

*Е.Д. ГРОЗЕНОК*

### ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ПРИ ДВУХПРОХОДНОЙ ФОРМОВКЕ ЗАГОТОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА

В роботі проведено чисельне моделювання операцій технологічного процесу гарячого штампування підшипникового кільця: осадки та формування. Вирішена пов'язана крайова нестационарна контактна термовязкопластическа задача, чисельна реалізація якої проводилася методом кінцевих елементів з використанням спеціалізованого програмного комплексу. Розрахунок напружено-деформованого стану дозволив визначити залежність зусиль при штампуванні від часу для осадки, однопрохідного і двухпрохідного формування. Аналіз отриманих даних показав, що при операції формовки в один прохід витрачається на 12 % більше потужності, ніж при операції формовки в два проходи.

**Ключові слова:** зусилля преса, штампування, формування, осадка, моделювання, термовязкопластичність, кільце підшипника, метод кінцевих елементів.

В работе проведено численное моделирование операций технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца: осадки и формовки. Решена связанная краевая нестационарная контактная термовязкопластическая задача, численная реализация которой проводилась методом конечных элементов с использованием специализированного программного комплекса. Расчет напряженно-деформированного состояния позволил определить зависимость усилий при штамповке от времени для осадки, однопроходной и двухпроходной формовки. Анализ полученных данных показал, что при операции формовки в один проход расходуется на 12 % больше мощности, чем при операции формовки в два прохода.

**Ключевые слова:** усилие прессы, штамповка, формовка, осадка, моделирование, термовязкопластичность, кольцо подшипника, метод конечных элементов.

Numerical simulation of bearing ring hot forging manufacturing operations: upsetting and forming was done in the research. Coupled boundary non-stationary contact thermoviscoplastic problem was solved. Its numerical implementation was done by finite element method with application of customized software package. Stress-strain analysis defined dependence of forces at forging from time for upsetting, single- or two-pass forming. Data analysis showed that single-pass forming expends 12 % of power more than during two-pass forming.

**Keywords:** press force, stamping, forming, unpressing, modeling, thermal visco-plasticity, bearing ring, finite element method.

**Введение.** При эксплуатации железнодорожного транспорта необходимо обеспечивать его надежность и долговечность. Эти требования в первую очередь обусловлены условиями безопасности пассажиров. Увеличение межремонтного ресурса даст экономический эффект. Одним из ответственных и высоконагруженных узлов, обеспечивающих безотказное передвижение состава поезда, является подшипниковый узел. Основной причиной выхода из строя подшипникового узла является выкрашивание дорожки качения подшипникового кольца из-за постоянного циклического нагружения. Поэтому уже при производстве кольца необходимо заложить такие параметры технологического процесса его изготовления, которые бы обеспечивали высокую надежность и долговечность подшипника, а также энергоэффективность при производстве.

**Анализ последних исследований и литературы.** Основными операциями технологического процесса производства подшипникового кольца являются: индукционный нагрев заготовки, горячая штамповка и раскатка кольца.

Вопросам изучения технологического процесса производства подшипниковых колец посвящено много литературных источников [1-4]. Моделирование процесса индукционного нагрева, обеспечивающее рациональный нагрев, удовлетворяющий требованиям технологического процесса рассмотрен в работе [5]. Последующей технологической операцией, после на-

грева, является горячая штамповка, при которой в поковке происходит укладка волокон определенным образом [6]. Исследования показали, что это является одним из основных влияющих на долговечность кольца подшипника факторов. Волокнистая структура считается оптимальной, когда волокна повторяют контур детали и не выходят на контактирующую поверхность дорожки качения [7]. В работе [8] было рассмотрено влияние начального распределения температуры в цилиндрической заготовке при штамповке. Результаты показали, что при осадке для не равномерно нагретой заготовки усилия требуется на 7% больше. Автором в работе [9] было исследовано влияние фактора трения на контактирующих поверхностях на распределение волокнистой структуры в поковке подшипникового кольца после горячей штамповки. Следующая технологическая операция после горячей штамповки – раскатка, при которой происходит уплотнение волокон при формообразовании дорожки качения [2]. Различное влияние параметров раскатки рассмотрено в работах [3-4].

**Целью** данной статьи является определение усилия при технологических операциях осадки и формовки заготовки кольца подшипника, при однопроходной и двухпроходной формовке.

**Постановка задачи.** Для штамповки необходимо обеспечить равномерно нагретую заготовку с перепадом температур между максимальной и минимальной не более 50°C и максимальной температурой 1150°C.

