

УДК 621.77

Е. Д. ГРОЗЕНКО, Э. А. СИМСОН, А. В. СТЕПУК, С. Ю. ШЕРГИН

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОКОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ

Проведено чисельне моделювання технологічного процесу гарячого штампування підшипникового кільця. Досліджено вплив фактора тертя на контактних поверхнях на розподіл волокнистої структури поковки підшипникового кільця, отриманої двоетапним способом формування. Задача представлена у вигляді нестационарної контактної термовязкопластичної задачі з відповідними граничними умовами, рішення якої здійснюється методом скінченних елементів. Картина розподілу волокнистої структури матеріалу у вигляді ліній Лагранжа була отримана шляхом розрахунку параметрів напружено-деформованого стану попередньо нагрітої циліндричної заготовки в процесі осадки і формування. Проведено порівняння картин розподілу ліній Лагранжа для трьох типів тертя на контактних поверхнях: сухого, комбінованого і тертя з мастилом. Аналіз результатів дозволяє вибрати комбіноване тертя як варіант умов тертя, що забезпечує мінімальні кути виходу ліній Лагранжа на контактну поверхню (качання) поковки. Отримана волокниста структура матеріалу поковки дає можливість прогнозувати підвищення надійності і довговічності готового виробу – підшипникового кільця.

Ключові слова: підшипникове кільце, волокниста структура, поковка, штамповка, термовязкопластична задача, тертя, довговічність.

Проведено численное моделирование технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца. Исследовано влияние фактора трения на контактных поверхностях на распределение волокнистой структуры в поковке подшипникового кольца, полученной двухэтапным способом формовки. Задача представлена в виде нестационарной контактной термовязкопластической задачи с соответствующими граничными условиями, решение которой осуществляется методом конечных элементов. Картина распределения волокнистой структуры материала в виде линий Лагранжа была получена путем расчета параметров напряженно-деформированного состояния предварительно нагретой цилиндрической заготовки в процессе осадки и формовки. Проведено сравнение картин распределения линий Лагранжа для трех типов трения на контактных поверхностях: сухого, комбинированного и трения со смазкой. Анализ результатов позволяет выбрать комбинированный вид трения как вариант условий трения, обеспечивающий минимальные углы выхода линий Лагранжа на контактную поверхность (качения) поковки. Полученная волокнистая структура материала поковки дает возможность прогнозировать повышение надежности и долговечности готового изделия – подшипникового кольца.

Ключевые слова: подшипниковое кольцо, волокнистая структура, поковка, штамповка, термовязкопластическая задача, трение, долговечность.

The paper presents numerical simulation of the bearing rings' hot forming process. The friction factor of the contact surfaces affects the fibrous structure in the forging-bearing ring made with the two-step molding process. The problem examined in the form of non-stationary contact thermo viscous plastic tasks and relevant boundary conditions. Its solution found with the finite element method. The pattern of the material fibrous distribution structure in the form of Lagrange lines was obtained by calculating the parameters of the stress-strain state for the pre-heated cylindrical work piece during precipitation and molding. The Lagrange lines distribution patterns for the three types of the contact surfaces friction terms compared to: dry, lubricated friction and the combined ones. The results' analysis allowed selecting the friction combined type as the best option of the friction conditions to provide minimum output Lagrange lines' angles on the contact surface during forging or rolling. The fibrous structure of the forging material makes it possible to predict the increase of reliability and durability for the finished product, i.e. bearing ring.

Keywords: bearing ring, fibrous structure, forging, forming, thermo viscous plastic problem, friction, durability.

Введение и анализ последних исследований.

В современном машиностроении при крупносерийном производстве для изготовления заготовок ответственных деталей машин широко применяются метод обработки металлов давлением, при котором пластическое деформирование металла приводит к его изменению механических свойств и структуры. Управляя параметрами технологического процесса можно получить прогнозируемое качество деталей. Примером такого технологического процесса является процесс горячей штамповки заготовок подшипниковых колец. Известно, что для повышения надежности и срока службы подшипникового кольца при проектировании процесса объемной штамповки необходимо обеспечить характерное волокнистое строение изготавливаемой поковки [1]. Многочисленные исследования показали, что оптимальное распределение волокон в материале деталей относительно рабочей контактной поверхности является определяющим фактором для повышения стойкости на истирание и долговечности деталей машин [1–3]. Экспериментально было получено, что контактная выносливость для

подшипниковых колец зависит от величины углов выхода волокна на контактную поверхность в зоне максимального нагружения. В работе [2] приведен график зависимости долговечности от величины угла выхода волокна на контактную поверхность. Максимальная долговечность отмечается для материала с волокнами параллельными дорожке качения. Прогнозирование характера распределения волокнистой структуры повок с учетом влияния различных факторов, таких как трение, скорость деформирования, температура является актуальной задачей.

