкопластическая задача при неравномерном и постоянном распределении начального поля температур в заготовке. Наблюдается увеличение усилия раскатки неравномерно нагретой заготовки, полученной при штамповке способом однопроходной и двухпроходной формовки. Незначительное повышение энергозатрат на технологическую операцию раскатки позволяет получить подшипниковые кольца с улучшенными прочностными характеристиками.

Ключевые слова: кольцо подшипника, горячая раскатка, моделирование, термовязкопластичность, метод конечных элементов.

В роботі проведено методом скінченного елемента чисельне моделювання процесу гарячого розкочування підшипникового кільця. Для визначення параметрів напружено-деформованого стану була вирішена нестационарна контактна крайова термов'язкопластична задача при нерівномірному розподілу початкового поля температур заготовки. Спостерігається збільшення зусилля розкочування нерівномірно нагрітої заготовки, отриманої при штампуванні способом однопрохідного і двопрхідного формування. Незначне підвищення енерговитрат на технологічну операцію розкочування дозволяє отримати підшипникові кільця з поліпшеними характеристиками міцності.

Ключові слова: кільце підшипника, гаряча раскатка, моделювання, термов'язкопластичність, метод скінчених елементів.

The simulation design of hot rolling process out bearing ring is conducted applying the method of finite elements. A mathematical model to process the high-speed deformation of the ring cylindrical workpiece is presented. To determine parameters of the bearing ring stress-deformed state, during the deforming, the non-stationary contact viscous plastic boundary value problem under non-uniform and instant temperature fields distribution in the workpiece was numeral solved applying the method of finite element based on incremental Lagrange-Euler independent approach. Values of contact forces (pressures) between a roller and a workpiece were defined. The reviewed analysis of overall contact forces variation demonstrated the rolling-out forces increase for initially non-uniformly heated workpiece. The contact forces values are also defined in the hot rolling ring out for rational distribution of fibred structure within the workpiece material after the two-step molding with the more irregular heating of the workpiece. The small growth in energy consumption happening because of the increasing forces during the rolling-out operations leads to producing the bearing rings material having the rational distribution of fibred structures. Such distribution allows to achieve the higher durability of the bearing rings, and results in their robustness increase during the whole working cycle.

Keywords: bearing ring, hot ring rolling, modeling, thermal visco-plasticity, finite element method.

Введение. Процесс изготовления кольца подшипника предполагает последовательное выполнение ряда технологических операций (нагрев, штамповка, раскатка), при проектировании которых необходимо задать входные параметры с учетом технологической наследственности заготовки. В следствии высоких температур и больших пластических деформаций только предварительное моделирование позволяет прогнозировать формоизменение заготовки и структурные изменения ее материала на каждом этапе. Выбор оптимальных параметров заключительной операции – раскатки кольца может обеспечить долговечность подшипника при эксплуатации.

Анализ последних исследований и литературы. Создание мощных программных комплексов позволило проводить численное моделирование методом конечных элементов процесса раскатки подшипникового кольца [1–6]. Исследованию термовязкопластического деформирования кольца при раскатке посвящено много работ, в которых представлены результаты анализа влияния на напряженно– деформированное состояние кольца различных факторов, таких как зависимости термомеханических свойств материала от высоких уровней температуры и скоростей деформаций [2], распределения начальной

температуры предварительного нагрева, вида трения [3] и т.д. В статье [4] рассмотрен процесс расширения внешнего диаметра кольца с учетом реакции материала кольца на режим обработки. Исследованию температурного поля при горячей раскатки колец была посвящена работа [5]. Установлено, что с уменьшением начальной температуры кольцевой заготовки и увеличением скорости подачи холостого вала уменьшается неравномерность распределения температуры кольцевой заготовки. Исследованию микро– и макроструктуры материала в процессе раскатки подшипникового кольца посвящена работа [6]. В статье анализируется изменение волокнистой структуры материала кольца подшипника в процессе горячей раскатки. Представлены картины распределения линий Лагранжа в кольце после раскатки для заготовок, полученных способом однопроходной и двухпроходной формовки при предварительной операции штамповки.