Это поле температур получается путем решения осесимметричной нестационарной краевой задачи теплопроводности для цилиндрических заготовок индукционным нагревом [5]. Полученное поле температур будет использоваться в качестве исходного для задачи штамповки.

Математическое моделирование технологической операции горячей штамповки подшипникового кольца осуществляется путем решения связанной нелинейной термовязкопластическая контактная задача с учетом больших деформаций и скоростей деформаций. Полная математическая модель описана в работе [9] включает в себя систему уравнений закона сохранения массы, энергии и момента количества движения, условия неразрывности, нелинейные физические уравнения, зависящие от деформаций, скоростей деформаций и температуры, условия контакта.

Процесс штамповки моделируется в 3 (4 для случая двухпроходной) этапа, а именно: осадка, формовка и прошивка. В данной работе операция прошивки не рассматривается, т.к. на нее затрачивается не значительное количество энергии по сравнению с формовкой. Для решения связанной задачи теплопроводности и термовязкопластичности задаются граничные условия: на свободных поверхностях заготовки задается конвективный теплообмен с окружающей средой, а на всех контактирующих поверхностях задается тепловой контакт и трение по закону Зибеля. Для первого этапа (осадка) движение задается для верхней траверсы, а нижняя остается неподвижной. На следующем шаге технологической операции проводится формовка. При моделировании нагрузка прикладывается к пуансону в качестве кинематического нагружения, а матрица считается жестко закрепленной. Заготовка задается как пластическое тело с учетом больших деформаций, скоростей деформаций и температур. Пуансон, матрица и траверса считаются абсолютно жесткими. Из-за больших температур (свыше  $1000^{\circ}\text{C}$ ) необходимо учитывать изменение всех механических свойств материала от температуры и фазовые переходы. Нелинейная краевая задача термовязкопластичности решается итерационным методом Ньютона-Рафсона.

**Численная реализация и обсуждение результатов.** В работе проводилось численное моделирование методом конечных элементов контактной термовязкопластической задачи двух операций горячей штамповки. Рассматривается две операции: осадка и формовка. Начальное неравномерное распределение температурного поля в цилиндрической заготовке после индукционного нагрева, было получено при решении связанных краевых задач электромагнитного поля и теплопроводности. По всему объему температура изменяется от  $1120^{\circ}\text{C}$  до  $1150^{\circ}\text{C}$ , поле температур представлено на рис. 1. Задача решается с учетом трения между траверсой и заготовкой для случая осадки, между пуансоном и заготовкой для случая формовки. Коэффициент трения  $\mu = 0,3$ . Скорость движения траверсы и пуансона  $V = 100$  мм/с. Размеры исходной цилиндрической заготовки  $R = 50$  мм,  $h = 190$  мм.

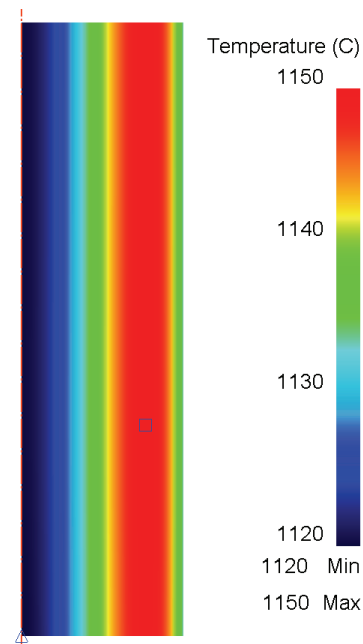


Рисунок 1 – Распределение температуры перед штамповкой

На первом этапе находится напряженно-деформированное состояние заготовки после технологической операции осадка. На рис. 2 представлен график зависимости усилия от времени.

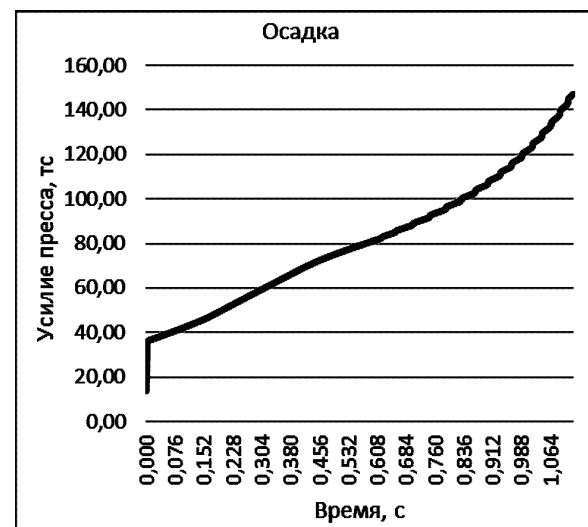


Рисунок 2 – График усилия пресса от времени при операции осадка

Вторым этапом штамповки является формовка в один проход. Пуансоном необходимого диаметра формируется предварительно деформированная горячая заготовка, полученная после операции осадка, температурное поле полученное на первом этапе, является исходным для второй. Данная операция является наиболее энергозатратной. График зависимости усилия от времени для операции формовки в один проход представлен на рис. 3.

