

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ РАСКАТКИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

Л. В. Автономова

Кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник*
E-mail: lavtonomova@gmail.com

Е. Д. Грозенюк

Преподаватель-стажер*
E-mail: Ev.grozenok@gmail.com

*Кафедра «Сопротивление материалов»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

У статті розглядається чисельне математичне моделювання процесу холодного розкочування кілець підшипників з урахуванням впливу температурного чинника. Чисельні результати отримано за допомогою методу скінченних елементів за допомогою обчислювального комплексу DEFORM. Проведено порівняння результатів, які отримано для вихідних параметрів процесу без урахування і з урахуванням впливу температурного поля, режимів повітряного та рідинного охолодження

Ключові слова: розкочування кільця підшипника, пластичні деформації, температура, контактний тиск, зусилля розкочування

В статье рассматривается численное математическое моделирование процесса холодной раскатки колец подшипников с учетом влияния температурного фактора. Численные результаты получены при помощи метода конечных элементов с помощью вычислительного комплекса DEFORM. Проведено сравнение результатов, полученных для выходных параметров процесса без учета и с учетом влияния температурного поля, режимов воздушного и жидкостного охлаждения

Ключевые слова: раскатка кольца подшипника, пластические деформации, температура, контактные давления, усилия раскатки

1. Введение

В машиностроении, автомобилестроении и авиационном широком применяются различного вида подшипники качения. Требования повышения качества, надежности и долговечности работы подшипниковых узлов являются главными критериями при их изготовлении. Важным эксплуатационным свойством является качество рабочих поверхностей подшипникового кольца. Технология холодной раскатки подшипниковых колец позволяет получить необходимую точность профильных элементов и низкую шероховатость рабочих поверхностей, что в большинстве случаев позволяет исключить из технологического процесса дальнейшую механическую обработку. Такая технология широко используется зарубежными фирмами такими как «Form-flow» (Англия), «Profigroll» (Германия), «Stank-exam» (Испания) и др. Следует отметить, что на качество готового изделия существенно влияет выбор технологических параметров процесса раскатки, исходная геометрия и материал заготовки и инструмента, наличие смазочно-охлаждающей технологической среды. Поэтому на стадии проектирования технологического процесса необходимо проведение аналитико-экспериментальных исследований по определению оптимальных усилий в контакте, температурного поля и других выходных параметров процесса.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для решения технологических задач прокатки, штамповки, раскатки и т. д. на предварительном этапе проектирования все чаще применяют численные методы и математические модели, которые хорошо описывают особенности протекающих физических процессов и позволяют выбрать оптимальные входные параметры и определить выходные параметры. Новейшие и наиболее важные численные методы для математического моделирования процессов прокатки,ковки, и т. д. описаны в монографии [1]. Для описания процесса раскатки кольца подшипника в статье [2] была предложена модель, основанная на тройном подходе, включающем конечно-элементную (КЭ) постановку, применение альтернативного метода Лагранжа-Эйлера (ALE) и итерационный метод решения (последовательно выдержанный метод сопряженных градиентов). В работе [3] был рассмотрен ряд вопросов по определению общей формы прокатанного кольца, удельного давления на валки и вращающего момента, распределения нормального давления, а также распределения эффективных напряжений в кольце на основе численных расчетов при помощи ALE. Модель, определяющая связь между скоростью роста наружного диаметра кольца и скоростью подачи,

предложена в [4]. Разработанный подход позволил рассчитать скорость подачи в зависимости от толщины прокатываемого кольца. В статье [5] с помощью численного моделирования в программной среде ABAQUS определялся оптимальный коэффициент трения на контактных поверхностях между валками и кольцом, что позволило повысить стабильность процесса раскатки кольца. В работе [6] разработана модель для прогнозирования температуры, усилия и скорости деформации при исследовании процесса горячей прокатки кольца, с учетом влияния радиальных и осевых рабочих инструментов. Простой и эффективный численный метод на основе КЭ – модели был предложен в [7] для определения геометрических параметров рабочих технологических роликов подшипника и было проанализировано влияние направляющих роликов на наклон и округлость раскатываемого кольца. Корректное математическое моделирование процесса раскатки подшипниковых колец с учетом всех физических факторов позволяет прогнозировать параметры точности изготовления подшипника. Задачу процесса раскатки колец необходимо рассматривать как 3-х мерную нелинейную упруго-пластическую контактную задачу при больших пластических деформациях, эффективное решение которой стало возможным с появлением специализированных вычислительных комплексов, таких как DEFORM. При раскатке колец процесс формообразования происходит за счет пластической деформации, при которой смещается значительная часть обрабатываемого металла заготовки. Точность расчета будет зависеть от выбора модели, определяющей состояние материала, учета температурного поля и трения в контакте, наличие смазочно-охлаждающей среды.