Особенностью технологии горячей штамповки является значительное перемещение металла заготовки относительно рабочих поверхностей штампа при изготовлении поковки подшипникового кольца. Условия трения на контактных поверхностях пуансон-заготовка и заготовка -матрица определяют эффективность процесса формовки, т.к. трение приводит к увеличению неоднородности деформирования. При контактном взаимодействии инструмента и заготовки трение обуславливает контактные усилия и качество поверхности поковки.

Моделирование трения при исследовании процесса горячей штамповки рассматривается многими специалистами как важнейшая задача при имитационном моделировании соответствующей технологической операции [3–5]. Модель трения в идеале должна включать величину нормального давления, температуру, сопротивление срезу, скорость скольжения (учет смазки), качество контактирующих поверхностей (шероховатость поверхностей инструмента и заготовки, их адгезионные свойства, наличие окисных пленок, наличие покрытий или смазки). Так в работе Чумаченко Е.Н. [5] представлен сравнительный анализ моделей трения Кулона – Амонта, Леванова и Колмогорова, Ньютона, Зибеля. Экспериментальные исследования усилий при выдавливании цилиндрической заготовки показали хорошее совпадение с расчетными для модели трения Леванова [3] в широком диапазоне скоростей деформирования. С ростом скорости деформаций происходит увеличение влияния трения при деформировании металла [4]. Нагрев пластически деформируемого металла также влияет на фактор трения, которое уменьшается при ее повышении.

Особый интерес представляет исследование влияния фактора трения и на характер распределения волокнистой структуры материала в поковке, полученной в процессе горячей штамповки. Использование современных программных комплексов позволяет проведение математического моделирования технологического процесса изготовления поковки подшипникового кольца и дает возможность прогнозировать распределение волокнистой структуры, выбрать рациональные параметры процесса горячей штамповки. При формообразовании кольца из разогретой цилиндрической заготовки на этапе формовки можно получить поковки с улучшенными прочностными характеристиками рабочих поверхностей. Оптимальный подбор технологических параметров на стадии проектирования обеспечивает повышение качества и долговечности готовых колец подшипника.

Целью статьи является исследование влияния величины трения на распределение волокон в поковке кольца подшипника, получаемой горячей штамповкой.

Постановка задачи и численная реализация. Процесс горячей штамповки подшипникового кольца включает в себя следующие технологические операции: осадка, формовка и прошивка. В работе рассматривается процесс деформирования предварительно нагретой цилиндрической стальной заготовки при операциях осадки и двухпроходной формовки для получения поковки кольца подшипника.

Математическая модель, которая описывает все этапы технологического процесса горячей штамповки кольца подшипника, включает в себя уравнения равновесия, неразрывности, пластичности Мизеса и нелинейные соотношения между напряжениями, температурой и скоростями деформаций [6]. В связи с

высоким уровнем температур (1150° С) характерного для данного процесса штамповки, считается, что все механические свойства и прочностные характеристики металла зависят от температуры. При решении нестационарной контактной термовязкопластической задачи с соответствующими начальными и граничными условиями определяются параметры напряженно-деформированного состояния предварительно нагретой цилиндрической заготовки и картины распределения волокнистой структуры материала в виде линий Лагранжа. Для определения начального температурного поля цилиндрической заготовки, индукционно нагреваемой, решалась нестационарная краевая задача электромагнитного поля и теплопроводности с учетом фазовых переходов в металле, наличием объемных источников тепла и учетом зависимости термоэлектромагнитных характеристик от температуры [7]. На контактных поверхностях пуансон-заготовка и заготовка-матрица задавались условия теплового контакта и трение, изменяющееся по закону Зибеля. Граничные условия для перемещений матрицы с внешней стороны – жесткое закрепление. Нагружение кинематическое – движение пуансона с постоянной скоростью.