В работе [10] автором был предложен вариант двухпроходной формовки: сначала заготовка формируется пуансоном меньшего диаметра, а потом после поворота на  $180^{\circ}$  снова формируется пуансоном большего диаметра, соответствующим технологическому

процессу. Напряженно-деформированного состояния в поковке при двухпроходной формовке численно определялось для двух диаметров пуансона:  $d1 = 76$  мм,  $d2 = 86$  мм. На рисунке 4 представлен график зависимости усилия от времени для формовки в два прохода.



Рисунок 3 – График усилия пресса от времени при операции формовки в один проход



Рисунок 4 – График усилия пресса от времени при операции формовки в два прохода

На рис. 5 представлены графики: график зависимости усилия от времени для осадки и формовки в один проход и график осадки и формовки в два прохода.

При сравнении двух графиков видно, что максимальное усилие достигается при формовке в один проход, что свидетельствует об уменьшении мощности на 12 % при формовке в два прохода.

**Выводы.** В работе проведено численное моделирование двух операций технологического процесса горячая штамповка подшипникового кольца. Была решена численно связанная нестационарная контакт-

ная термовязкопластическая задача методом конечных элементов с использованием специализированного программного комплекса. Определение напряженно-деформированного состояния дало возможность найти зависимость усилий при штамповке от времени для каждой технологической операции (осадке, формовка в один проход и формовке в два прохода). Анализ распределений полученных усилий показал, что при операции формовки в один проход требует большей мощности, на 12% чем операция формовки в два прохода.

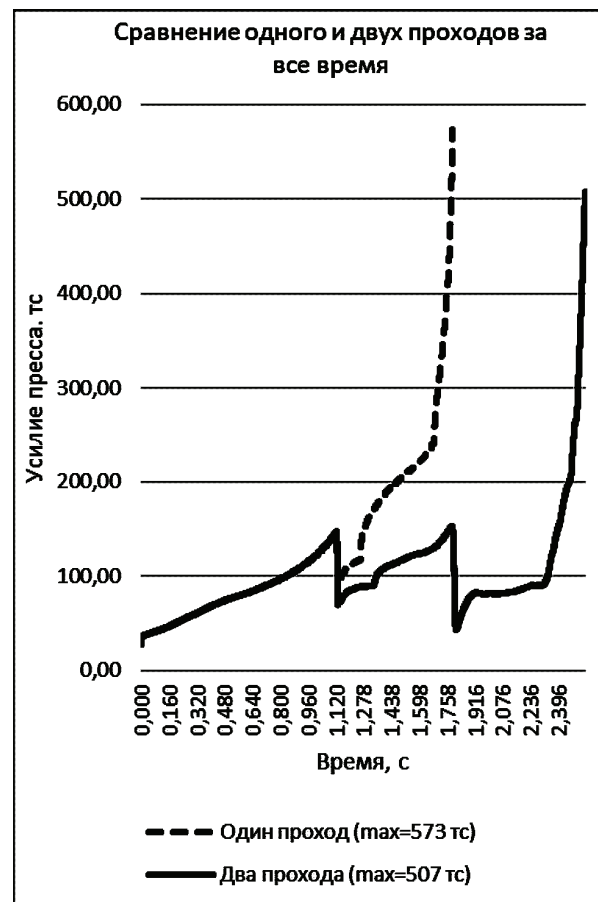


Рисунок 5 – График усилия пресса от времени при операции осадки и формовки в один проход и формовки в два прохода

#### Список литературы:

1. 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.
2. Avtonomova L. Formation of fibrous macrostructure in a bearing ring at stamping and rolling / L. Avtonomova, Ie. Grozenok, V. Konkin, E. Simson // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 1 (87). – P. 63-68.
3. Wanga Z. W. Complete modeling and parameter optimization for virtual ring rolling / Z. W. Wang, J. P. Fan, D. P. Hu, C. Y. Tang, C. P. Tsui // International Journal of Mechanical Sciences. – 2010. – Vol. 52, iss. 10. – P. 1325-1333.
4. Liao S. Modeling and finite element analysis of rod and wire steel rolling process / S. Liao, L. Zhang, S. Yuan, Y. Zhen, S. Guo // Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material. – 2008. – Vol. 15, iss. 4. –

P. 412–419.

5. Грозенко 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.

