

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ РАСКАТКИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА

Проведено компьютерное моделирование процесса горячей раскатки, применяемого при изготовлении подшипникового кольца с учетом и без учета влияния охлаждения. Рассматривается динамическая связанная контактная термоупруго-пластическая краевая задача при больших деформациях и наличие влияния скоростей деформирования. Для этого высокоскоростного процесса деформирования учитывалась зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформаций и температур. Решение нестационарной задачи теплопроводности проводилось для случая воздушного охлаждения и принудительного жидкостного охлаждения. Моделирование процесса проводилось специализированным конечно-элементным программным комплексом Deform 3D в модуле "Ring-rolling". Анализ полученных полей температур и эквивалентных напряжений показал, что наличие принудительного жидкостного охлаждения приводит к перераспределению температур в кольце и к более высоким значениям эквивалентных напряжений, что более реально отображает физическую картину процесса горячей раскатки подшипникового кольца.

Ключевые слова: кольцо подшипника, горячая раскатка, Deform 3D, контактная задача, большие деформации, метод конечного элемента.

Введение. Долговечность транспортных средств и технологических машин напрямую зависит от долговечности их узлов, в частности, подшипников, от характеристик которых часто зависит работоспособность машины. Наиболее уязвимым элементом подшипника является внешнее подшипниковое кольцо, которое может быть получено с использованием технологии горячей раскатки. Моделирование этого технологического процесса с учетом связанности термомеханических физических полей является актуальной задачей. Решение нестационарной краевой задачи теплопроводности и связанной краевой контактной термоупругопластической задачи с учетом больших деформаций позволяет определить распределение температурного поля и полей напряжений и деформаций на всем временном промежутке процесса раскатки подшипникового кольца и получить необходимые параметры изделия.

Анализ последних исследований и литературы. Разработка имитационного подхода к моделированию процесса горячей раскатки заготовки подшипниковых колец дает возможность оптимизировать и улучшить характеристики изготавливаемой детали. В последние годы с этой целью были использованы специализированные конечно-элементные программные комплексы ANSYS, ABAQUS / Explicit, Deform 3D и др. [1].

В последние годы моделированию горячей раскатки кольца посвящено много научных публикаций [2-9]. Так в статье [5] для горячей прокатки кольца с помощью метода конечных элементов и исследуется влияние трения в оправке на процесс раскатки. Выбору модели, определяющей состояние материала, учету температурного поля, трения в контакте, наличия смазочно-охлаждающей среды при моделирова-

нии рассматриваемого процесса посвящены работы [3 – 8].

Целью данной статьи является совершенствование создания модели описывающей процесс горячей раскатки кольца и исследование влияния охлаждения на выходные параметры процесса.

Математическая постановка задачи. Численное решение методом конечного элемента (МКЭ) на базе независимого подхода Лагранжа-Эйлера краевой нестационарной задачи теплопроводности и трехмерной связанной нелинейной термоупруго-пластической контактной задачи с учетом больших деформаций и скоростей деформаций позволяет определить все параметры напряженно-деформированного состояния подшипникового кольца при горячей раскатке. Независимый подход Лагранжа-Эйлера заключается в том, что движение сетки напрямую не зависит от деформирования материала, и задается независимо таким образом, чтобы оптимизировать вычислительный процесс с позиции сокращения времени вычислений.

Разрешающие уравнения включают закон сохранения массы, энергии и момента количества движения в виде:

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

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

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

где $\rho, \dot{\rho}$ - плотность и скорость изменения плотности, v_i, \dot{v}_i - скорости и ускорения материальной точки, $x_i(x_j)$ - декартова координата ($i, j = 1, 2, 3$), $e = e(\rho, \theta)$ - удельная внутренняя энергия, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений Гука, r - внутренние распределенные источники тепла, q_i - компоненты вектора теплового потока, f_i^B - компоненты вектора объемных сил, θ - температура.

Скоростная форма физические уравнений имеет вид:

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

где тензор скоростей напряжений :

$$\sigma_{ij}^T = \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \sigma_{ij} - \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \sigma_{jk} - \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \sigma_{ik}, \quad (5)$$

где $\dot{\sigma}_{ij}$ - тензор скоростей Гука, C_{ijkl} - тензор физической связи напряжения-деформации 4-го порядка, D_{kl} - тензор скоростей деформаций:

$$D_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right) \quad (k, l = 1, 2, 3) \quad (6)$$

С учетом гипотезы не сжимаемости материала в области пластических деформаций уравнение виртуальной работы включает виртуальную работу внутренних и внешних сил:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV - \int_V \rho a_i \delta u_i dV - \int_V \rho (v_j - v_j^g) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta u_i dV = \delta W^{ext} \Big|_{t+\Delta t}, \quad (7)$$

где δu_i - вариация приращения виртуальных перемещений, а знак $\Big|_{t+\Delta t}$ означает выполнение уравнения (10) в момент времени $t + \Delta t$, V - объем, занимаемый областью.