Целью настоящей работы является разработка подхода к моделированию процесса холодной радиальной раскатки подшипникового кольца в 3-х мерной постановке с учетом влияния температурного поля на величины выходных параметров процесса.

Для определения контактных давлений в паре оправка-заготовка и усилий раскатки решается нестационарная контактная задача термо-пластического деформирования кольцевой заготовки прямоугольного поперечного сечения, находящейся в контакте с абсолютно жесткой оправкой и роликом привода.

Математическая модель, которая адекватно описывает физические процессы при холодной раскатке колец, представляет собой систему уравнений, включающую:

- уравнения движения, основанные на принципе виртуальной работы; физические и кинематические соотношения для материала, несжимаемого в области пластических деформаций: условие отсутствия объемных и поверхностных усилий (кроме контактных);
- граничные условия и условия контактного взаимодействия (проскальзывание с трением в рамках модели Треска);
- соотношения, определяющее состояние материала при пластическом деформировании, учитывающие наличие больших необратимых пластических деформаций (упруго-пластическая модель деформирования по закону течения – в соответствии с уравнением Леви – Мизеса);
- уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями и источниками тепла.

Введение определенных ограничений и допущений при решении рассматриваемой контактной термоупругопластической задачи предполагает соответствие физической модели поведения материала экспериментальным данным при высокоскоростном нагружении в соответствующем диапазоне скоростей деформаций и температур. В этом случае соотношение, определяющее состояние материала в области пластического деформирования, представляет собой функциональную зависимость напряжений пластического течения материала от текущего значения деформации (пластической деформации), скорости деформации и температуры.

3. Численная реализация связанной термоупругопластической задачи холодной раскатки кольца подшипника

Учитывая термо-механическую связь физических процессов, необходимо рассматривать связанную термоупругопластическую задачу. При решении задачи моделирования высокоскоростного деформирования при раскатке колец используется система уравнений, приведенная в работе [8]. В качестве источников тепла учитывается тепловыделение вследствие пластического деформирования обрабатываемого материала и работы сил трения на контактной поверхности, на поверхности контакта имеет место идеальный тепловой контакт, а на свободных поверхностях – конвективный теплообмен с окружающей средой [9]. В настоящей работе представлены численные результаты расчета напряженно-деформированного состояния кольца подшипника при холодной раскатке, выполненные при помощи специализированного модуля «Ring-rolling» программного комплекса DEFORM 3D. Использован метод конечных элементов с применением метода явного интегрирования по времени системы уравнений связанной термоупругопластической задачи, полученных на основе инкрементального независимого (смешанного) подхода Лагранжа-Эйлера (ALE).

Общий вид расчетной схемы для процесса раскатки подшипникового кольца из стали ШХ15, созданной с помощью CAD – системы Pro/Engineer в виде 2-х мерных контуров тел вращения, представлен на рис. 1.

Трехмерная конечно-элементная модель кольца подшипника, включающая в себя 51480 элементов, строится с использованием 8-и узлового элемента – гексаэдра. Все данные для численного расчета (геометрические размеры, физико-механические характеристики материала, технические параметры технологического процесса) приведены в работе [10]. Определяющее соотношение для материала заготовки (подшипниковой стали ШХ15) формируется по данным, таблично заданным в базе данных DEFORM 3D семейством кривых деформирования аналога стали ШХ 15, в диапазоне температур $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростей деформирования $10^{-3}\text{ c}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2\text{ c}^{-1}$. Например, вид кривых деформирования материала заготовки при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлен на рис. 2.

При решении связанной термоупругопластической задачи было получено распределение следующих физических полей: температур, эквивалентных деформаций, эквивалентные напряжения, перемещения.