6. Симсон Э. А. Формирование волокнистой структуры поковок колец, обеспечивающее долговечность подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники / Э. А. Симсон, Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенко // Инженерія природокористування. – 2016. – № 2 (6). – С. 89-93.

7. Раузин Я. Р. Влияние макроструктуры металла на контактную выносливость и долговечность подшипников качения / Я. Р. Раузин // Контактная прочность машиностроительных материалов: Сб. научных трудов. – М.: Наука, 1964. – С. 51-55.

8. Автономова Л. В. 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 (1336). – С. 135-139.

9. Грозенко Е. Д. Влияние трения на распределение волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке / Е. Д. Грозенко, Э. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30 (1202). – С. 32–36.

10. Автономова Л. В. Исследование распределения волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенко, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 69-73.

#### Bibliography (transliterated):

1. Danilushkin A. I., Knyazev S. V., Semenov S. I. Matematicheskaya model induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok pered raskatkoy [Mathematical model of induction heating of cylindrical billets before rolling]. Vestnik VGTU, 2012. No 10-1. PP. 101-103.

2. Avtonomova L., Grozenok I., Konkin V., Simson E. Formation of fibrous macrostructure in a bearing ring at stamping and rolling. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 2017. V. 3. No 1 (87). PP. 63-68.

3. Wanga Z. W., Fan J. P., Hu D. P., Tang C. Y., Tsui C. P.

Complete modeling and parameter optimization for virtual ring rolling. International Journal of Mechanical Sciences, 2010. Vol. 52, iss. 10. PP. 1325–1333.

4. Liao S., Zhang L., Yuan S., Zhen Y., Guo S. Modeling and finite element analysis of rod and wire steel rolling process. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2008. Vol. 15, iss. 4. PP. 412–419.

5. Grozenok E. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya zagotovok pri induktsionnom nagreve dlya izgotovleniya podshpnikoviyh kolets [Numerical modeling of the temperature field in billets during induction heating for bearing rings manufacturing]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Kharkiv, NTU «KhPI», 2016. No 26 (1198). PP. 50-53.

6. Simson E. A., Avtonomova L. V., Grozenok Ie. D. Formirovanie voloknistoy strukturyi pokovok kolets, obespechivayuschee dolgovrechnost podshpnikoviyh uzlov selskohozyaystvennoy tehniky [Forming the fibrous structure of ring forgings to provide durability of bearing units for agricultural machinery]. Inzheneriya prirodokoristuvannya, 2016. No. 2 (6). PP. 89-93.

7. Rauzin Ya. R. Vliyanie makrostrukturyi na kontaktnuyu vyinoslivost i dolgovrechnost podshpnikov kacheniya. Kontaktnaya prochnost mashino-stroitelnykh materialov: Sb. nauchnykh trudov. Moscow: Nauka, 1964.

8. Avtonomova L.V., Grozenok Ie. D., Simson E. A., Stepuk A. V. Modelirovanie protsessa ob'emnoy shtampovki podshpnikovogo koltsa [Modeling the process of the bearing ring bulk stamping]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Transportne mashinobuduvannya, Kharkiv.: NTU «KhPI», 2017. No. 14 (1336). PP. 135-139.

9. Grozenok Ie. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Vliyanie treniya na raspredelenie voloknistoy strukturyi pokovki podshpnikovogo koltsa pri goryachey shtampovke [Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Innovatsiyni tehnologiyi ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi. Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. No. 30 (1202). PP. 32–36.

10. Avtonomova L.V., Grozenok Ie. D., Stepuk A. V. Issledovanie raspredeleniya voloknistoy strukturyi pokovki podshpnikovogo koltsa pri goryachey shtampovke [Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Tehnologiyi v mashinobuduvanni. Kharkiv, NTU «KhPI», 2016. No. 33 (1205). PP. 69-73.

Postynula (received) 26.09.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне визначення зусиль при двухпрохідному формуванні заготовки підшипникового кільця / Є. Д. Грозенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 10-13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9130.

Численное определение усилий при двухпроходной формовке заготовки подшипникового кольца / Е. Д. Грозенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 10-13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9130.

Numerical determination of forces at two-pass forming of bearing ring blank/ Ie. D. Grozenok // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 39 (1261). – С. 10-13. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9130.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

Grozenok Ievgen – Postgraduate student, Strength of materials chair, NTU "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com.