Целью данной статьи является исследование напряженно-деформированного состояния кольца подшипника и контактных усилий, возникающих в процессе горячей раскатки с учетом неравномерного начального нагрева заготовки и распределения волокнистой структуры ее материала.

Постановка задачі. При моделюванні деформування заготовки в процесі раскатки подшипникового кільця прийнята математическа модель, котра включає рівняння закону збереження маси, енергії і моменту кількості руху, умови нерозривності, нелінійні фізическі рівняння, нестационарне рівняння теплопровідності, умови контакту.

Система рівнянь для рішення задачі термовязкопластичності представлена в виді [2]:

$$\dot{\rho} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i}, \quad (1)$$

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho r - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (2)$$

$$\rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i^B, \quad (3)$$

де $\rho, \dot{\rho}$ – густина і швидкість зміни густини, v_i, \dot{v}_i – швидкості і прискорення матеріальної точки, $e = e(\rho, \theta)$ – удільна внутрішня енергія, σ_{ij} – тензор напружень, r – внутрішні розподілені джерела тепла, q_i – вектор теплового потоку, f_i^B – компоненти вектора об'ємних сил, θ – температура.

Фізическі рівняння мають вид:

$$\sigma_{ij}^T = C_{ijkl} D_{kl}, \quad (4)$$

де σ_{ij}^T – тензор швидкостей напружень, C_{ijkl} – тензор фізическої зв'язки напруження-деформації, D_{kl} – тензор швидкостей деформацій:

$$D_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right) \quad (k, l = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Рівняння віртуальної роботи δW в області пластических деформацій в момент часу $t + \Delta t$ може бути записано в виді:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV - \int_V \rho a_i \delta u_i dV - \int_V \rho (v_j - v_j^g) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta u_i dV = \delta W$$

де δu_i – варіація приращення віртуальних переміщень, V – об'єм, e_{ij} – тензор деформацій,

$$\delta W = \int_V \rho f_i^B \delta u_i dV + \int_S f_i^S \delta u_i dS, \quad (7)$$

де f_i^S – компоненти вектора сил на поверхності S .

Рівняння асоційованого закону теорії течія в швидкостній формі:

$$D_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (8)$$

де $\dot{\lambda}$ – параметр пластичності, F – пластический потенціал в виді (пластическе станове відповідає $F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = 0$):

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_y, \quad (9)$$

де $f(\sigma_{ij})$ – функція пластичності, σ_y – функціональна залежність для тепущого предла течущесті від еквівалентної деформації, еквівалентної швидкості деформації і температури, представляемая в виді визначаючого співвідношення:

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, \theta), \quad (10)$$

де $\bar{\varepsilon}_p$ – еквівалентна пластическа деформація, $\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ – швидкість еквівалентної пластическої деформації.

Граничні умови на контактній поверхності приймаються:

$$|\tau_t| > \mu_s |p_n|. \quad (11)$$

де p_n і τ_t – контактне тиск і касателне зусилля в точці контакту, μ_s – коефіцієнт тертя.

Рівняння нестационарної теплопровідності можна представити в виді:

$$\rho c \dot{\theta} + \rho c (v_i - v_i^g) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \frac{\partial (\lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial x_i})}{\partial x_i} = \dot{q}_v \quad (12)$$

де c – теплоємність, λ^* – коефіцієнт теплопровідності, \dot{q}_v – швидкість тепловиділення об'ємних джерел тепла.

Граничні умови для задачі теплопровідності приймаються на вільній поверхності конвективний теплообмін со середою:

$$q_s = -\lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_s = n^* (\theta_s - \theta_0) \Big|_s \quad (13)$$

налічие джерела тепла на контактній поверхності

$$q_s \Big|_{s^*} = q_{s^*}. \quad (14)$$

де θ_s, θ_0 – температури на границі області і середою, n^* – коефіцієнт конвективного теплообміну.

Численна реалізація. В роботі представлено численне моделювання процесу гарячої раскатки подшипникового кільця с воздушним охладженням. Расчетная схема процесу гарячої раскатки кільця подшипника из стали ШХ15 представлена на рис. 1.