Тензор деформаций:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где u_i - перемещение.

Виртуальная работа внешних сил задается выражением:

$$\delta W^{ext} = \int_V \rho f_i^B \delta u_i dV + \int_S f_i^S \delta u_i dS, \quad (8)$$

где f_i^S - компоненты вектора поверхностных сил, S - поверхность тела, на которой действуют поверхностные усилия.

Для высокоскоростного деформирования характерна зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформаций и температур. При больших пластических деформациях вследствие малости упругих деформаций скорость полной деформации приближенно представляется через скорость пластической деформации, а тензор скоростей деформаций включает упругую (e), пластическую (p) и температурную (θ) составляющие:

$$D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p + D_{ij}^\theta, \quad (9)$$

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

$$D_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (10)$$

где $\dot{\lambda}$ - параметр пластичности, F - пластический потенциал, задаваемый в виде (пластическое состояние соответствует $F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = 0$):

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_y, \quad (11)$$

где $f(\sigma_{ij})$ - функция пластичности, σ_y - функциональная зависимость для текущего предела текучести, зависящего от эквивалентной деформации, эквивалентной скорости деформации и температуры, представляемая в виде определяющего соотношения (уравнения):

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p, \theta), \quad (12)$$

где $\bar{\epsilon}_p$ - эквивалентная (эффективная) пластическая деформация, $\dot{\bar{\epsilon}}_p$ - скорость эквивалентной пластической деформации, θ - температура.

При решении контактной задачи учитывается проскальзывание, когда

$$|\tau_t| > \mu_s |p_n|. \quad (13)$$

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

$$f_{cn}^I = H^I f_{cn}^K, \quad f_{cn}^J = H^J f_{cn}^K \quad (14)$$

Уравнение нестационарной теплопроводности можно представить виде [10]:

$$\rho c \dot{\theta} + \rho c (v_i - v_i^g) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \frac{\partial (\lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial x_i})}{\partial x_i} = \dot{q}_v, \quad (15)$$

где c - теплоемкость, λ^* - коэффициент теплопроводности, \dot{q}_v - скорость тепловыделения объемных источников тепла.

Задача теплопроводности решается при наличии на границах области конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$q_{s_2} = -\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial n} \right|_{s_2} = n^* (\theta_s - \theta^*) \Big|_{s_2} \quad (16)$$

и наличии источника тепла на границе:

$$q_s \Big|_{s_3} = q_{s_3} \quad (17)$$

где $S_1 - S_4$ - границы области, θ_s, θ_0 - соответственно температуры на границе области и окружающей среды, n^* - коэффициент конвективного теплообмена.

Для решения нелинейной контактной задачи применяется итерационный метод Ньютона-Рафсона.

Численная реализация задачи горячей раскатки колец. В работе представлен расчет напряженно-деформированного состояния подшипникового кольца при горячей раскатке выполненного при помощи специализированного программного комплекса Deform 3D с использованием модуля "Ring-rolling". Использован метод конечных элементов с применением метода явного интегрирования по времени системы связанных уравнений термоупругопластической задачи, полученных на основе инкрементального независимого подхода Лагранжа-Эйлера

Расчетная схема процесса горячей раскатки кольца подшипника из стали ШХ15, созданная в CAD - системе Pro/Engineer представлена на рис. 1.