Численно все краевые задачи решались методом конечного элемента в осесимметричной постановке. Конечно-элементная модель включает 11024 узлов и 10573 элемента. Цилиндрическая заготовка изготовлена из материала Сталь ШХ15 и имеет размеры $R_3 = 98$ мм, $H_3 = 120$ мм. Пуансон движется со скоростью $V_n = 100$ мм/с. Температура предварительного неравномерно нагрева цилиндрической заготовки изменяется от $T_0 = 1110^\circ\text{C}$ до $T_0 = 1110^\circ\text{C}$.

В работе [8] приводятся диапазоны изменения значений коэффициент трения μ , полученные экспериментально, в зависимости от типа трения: для сухого трения – коэффициент трения $\mu > 0,3$, для комбинированного – коэффициент трения изменяется $0,1 \leq \mu \leq 0,3$, для трения с жидкой смазкой коэффициент трения может принимать значения $0,05 \leq \mu \leq 0,1$. Поэтому решение краевых контактных термовязкопластических задач проводилось для каждого типа трения на контактных поверхностях между пуансоном и поковкой и соответственным коэффициентом трения $\mu = 0,5$ для сухого трения, $\mu = 0,3$ для комбинированного, $\mu = 0,1$ для трения со смазкой.

Для первого этапа технологического процесса горячей штамповки – осадки решается задача определения напряженно-деформированное состояние и распределение линий Лагранжа в предварительно нагретой цилиндрической заготовке (см. рис. 1). Искривление линий Лагранжа после пластического деформирования заготовки свидетельствует о перераспределении волокнистой структуры материала (макроструктура претерпевает изменение).

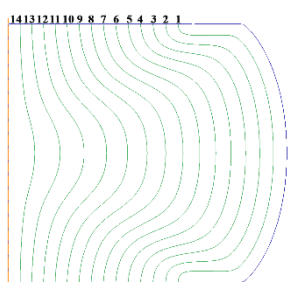


Рис. 1 – Волокнистая структура заготовки после осадки

На втором этапе горячей штамповки с деформированной заготовкой проводилась операция двухпроходной формовки. Сначала проходят пуансоном меньшего диаметра ($D = 76$ мм), затем после поворота первоначальной поковки на 180 град, осуществляется повторная проходка пуансоном с диаметром, соответствующим внутреннему диаметру поковки кольца ($D = 96$ мм). Схема проведения двухпроходной формовки приведена на рис. 2. На этапе процесса двухпроходной формовки решается краевая контактная задача термовязкопластичности с учетом трения в контактных зонах для предварительно деформированной заготовки на этапе осадки. На завершающем этапе проводилась операция прошивки.

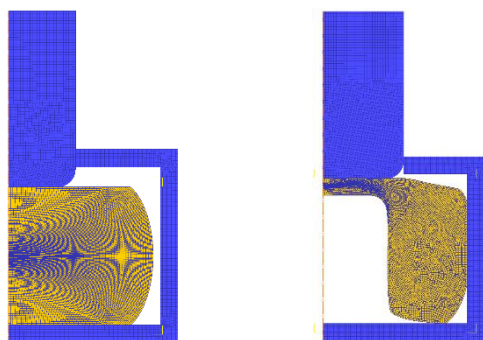


Рис. 2 – Схема проведения двухпроходной формовки

На рис. 3 представлены картины распределения линий Лагранжа, соответствующие распределению волокнистой структуры в поковках кольца подшипника, полученных при решении нестационарной контактной задачи деформирования поковки для трех значений коэффициента трения: а) $\mu = 0,1$; б) $\mu = 0,3$; в) $\mu = 0,5$.

Анализ картин распределения волокнистой структуры позволил отметить, что некоторые волокна выходят на внутреннюю поверхность поковки (дорожку качения) под углом φ , который измеряется между касательной к линии Лагранжа (волокна) и образующей внутренней поверхности поковки.