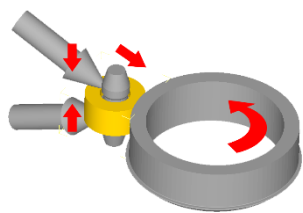


Рис. 1 – Расчетная схема процесса горячей раскатки кольца подшипника

Решение нестационарной задачи термовязкопластичности получено при начальном неравномерном распределении температурного поля кольца, представленном на рис. 2, которое устанавливается в заготовке после процесса штамповки и остывании, а также для случая, когда заготовка равномерно нагрета до исходной температуры 1100°C.

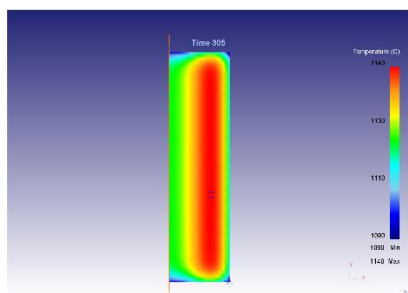


Рис. 2 – Температурное поле заготовки

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния кольца подшипника при раскатке методом конечного элемента на основе инкрементального независимого (смешанного) подхода Лагранжа-Эйлера численно была решена

связанная нестационарная контактная задача термовязкопластичности.

Нелинейная нестационарная задача решается итерационным методом Ньютона-Рафсона. Модель материала задавалась полученным экспериментально семейством кривых деформирования в широком диапазоне скоростей деформаций и температур.

Обсуждение результатов. При определении параметров напряженно-деформированного состояния в кольце подшипника, вычислялись значения величины контактных усилий (контактных давлений) между роликом и заготовкой. На рис. 3 приведен график изменения суммарных контактных усилий, возникающих в процессе раскатки заготовки кольца: кривая 1 соответствует изменению контактного усилия при предварительном равномерном нагреве заготовки; кривая 2 – при начальном неравномерном распределении температуры по толщине заготовки. Сравнение двух кривых показывает, что в реальных условиях необходимо прикладывать большее усилие при раскатке подшипникового кольца за счет начального неравномерного нагрева заготовки после штамповки. При построении математической модели для приближения к реальному технологическому процессу также необходимо учитывать формирование макроструктуры материала подшипникового кольца за счет течения материала, которое возникает при операциях объемной штамповки и раскатки заготовки. В работе [5] авторами исследовалось влияние процесса укладки волокон при двухпроходной формовке на распределение волокнистой структуры при раскатке подшипникового кольца. Для данного распределения волокнистой структуры материала заготовки кольца расчетным путем было получено также изменение суммарного контактного усилия, представленное кривой 3 на рис. 3.

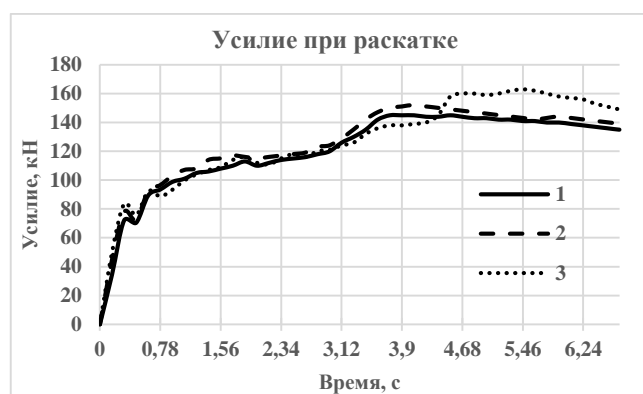


Рис. 3 – Графики изменения суммарных контактных усилий

Сравнение кривой 3 с кривыми 1 и 2 на рис. 3 показал увеличение суммарного контактного усилия на 10%, однако в этом случае формируется рациональное распределения волокнистой структуры

материала кольца подшипника, которая приводит к повышению его долговечности в процессе эксплуатации.