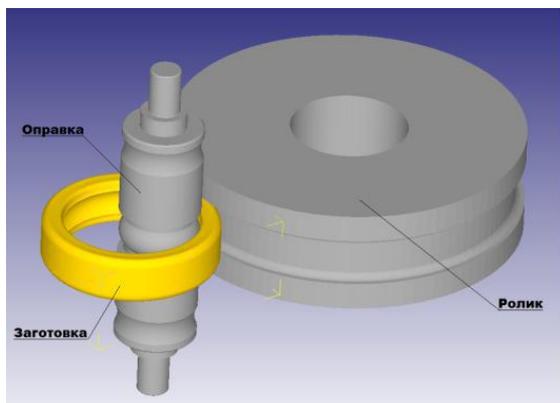


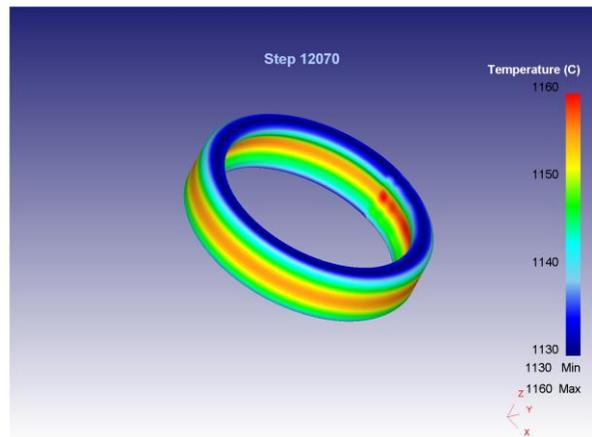
Рис. 1 - Расчётная схема

Конечно-элементная модель подшипникового кольца состоит из 52000 восьмиузловых, гексаэдральных элементов. Исходные геометрические размеры приведены в работе [5]. Модель материала взята из базы данных Deform и представляет собой таблично заданное семейство кривых деформирования для диапазона температуры от 800 до 1200 градусов. Исходная температура кольца составляет 1100 °C

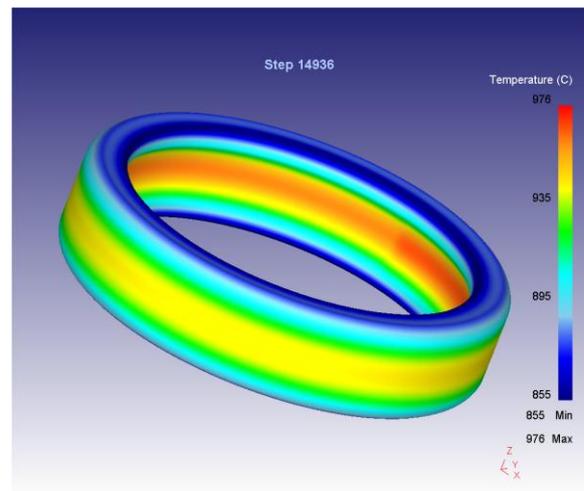
При решении поставленной задачи были получены распределения полей температур, эквивалентных деформаций, скоростей эквивалентных деформаций, эквивалентных напряжений, перемещений.

На рисунке 2 (а, б) представлено распределение поля температур в заготовке в конце процесса раскат-

ки: а)- воздушное охлаждение, б) – жидкостное принудительное охлаждение.



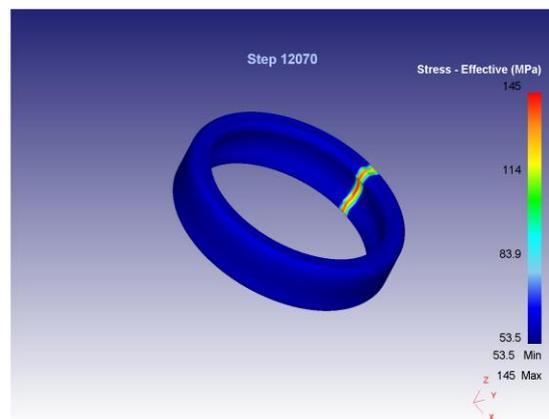
а



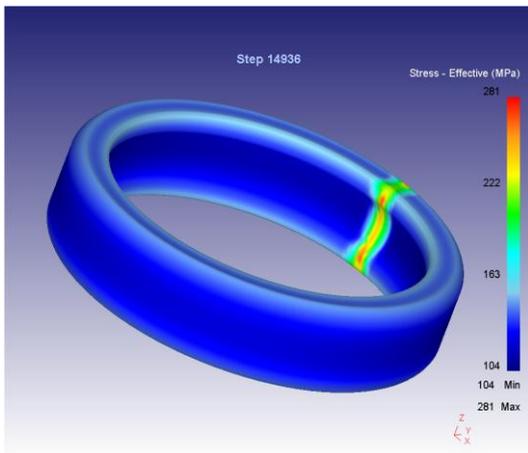
б

Рис 2 – Температурное поле кольца подшипника: а- воздушное охлаждение, б – жидкостное принудительное охлаждение

На рисунке 3 (а, б) представлено распределение поля эквивалентных напряжений: а) воздушное охлаждение кольца в процессе раскатки, б) жидкостное принудительное охлаждение.



а



б

Рис. 3 – Распределение поля эквивалентных напряжений: а - воздушное охлаждение кольца в процессе раскатки, б - жидкостное принудительное охлаждение

При сравнении уровней эквивалентных напряжений наблюдается, что учет конвективного теплообмена при решении задачи нестационарной теплопроводности дает большие уровни градиентов температуры, что приводит к более высоким уровням термонапряжений.