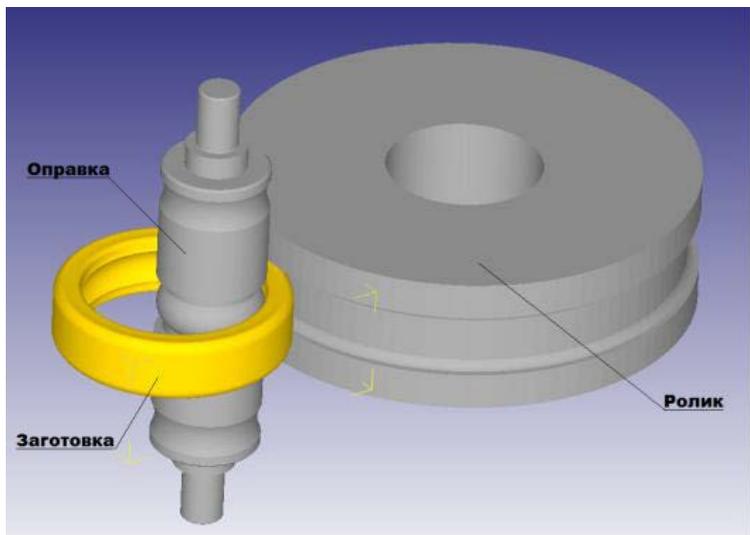


Рис. 1. Расчётная схема для процесса раскатки наружного кольца подшипника

Определялись также момент на раскатном ролике и усилие на инструмент (контактное) для двух значений коэффициента конвективного теплообмена со средой ($\alpha = 0.02 \text{ Н/(с}\cdot\text{мм}\cdot\text{°C)}$ и $\alpha = 0.4 \text{ Н/(с}\cdot\text{мм}\cdot\text{°C)}$) с учетом трения в контактной зоне по закону Треска [9] (параметр трения $m=0.24$).

На рис. 3 представлено распределение поля температур подшипникового кольца в конце процесса раскатки: а – воздушное охлаждение ($\alpha = 0.02 \text{ Н/(с}\cdot\text{мм}\cdot\text{°C)}$), б – жидкостное охлаждение ($\alpha = 0.4 \text{ Н/(с}\cdot\text{мм}\cdot\text{°C)}$).

На рис. 4 представлено распределение эквивалентных напряжений, полученных при достижении заданной величины радиуса кольца при решении упругопластической задачи для изотермического процесса и связанной термоупруго-

пластической задачи раскатки колец с естественной конвекцией в окружающую среду и с жидкостным охлаждением соответственно.

График изменения суммарных контактных усилий в процессе раскатки кольца приведен на рис. 5. Кривая 1 соответствует изотермическому процессу деформирования, 2 и 3 – термоупругопластическому деформированию при конвективном теплообмене с окружающей средой и с жидкостным охлаждением соответственно. Учет температурного поля при численном моделировании приводит к снижению значений величины контактных усилий (контактных давлений) между роликом и заготовкой для одного и того же коэффициента трения на 15 %.

Предложенный подход к построению математической модели с учетом зависимости от температуры и скорости деформаций кривых деформирования материала позволяет более адекватно описать протекающие физические процессы при холодной раскатке колец подшипника.

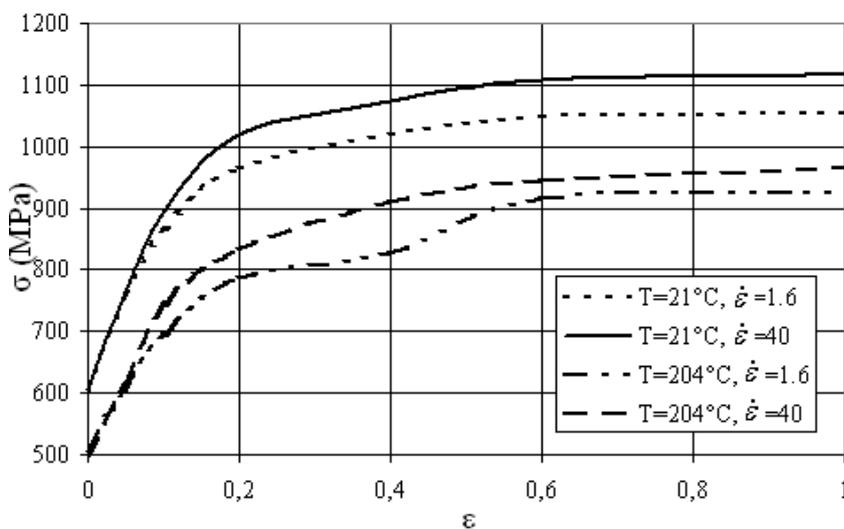


Рис. 2. Кривые деформирования аналога стали ШХ 15

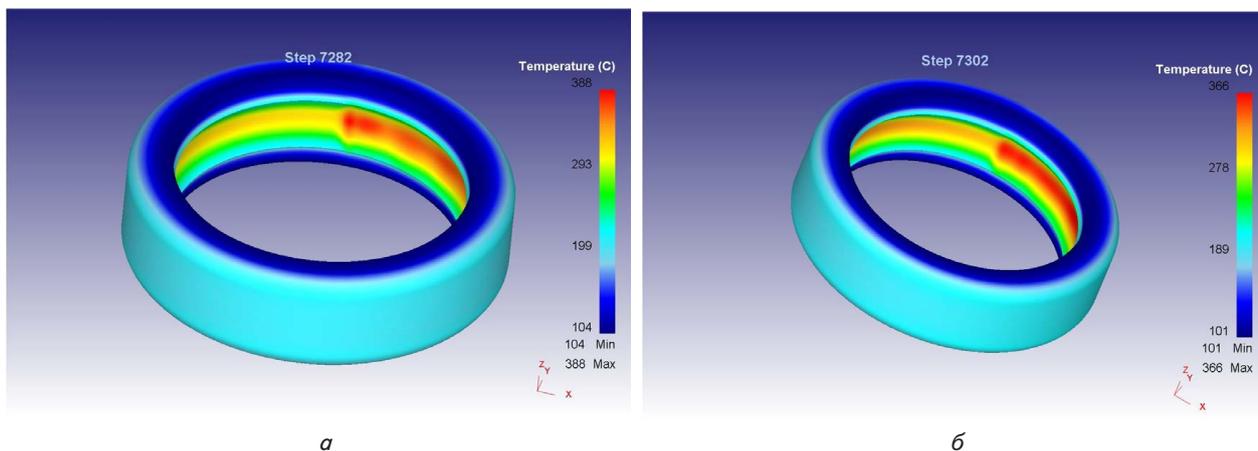


Рис. 3. Температурное поле кольца подшипника при холодной раскатке: а – воздушное охлаждение; б – жидкостное охлаждение

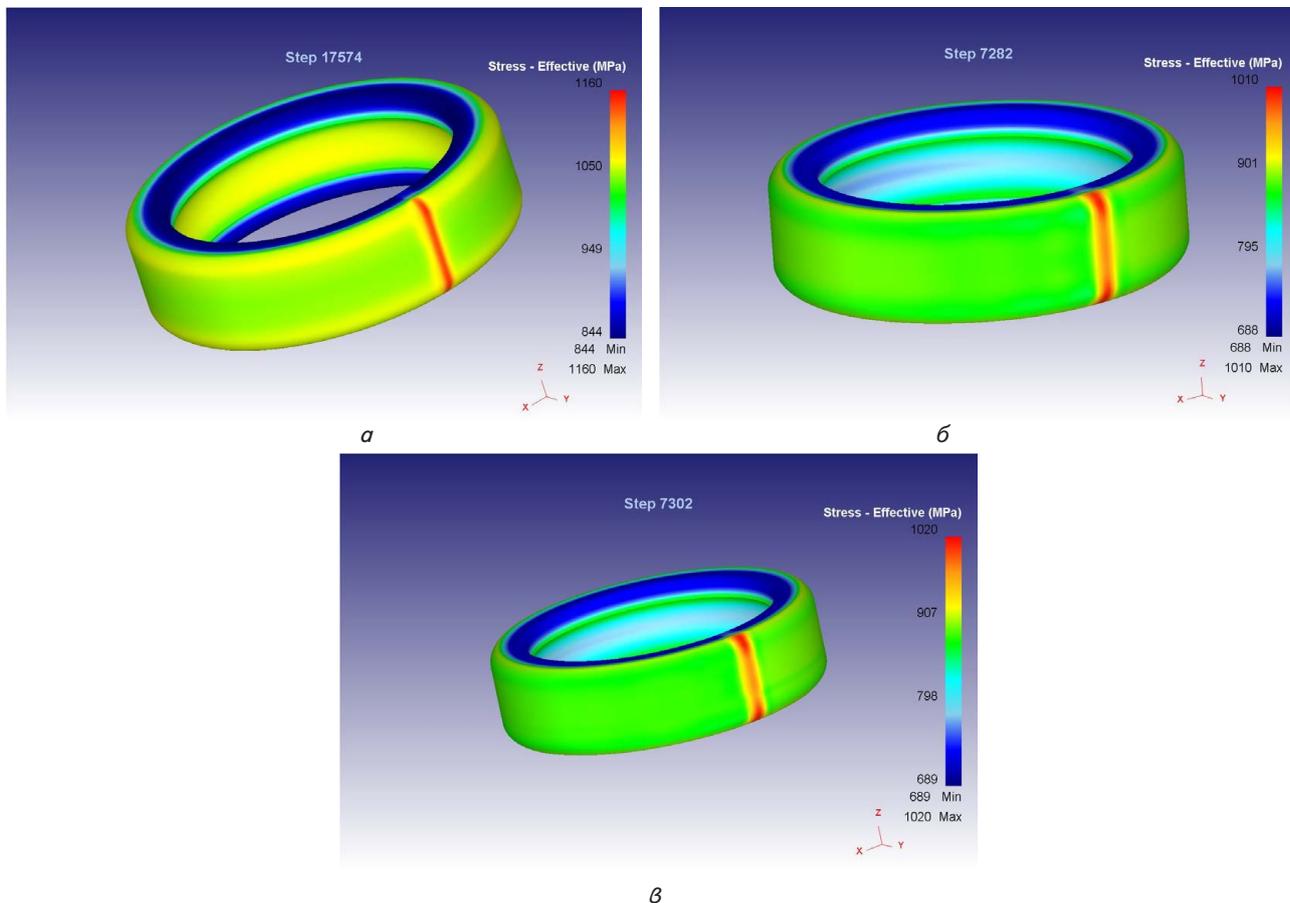


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений кольца подшипника при холодной раскатке: *a* – изотермический процесс; *б* – естественная конвекция в окружающей среде; *в* – жидкостное охлаждение

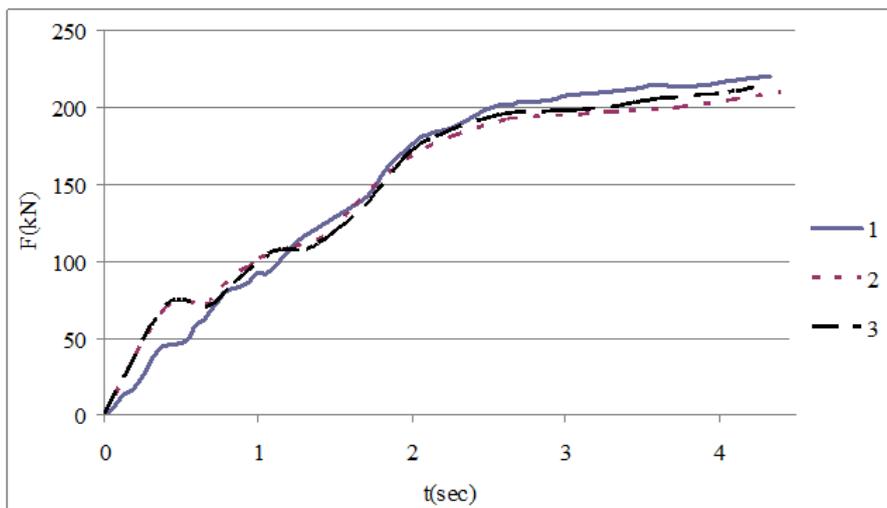


Рис. 5. Изменение контактных усилий в процессе раскатки

4. Выводы

В работе рассмотрена задача моделирования процесса холодной раскатки подшипниковых колец с учетом влияния температурного фактора. Задача представлена в виде трехмерной связанной контактной задачи для жесткого инструмента и термоупругопластической заготовки – кольца (сталь ШХ15). Опреде-

ляющие соотношения задаются на основе обработки семейства диаграмм деформирования и базы данных пакета DEFORM и учитывают пластическое состояние материала в зависимости от скорости деформации и температуры. С помощью пакета DEFORM – 3D проведены расчеты по моделированию процесса холодной раскатки подшипникового кольца из стали ШХ-15. Получены распределения полей напряжений, усилий раскатки и температурного поля при различных режимах охлаждения – конвективный теплообмен со свободным воздухом ($\alpha = 0.02 \text{ Н}/(\text{с}\cdot\text{мм}\cdot^\circ\text{C})$) и жидкостное охлаждение ($\alpha = 0.4 \text{ Н}/(\text{с}\cdot\text{мм}\cdot^\circ\text{C})$).

Результаты расчетов показали, что учет температурного фактора при численном моделировании процесса холодной раскатки колец позволяет повысить точность прогнозирования выходных параметров процесса (усилия, напряжения и т. п.) до 15 %, при этом интенсивное охлаждение, снижая уровень максимальных температур, приводит к росту усилия раскатки, т. е. к повышению энергозатрат на технологической операции.

Литература

1. Wagoner, R. H. Metal forming analysis [Text] / R. H. Wagoner, J.-L. Chenot. – Cambridge University Press, 2001. – 367 p.
2. Davey, K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation [Text] / K. Davey, M. J. Ward // International Journal Mechanical Science. – 2002. – Vol. 44, Issue 1. – P. 165–190. doi:10.1016/s0020-7403(01)00080-7
3. Hu, Y.-K. ALE finite element formulation for ring rolling Analysis [Text] / Y.-K. Hu, W. K. Lin // International Journal of Numerical Methods in engineering. – 1992. – Vol. 33, Issue 6. – P. 1217–1236. doi:10.1002/nme.1620330608
4. Yan, F. L. Planning feed speed in cold ring rolling [Text] / F.L. Yan, L. Hua, Y.-Q. Wu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47, Issue 11. – P. 1695–1701. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.01.009
5. Yang, H. Role of friction in cold ring rolling [Text] / H. Yang, O. L. Gu, N. M. Zha // Journal Mechanical Science and Technology. – 2005. – Vol. 21 (6). – P. 914–920.
6. Huez, J. Three-dimensional finite-element simulation of hot ring rolling [Text] / J. Huez, J.-L. Noyes, J. Coupu // Minerals, Metals and Materials Society. – 2001. – P. 249–258. doi:10.7449/2001/superalloys_2001_249_258
7. Guo, L. G. Simulation for guide roll in 3D-FE analysis of cold ring-rolling [Text] / L. G. Guo, H. Yang, M. Zhan, H. Li, L. Y. Li // Materials Science Forum. – 2004. – Vol. 471-472. – P. 99–110. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.471-472.760
8. Симсон, Э. А. Влияние трения на напряженно-деформированное состояние кольца при холодной раскатке [Текст] / Э. А. Симсон, Scicluna Stiven, В. Л. Хавин, Л. В. Автономова // Вісник НТУ «ХП». Зб. наук. праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 43 (1016). – С. 206–211.
9. Scientific Forming Technologies Corporation. DEFORM 3D Version 6.1(sp2) User's Manual [Text] / Scientific Forming Technologies Corporation, 2008. – 415 p.
10. Симсон, Э. А. Холодная раскатка заготовок подшипниковых колец [Текст] / Э. 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.

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ОБРАЗУЮЩЕЙ РОЛИКА СДВОЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

В. Л. Хавин

Кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

E-mail: VKhavin@kpi.kharkov.ua

Д. С. Ягудин

Преподаватель-стажер*

E-mail: Dmitriy.Yagudin27@gmail.com

*Кафедра сопротивления материалов
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Розроблена параметрична модель підшипника качення і визначена оптимальна геометрія контактної поверхні ролика з метою мінімізації рівня контактних тисків. Для вирішення контактної задачі використовувався метод скінчених елементів і модифікований метод Лагранжа. Отримано оптимальні радіуси кривизни твірної ролика, що забезпечує зниження рівня максимального контактного тиску на 8 %

Ключові слова: ролик підшипника, контактний тиск, оптимізація, радіус кривизни, метод скінчених елементів

Разработана параметрическая модель подшипника качения и определена оптимальная геометрия контактной поверхности ролика с целью минимизации уровня контактных давлений. Для решения контактной задачи использовался метод конечных элементов и модифицированный метод Лагранжа. Получены оптимальные радиусы кривизны образующей ролика, обеспечивающее снижение уровень максимального контактного давления на 8 %

Ключевые слова: ролик подшипника, контактное давление, оптимизация, радиус кривизны, метод конечных элементов

1. Введение

Подшипниковый узел является одним из важнейших элементов современных машин. Непрерывное

совершенствование традиционных конструкций подшипниковых узлов остается актуальной задачей и на сегодняшний день. Подшипники качения и подшипники скольжения по-разному оказывают сопротивление