Выводы. В работе проведено численное моделирование процесса горячей раскатки подшипникового кольца. Методом конечных элементов с использованием независимого подхода Лагранжа-Эйлера численно была решена нестационарная контактная термовязкопластическая задача при постоянном и неравномерном начальном распределении температурного поля в заготовке. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния показали, что учет неравномерного нагрева заготовки кольца, соответствующего реальным условиям процесса раскатки, повышает величину

суммарных контактных усилий. Сравнение величин суммарных контактных усилий, возникающих при раскатке цилиндрической заготовки, полученной способом однопроходной и двухпроходной формовки, показало рост усилия раскатки. Однако, незначительное повышение энергозатрат на технологическую операцию раскатки позволяет получить подшипниковые кольца с улучшенными прочностными характеристиками.

Список литературы

1. Wang M. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process / M. Wang, H. Yang, Z.-C. Sun, L.-G. Guo // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2006. – № 16. – P. 1274.
2. Davey K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation / K. Davey, M.J. Ward // International Journal Mechanical Science. – 2002. – V.44. – P. 165.
3. Симсон Э.А. Влияние трения на напряженно-деформированное состояние кольца при холодной раскатке / Э.А.Симсон, Scicluna Steven, В.Л.Хавин, Л. В.Автономова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №43. – с. 206–211.
4. Wang M. Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM / M. Wang, H. Yang, Z. C. Sun, L. G. Guo // Journal of Materials Proces. Technology. – 2009. – V. 209. – P. 3384.
5. Автономова Л.В. Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника / Л.В.Автономова, Е.Д. Грозенко, С.А.Симсон // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – №4. – с. 158–161.
6. Avtonomova L. V. Formation of fibrous macrostructure in a bearing ring at stamping and rolling. / L. V. Avtonomova, Ie. D. Grozenok, E. A. Simson // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – №1(87). – p. 63–68.

Bibliography (transliterated)

1. Wang M., Yang, H., Sun, Z.-C., Guo, L.-G. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. No 16, 2006, p. 1274
2. Davey K., Ward M.J. (2002). A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation. *International Journal Mechanical Science*, V.44, p.165–190.
3. Simson E.A., Scicluna S., Khavin V.L., Avtonomova L.V. (2013). The effect of friction on the stress-strain state of the ring in the cold rolling. *Vestnik National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, NTU «KPI»*, No43(1016), p. 206–211.
4. Wang M., Yang H., Sun Z. C., Guo L. G. (2009). Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM. *Journal of Materials Proces. Technology*, V. 209, – p. 3384.
5. Avtonomova L. V., Grozenok, Ie. D., Simson, E. A. (2015) Modelirovanie protsessu goryachey raskatki kolets podshipnika. *Vestnik Natsionalnogo tehnikeskogo universiteta "KPI": Seriya: Tehnologii v mashinostroenii, Kharkiv, NTU «KPI»*, No4, p.158–161.
6. Avtonomova L. V., Grozenok, Ie. D., Simson, E. A. (2017) Formation of fibrous macrostructure in a bearing ring at stamping and rolling. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, V. 3, No1(87) – p. 63–68.

Надійшла (received) 28.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне визначення контактних зусиль гарячому розкочуванню заготовки підшипникового кільця / Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенко, О.В. Степук, С.Ю. Погорелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 5–9 – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Численное определение контактных усилий при горячей раскатке заготовки подшипникового кольца / Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенко, А.В. Степук, С.Ю. Погорелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 5–9 – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

The contact forces' numerical valuation during hot rolling of the bearing ring / L.V. Avtonomova, Ie.D. Grozenok, A.V. Stepuk, S.I. Pogorelov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 5–9. – Bibl.:6. – ISSN 2519-2671

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 технических наук, ведущий научный сотрудник 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

Грозенюк Євген Денисович – аспірант НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

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

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

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

Стенук Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник 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

Погорелов Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: ark95@ukr.net

Погорелов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: ark95@ukr.net

Pogorelov Sergey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National technical university «Kharkov polytechnic institute», tel.: (057) 707-61-78; e-mail: ark95@ukr.net