Выводы. В данной работе была предложена усовершенствованная модель технологического процесса горячей раскатки подшипникового кольца. Рассматривалось два режима раскатки: с воздушным охлаждением кольца и жидкостным принудительным охлаждением. С помощью программного комплекса Deform 3D. были получены поля напряжений, деформаций, температур. Их анализ показал, что при учете жидкостного принудительного охлаждения происходит перераспределение полей температур и напряжений, причем уровень значений температур снижается, а уровень значений эквивалентных напряжений кольца в 2 раза превышает уровни напряжений с воздушным охлаждением, что отображает более физическую картину процесса горячей раскатки подшипниковых колец и учет данного фактора является необходимым. Для создания максимально реалистичной и эффективной имитационной модели процесса горячей раскатки кольца подшипника, необходимо учитывать все факторы, которые влияют на напряженно-деформированное состояние кольца в процессе производства.

- Список литературы:** 1 Scientific Forming Technologies Corporation. DEFORM 3D Version 6.1 (sp2) User's Manual/Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 415p. 2. Wang, M., Yang, H., Sun, Z.-C., Guo, L.-G.: Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16(6), 1274-1280 (2006). 3. S.G. Xu, K.J. Weinmann, D.Y. Yang and J.C. Lian, Simulation of the Hot Ring Rolling Process by Using a Thermo-Coupled Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Method, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol 119 (No. 4A). Nov. 1997. P 542 – 549. 4. Автономова Л.В., Грозенок Е.Д. Имитационное моделирование процесса холодной раскатки колец подшипника с учетом температурного фактора // ВЕЖПТ. 2014. №7 (70). С.4-8. 5. Симсон, Э. А. Холодная раскатка заготовок подшипниковых колец [Текст] / Е. А. Симсон, В. В. Овчаренко, В. И. Демидов, И. Д. Прево, С. А. Назаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 52. – С. 156–160. 6. Wagoner R. H. Metal forming analysis / R. H. Wagoner, J. - L. Chenot. – Cambridge University Press, 2001. – 367 p. 7. 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. 165-190. 8. Hu Y.-K. ALE finite element formulation for ring rolling analysis. / Y.-K. Hu, W. K. Lin // International Journal of Numerical Methods in engineering. – 1992. – V. 33. – P. 1217-1236. 9. Yan F. L. Planning feed speed in cold ring rolling. / F. L. Yan, L. Hua, Y.-Q. Wu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – V. 47. – P. 1695-1701. 10. Hsu T. R. The finite element method in thermomechanics / T. R. Hsu. - Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1986. - 546 p.

- Bibliography (transliterated):** 1. Scientific Forming Technologies Corporation. DEFORM 3D Version 6.1 (sp2) User's Manual/Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 415p. Print. 2. Wang, M., Yang, H., Sun, Z.-C., Guo, L.-G.: Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16(6), 1274-1280 (2006). Print. 3. S.G. Xu, K.J. Weinmann, D.Y. Yang and J.C. Lian, Simulation of the Hot Ring Rolling Process by Using a Thermo-Coupled Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Method, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol 119 (No. 4A). Nov. 1997. pp 542 – 549. Print. 4. Avtonomova L.V., Grozenok E.D. Imitacionnoe mode-lirovanie processa holodnoj raskatki kolec podshipnika s uchetom temperaturnogo faktora VEZhPT. 2014. №7 (70). pp.4-8. Print. 5. Simson, E. A. Holodnaja raskatka zagotovok podshipnikovyh kolec [Tekst] E. A. Simson, V. V. Ovcharenko, V. I. Demidov, I. D. Prevo, S. A. Nazarenko *Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivsk'ij politehnicnij institut»*. Kharkov: NTU «KhPI» – 2011. – No 52. – pp. 156–160. Print. 6. Wagoner R. H. Metal forming analysis R. H. Wagoner, J. - L. Chenot. – Cambridge University Press, 2001. – 367 p. Print. 7. 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. – Vol. 44. – pp. 165-190. Print. 8. Hu Y.-K. ALE finite element formulation for ring rolling analysis. Y.-K. Hu, W. K. Lin *International Journal of Numerical Methods in engineering*. – 1992. – Vol. 33. – pp. 1217-1236. Print. 9. Yan F. L. Planning feed speed in cold ring rolling. F. L. Yan, L. Hua, Y.-Q. Wu *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47 – pp. 1695-1701. Print. 10. Hsu T. R. The finite element method in thermomechanics T. R. Hsu. - Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1986. - 546 p. Print.

Поступила (received) 28.03.2015

Автономова Людмила Владимировна – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Грозенок Евгений Денисович – аспирант каф. сопротивления материалов НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: Ev.grozenok@gmail.com

Симсон Эдуард Альфредович – академик ИАНУ, доктор техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78