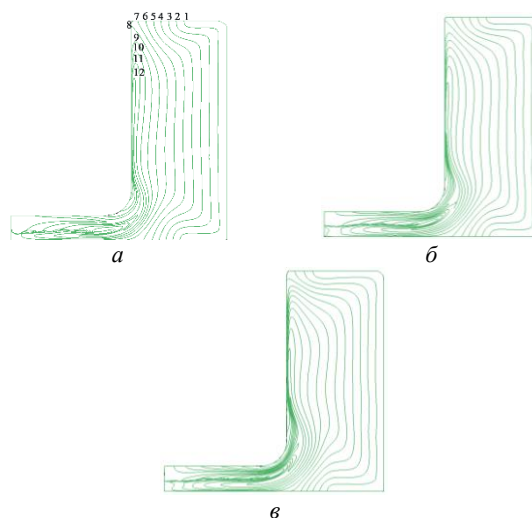


Рис. 3 – Распределение линий Лагранжа в поковке после двухпроходной формовки с учетом трения: а – $\mu = 0,1$; б – $\mu = 0,3$; в – $\mu = 0,5$

В таблице 1 приведены значения углов выхода волокон на дорожку качения для соответствующих номеров линий Лагранжа (см. рис. 3) для различных значений коэффициента трения μ .

Таблица 1 – Углы выхода волокон на дорожку качения

№ линии Лагранжа	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu = 0.1$	-	-	-	-	-	-	-	45°	10°
$\mu = 0.3$	-	-	-	-	-	40°	10°	3°	1°
$\mu = 0.5$	-	-	-	45°	10°	7°	5°	5°	5°

Из приведенных данных табл. 1 видно, что наименьшее количество линий Лагранжа, которые выходят на внутреннюю поверхность поковки (дорожку качения) соответствует решению, полученному для значения коэффициента трения $\mu = 0,5$ (тип трения – смазка). На торцевую поверхность выходят линии №1 по линии №7. Следует отметить, что наименьшее значение углов выхода линия Лагранжа на дорожку качения соответствует распределению волокнистой структуры поковки, возникающей при прохождении пуансоном с комбинированным типом трения (коэффициент трения $\mu = 0,3$). Если вычислить величину суммарного угла выхода линий Лагранжа на внутреннюю поверхность поковки подшипникового кольца $\varphi_{\Sigma} = \varphi_i$, то наименьшее его значение $\varphi_{\Sigma} = 54^0$ будет соответствовать волокнистой структуре, полученной при комбинированном типе трения (коэффициент трения $\mu = 0,3$).

Анализ картин распределения линий Лагранжа на рис. 3а ($\mu = 0,3$) показывает лучшую параллельность линий образующим внешней и внутренней поверхности поковки. Это дает основание предположить, что подшипниковые кольца с данной макроструктурой материала будут иметь более высокую контактную выносливость, т.к.

експериментально встановлено [1], що в реальних умовах експлуатації при навантаженні підшипникового кільця для забезпечення максимальної контактної виносливості, траєкторії головних касательних напружень повинні проходити паралельно волокнам матеріала, а нормальні напруження діяти перпендикулярно волокнам (направленню розповсюдження тріщин).

Висновки. В роботі проведено численне моделювання двох етапів технологічного процесу гарячої штамповки (осадки і двухпроходної формувки) підшипникового кільця. С цією метою методом кінцевого елемента була численно розв'язана нестационарна контактна термовязкопластична задача з відповідними граничними умовами. Отримані картини розподілу волокнистої структури поковки кільця підшипника в вигляді ліній Лагранжа. Проведено порівняння картин розподілу ліній Лагранжа для трьох типів тертя: сухого, комбінованого і тертя зі смазкою. Аналіз величин кутів виходу ліній Лагранжа на внутрішню поверхню поковки (дорожку качення) дозволив вибрати комбінований тип тертя на контактних поверхнях заготовки-пуансон і заготовка-матриця як варіант умов тертя, при якому матеріал має раціональну волокнисту структуру. Це дозволяє забезпечити максимальну експлуатаційну довговічність колес підшипника.

Список литературы

1. Колотенков И. В. К вопросу о влиянии макроструктуры металла на долговечность подшипников качения / И. В. Колотенков // Труды ВНИИПП. – 1962. – Вып. 3. – С. 3–16.
2. Раузин Я. Р. Влияние макроструктуры металла на контактную выносливость и долговечность подшипников качения / Я. Р. Раузин // Контактная прочность машиностроительных материалов: Сб. научных трудов. – Москва : Наука. – 1964. – С. 51–55.
3. Леванов А. Н. Контактное трение в процессах обработки давлением / А. Н. Леванов, С. П. Буркин. – Москва : Металлургия, 1976. – 416 с.
4. Яковлев С. П. Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости деформирования и вида технологической смазки / Известия ВУЗов. Машиностроение. 1987. №3. – с. 144–148.

5. Чумаченко Е. Н. Реализация контактного взаимодействия в процессах обработки материалов давлением / С. А. Аксенов, С. А. Бобер // Методы розв'язання прикладних задач механіки твердого тіла, 2010, вип. 11 – С. 299–305.

6. Унсков Е. П. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унсков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1992. – 720 с.

7. Грозенко Е. Д. Численное моделирование температурного поля заготовок при индукционном нагреве для изготовления подшипниковых колес / Е. Д. Грозенко, Э. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 26. – 4 с.

8. T. Altan and A.E. Tekkaya Sheet Metal Forming. Fundamentals 2012 ASM International, 294 p.

References (transliterated)

1. Kolotenko I. V. K voprosu o vliyani makrostruktury metalla na dolgovechnost podshipnikov kacheniya. [On the effect of metal macrostructure on the durability of rolling bearings]. Moskva, Trudy VNIIPP, 1962, No 3, pp. 3–16.
2. Raubin Ya. R. Vliyani makrostruktury metalla na kontaktnuyu vyinoslivost i dolgovechnost podshipnikov kacheniya. [Influence of metal macrostructure to contact endurance and durability of rolling bearings]. Kontaktnaya prochnost mashinostroitelnykh materialov: Sb. nauchnykh trudov. Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 51–55.
3. Levanov A.N. Kontaktnoe trenie v processakh obrabotki davleniem [Contact friction in the forming process]. Moscow, Metallurgiya Publ. 1976, 416 p.
4. Yakovlev S.P. Izmenenie koeffitsienta treniya v zavisimosti ot skorosti deformirovaniya i vida tehnologicheskoy smazki [The change of the friction coefficient depending on the type of deformation and the rate of technological lubricant]. Izvestiya VUZov. Mashinostroenie Publ., 1987. No 3, pp. 144–148.
5. Chumachenko E.N. Realizatsiya kontaktnogo vzaimodeystviya v processakh obrabotki materialov davleniem [Implementation of contact interaction in the material forming processes]. Metodi rozvyazannya prikladnykh zadach mehaniki tverdogo tila 2010 vip. 11, pp. 299–305 p.
6. Unkskov E. P., Dzhonson U., Kolmogorov V. L. i dr. Teoriya kovki i shtampovki [The theory of forging and stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 1992, 720 p.
7. Grozenok E. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya zagotovok pri induktsionnom nagreve dlya izgotovleniya podshipnikovyykh kolets. [Numerical simulation of temperature field in induction heating of blanks for the manufacture of bearing rings]. Visnik NTU «HPi». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Kharkov, NTU «HPi», 2016, no 26 (1198), pp. 50–53.
8. T. Altan and A.E. Tekkaya Sheet Metal Forming. Fundamentals 2012 ASM International 294 p.

Поступила (received) 10.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

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. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 32–36. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Вплив тертя на розподіл волокнистої структури поковки підшипникового кільця при гарячій штамповці / Е. Д. Грозенко, Е. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 32–36. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping / I. D. Grozenok, E. A. Simson, A. V. Stepuk, S. Y. Shergin // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 32–36. – Bibliogr.: 8 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Грозенюк Євген Денисович – аспірант кафедри опору 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

Симсон Едуард Альфредович – доктор технічних наук, кафедра сопроотивлення матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: simson@upec.ua

Симсон Едуард Альфредович – доктор технічних наук, кафедра опору матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, 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 Александр Владимирович – кандидат фізико-математических наук, старший научный сотрудник, НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

Степук Олександр Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий 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

Шергин Сергей Юрьевич – старший преподаватель кафедры сопроотивления материалов НТУ «ХПІ», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

Шергін Сергій Юрьевич – ст. викладач кафедри опору матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

Shergin Sergei – sr. lecturer Strength of materials' Department National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua