

УДК 621.77

Л. В. АВТОНОМОВА, Е. Д. ГРОЗЕНОК, А. В. СТЕПУК

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОКОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ

Проведено математическое моделирование технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца. Численно решена нестационарная контактная термовязкопластическая задача с соответствующими граничными условиями на базе метода конечных элементов. Начальное распределение поля температур было получено при решении задачи индукционного нагрева цилиндрической заготовки. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния заготовки, возникающих в процессе технологической операции осадки и формовки, позволил сформировать картины распределения волокнистой структуры материала. Была предложена альтернативная операция двухпроходной формовки, которая позволила получить картину более рационального распределения волокнистой структуры поковки кольца подшипника. Для двухпроходной формовки найдены геометрические размеры пуансона предварительной формовки, при проходе которого после завершения технологической операции окончательной формовки была получена волокнистая структура поковки кольца подшипника с минимальными значениями углов выхода волокон на контактную поверхность (дорожку качения). Это позволяет предположить, что в дальнейшем после оптимального технологического процесса раскатки можно изготовить подшипниковые кольца повышенной долговечности.

Ключові слова: подшипниковые кольца, волокнистая структура, формовка, осадка, штамповка, метод конечных элементов.

Проведено математичне моделювання технологічного процесу гарячого штампування підшипникового кільця. Чисельно вирішена нестационарна контактна термовязкопластична задача з відповідними граничними умовами на базі методу скінчених елементів. Початковий розподіл поля температур було отримано при рішенні задачі індукційного нагріву заготовки. Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану заготовки, які виникають в процесі технологічної операції осадки і формування, дозволив сформувати картини розподілу волокнистої структури матеріалу. Була запропонована альтернативна операція двопрхідного формування, яка дозволила отримати картину раціональнішого розподілу волокнистої структури поковки кільця підшипника. Для двопрхідного формування знайдені геометричні розміри пуансона попереднього формування, при проході якого після завершення технологічної операції остаточного формування була отримана волокниста структура поковки кільця підшипника з мінімальними значеннями кутів виходу волокон на контактну поверхню (доріжку качення). Це дозволяє припустити, що в подальшому після оптимального технологічного процесу розкочування можна виготовити підшипникове кільця підвищеної довговічності.

Ключевые слова: підшипникові кільця, волокниста структура, формування, осадка, штампування, метод кінцевих елементів.

Mathematical modeling of the hot stamp process for a bearing ring performed. The unsteady contact thermo-viscous-plastic problem with the appropriate boundary conditions solved applying the finite element method. The solution of the inductive heating for a work piece provided the initial temperature field distribution. Calculation of the work piece stress-strain state parameters during technological process operations of precipitation and molding allowed generating a picture of the material's fiber structure distribution. The more rational fibrous structure distribution within the bearing rings suggested with an alternative two-pass molding operation. The punch geometrical sizes of the preform defined for two-pass forming. It passes in process after forming to obtain the final fiber structure of bearing ring forgings with minimum values of output fibers angles to the contact surface (raceway). This suggests an opportunity to produce the in-cresed-term durable bearing rings applying the optimum rolling preprocess further o.

Keywords: bearing ring, fibrous structure, forming, sludge, forming, finite element method.

Введение. Для современного машиностроения актуальной задачей является повышение надежности и срока службы высоконагруженных деталей машин, подверженных контактному воздействию, например, подшипников. В процессе эксплуатации подшипникового узла основной причиной выхода его из строя является выкрашивание дорожки качения подшипникового кольца. Поэтому необходимо проводить модернизацию технологического процесса изготовления колец, которая позволит увеличить их ресурс за счет повышения сопротивления контактной усталости. Рациональный подбор технологических параметров соответствующего техпроцесса на стадии проектирования обеспечит гарантированное качество и максимальную долговечность подшипников.

Анализ последних исследований и литературы.

Технологический процесс производства подшипниковых колец включают в себя: нагрев цилиндрической заготовки, горячую штамповку и раскатку кольца.

Современные исследования, посвященные технологии изготовления подшипниковых колец с повышенной эксплуатационной стойкостью, освещены во многих литературных источниках. Вопросы подбора оптимальных параметров процесса нагрева заго-

товки, с точки зрения энергоэффективности и быстродействия, рассмотрены в работах [1,2]. Многочисленные исследования показали, что основным определяющим фактором для повышения долговечности при штамповке является учет волокнистой структуры материала [3,4]. Волокнистое строение должно удовлетворять требованиям симметричности, соответствовать контуру детали и не выходить на контактную поверхность (дорожку качения) для подшипника. Экспериментальные исследования волокнистой структуры готовых колец подшипников позволили установить связь параметров технологического процесса изготовления и его качества [5]. В частности, с этой целью проводится математическое моделирование отдельных этапов технологического процесса изготовления подшипникового кольца с использованием аналитических и численных методов [6,7].

Целью данной статьи является определение рациональных параметров технологического процесса формовки, которые позволяют улучшить распределение волокнистой структуры поковки подшипникового кольца.

Постановка задачи и численная реализация.

Процесс горячей штамповки подшипникового кольца включает в себя следующие этапы: осадка, формовка и прошивка. На первом этапе - осадке в

© Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенок, А. В. Степук, 2016

нагретой цилиндрической заготовке происходит перераспределение волокнистой структуры, которая возникает при изготовлении заготовки в процессековки и представляет собой вытянутые в направлении деформирования (оси заготовки) сгруппированные дробленые кристаллы и неметаллические включения, примеси на границах зерен. Вследствие этого, материал заготовки получает структурную анизотропию, приводящую к зависимости только величины ударной вязкости образца от ориентации волокон [8,9]. Далее на этапе формовки происходит дальнейшее изменение распределения волокнистой структуры в поковке подшипникового кольца. Т.к. распределение волокнистой структуры заготовки для подшипникового кольца связано с ее деформированием, то за изменением этого распределения можно наблюдать с помощью линий Лагранжа при решении задачи определения параметров напряженно-деформированного состояния при соответствующей технологической операции.

При математическом моделировании всех этапов технологического процесса горячей штамповки необходимо решать нестационарную контактную термовязкопластическую задачу с соответствующими начальными и граничными условиями. Полная система разрешающих уравнений включает в себя: уравнения равновесия, неразрывности, условие пластичности и физические нелинейные определяющие соотношения, связывающие между собой параметры напряженного состояния (напряжения, деформации, скорости деформаций и температуру) [6].

Начальное поле распределения температур получено путем решения осесимметричной нестационарной краевой задачи теплопроводности для цилиндрической заготовки при индукционном нагреве [7]. На всех контактных поверхностях (между пуансоном и заготовкой, матрицей и заготовкой) при осадке и формовке задается условия теплового контакта и трение, изменяющееся по закону Зибеля. Внешняя поверхность матрицы жестко закреплена. Режим нагружения задается движением Пуансона с заданной скоростью (кинематическое нагружение). Т.к. процесс горячей штамповки происходит при температурах свыше 1000°C , то при решении краевой контактной термовязкопластической задачи учитывается зависимость от температуры всех механических характеристик материала и параметров напряженно-деформированного состояния.

В работе представлено численное моделирование процесса горячей штамповки методом конечных элементов. С этой целью численно решалась нестационарная термовязкопластическая задача контактного взаимодействия пуансона с предварительно нагретой цилиндрической заготовкой при операциях осадки и формовки. Конечно-элементная модель включает 11024 узла и 10573 элементов. Коэффициент трения с учетом смазки на контактных поверхностях между пуансоном и поковкой выбирается равным $\mu=0,3$. Скорость движения пуансона $V_n = 100$ мм/с. Материал заготовки Сталь ШХ15. Цилиндрическая заготовка ($R_3=50$ мм, $h_3=190$ мм) предварительно неравномерно нагрета. Температура по всему объему изменяется от $T_0 = 1110^{\circ}\text{C}$ до $T_0 = 1140^{\circ}\text{C}$.

На первом шаге решения задачи определяется напряженно-деформированное состояние заготовки после технологической операции осадки. На рисунке 1 представлено распределение линий Лагранжа, соответствующее укладке волокон в материале после осадки. Макроструктура заготовки претерпевает изменение за счет перемещения частиц (течения) материала. В результате этого явления волокна первичной макроструктуры заготовки переходят в волокна вторичной макроструктуры с определенной ориентацией к рабочим поверхностям получаемой поковки. Угол выхода волокон φ_i , который измеряется между касательной к линии Лагранжа (волокна) и образующей внутренней поверхности поковки в месте выхода линии Лагранжа на рабочую поверхность поковки, является характеристикой качества структурной волокнистости.

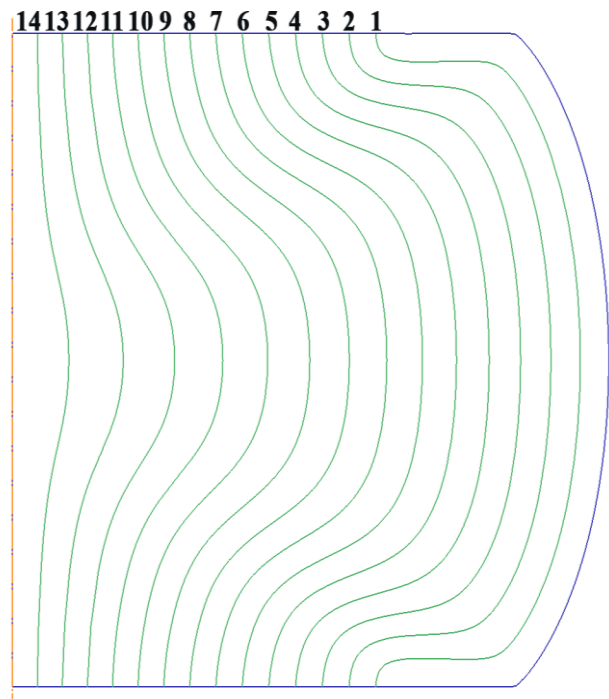


Рис. 1- Распределение волокон после процесса осадки цилиндрической заготовки

На рисунке 2(а) представлено распределение линий Лагранжа (волокон) в поковке после однократной формовки пуансоном радиуса $R = 48$ мм. Наблюдается выход части линий (волокон) на внутреннюю поверхность поковки (дорожку качения) под углом φ_i от 0° до 90° . Так линия Лагранжа №3 выходит под углом 90° и линий с №3 по №7 (серединные волокна) выходят на дорожку качения, при этом не соблюдается параллельность линий (расположение волокон под углом) образующим внешней и внутренней поверхности поковки (см. рисунок 2(б)). Данная макроструктура позволяет сделать вывод об ожидаемой сравнительно невысокой контактной выносливости [8] подшипникового кольца, т.к. экспериментально установлено, что при работе подшипникового кольца в условиях эксплуатации детали волокна должны быть параллельны траекториям главных касательных напряжений и перпендикулярны нормальным контактным

давлениям (направлению распространения трещин) [9].

Для повышения долговечности подшипникового кольца предлагается использовать процесс двухпроходной формовки: после процесса осадки цилиндрической заготовки при формовке осуществляется проходка пуансоном меньшего диаметра, затем, после поворота первоначальной поковки на 180° град, повторно проходят пуансоном с диаметром, соответствующим поковке кольца.

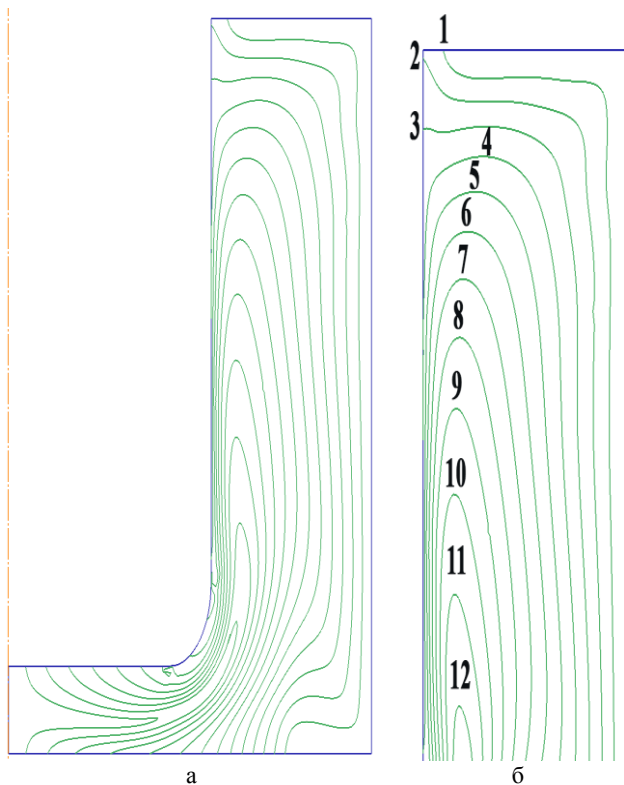


Рис. 2 - Распределение волокон после однопроходной формовки

На рисунке 3 приведена схема проведения двухпроходной формовки: а – для пуансона меньшего диаметра $d=76$ мм, б – для пуансона диаметра, соответствующего диаметру поковки подшипникового кольца $D=96$ мм. Для двухпроходной формовки конечное распределение линий Лагранжа представлено на рисунке 4. Следует отметить, что на торцевую поверхность поковки выходят с линии №1 по линии №6. На контактную поверхность выходят линия №7 и линия № 8, причем величины углов φ_7 и φ_8 достаточно малы, а выход линий с углом $\varphi_1 = 90^\circ$ отсутствует.

В работе было проведено исследование влияния величины диаметра пуансона d для первичной проходки в процессе двухпроходной формовки на конечное распределение линий Лагранжа в готовой поковке подшипникового кольца. Для этого численно были решены задачи определения параметров напряженно-деформированного состояния и получены картины распределения линий Лагранжа в поковке подшипникового кольца при предварительном проходе пуансоном с диаметром $d = 66$ мм и $d = 86$ мм

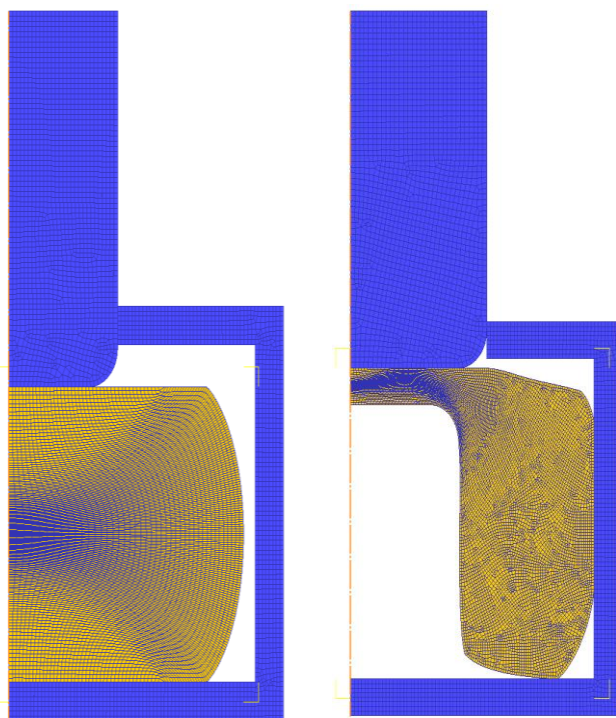


Рис. 3 - Схема операции двухпроходной формовки

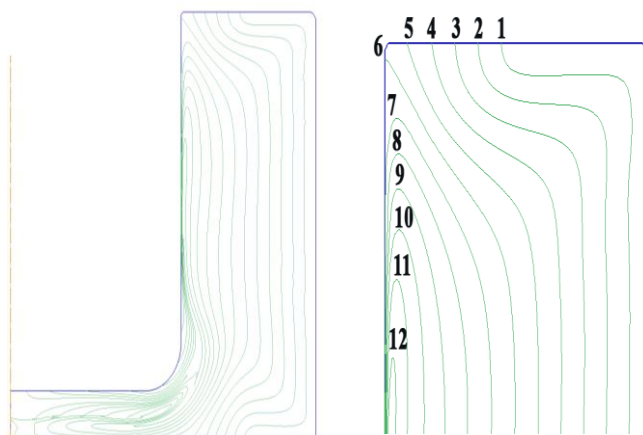


Рис. 4 - Распределение волокон поковки после двухпроходной формовки ($d=76$ мм)

На рисунке 5 представлены поковки подшипникового кольца двухпроходной формовки для двух значений диаметра пуансона: а) $d = 66$ мм, б) $d = 86$ мм.

При сравнении рисунка 4 и рисунка 5 можно видеть, что картина распределения линий Лагранжа, имеющая наименьшее количество линий Лагранжа, выходящих на контактную поверхность с минимальным углом φ_1 , представлена на рисунке 4. Это позволяет предположить, что более рациональная волокнистая структура поковки подшипникового кольца может быть получена при предварительном проходе пуансоном диаметром $d=76$ мм в процессе двухпроходной формовки. Данная поковка в дальнейшем при оптимальном технологическом процессе раскатки позволит получить подшипниковое кольцо с повышенной долговечностью.

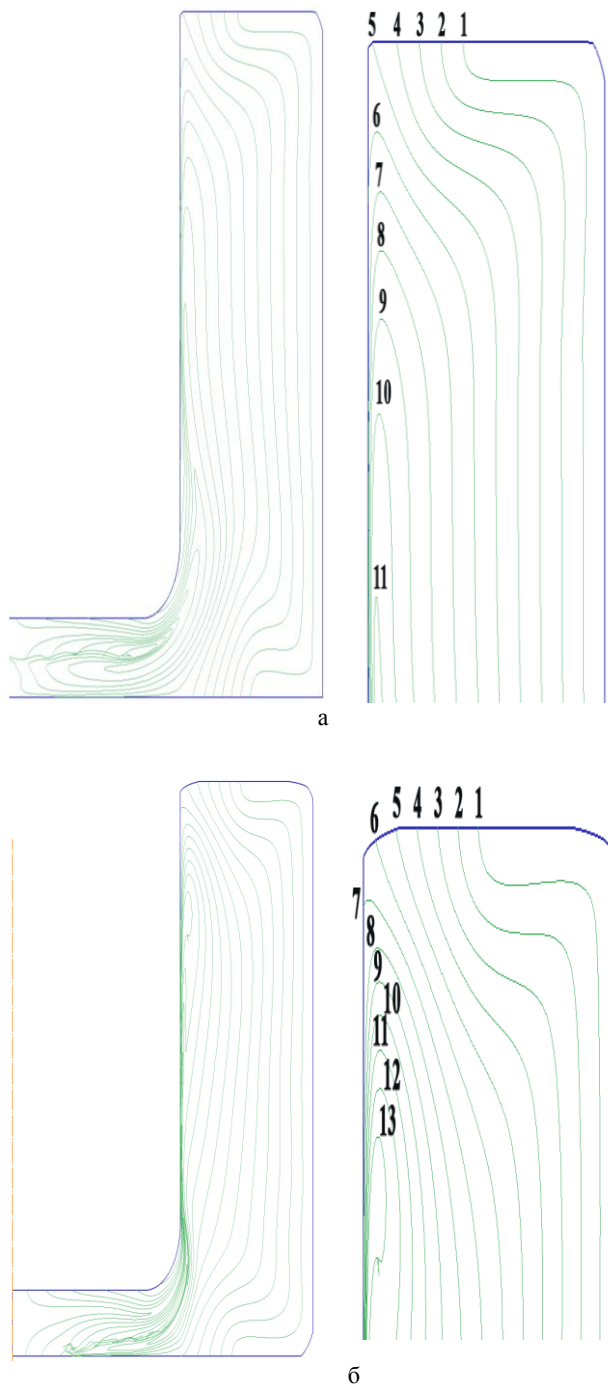


Рис. 5 - Распределение волокон поковки при двухпроходной формовке для $d=66\text{мм}$ и $d=86\text{мм}$

Выводы.

В работе проведено численное моделирование технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца. С этой целью методом конечного элемента численно была решена нестационарная контактная термовязкопластическая задача для этапов осадки и формовки. Определение параметров напряженно-деформированного состояния позволило получить картины распределения волокнистой структуры поковки кольца подшипника в виде линий Лагранжа для процесса одно- и двухпроходной формовки. Установлено влияние размера диаметра пуансона для предварительной проходки на окончательное распре-

деление и выход волокон на внутреннюю поверхность (дорожку качения) поковки подшипникового кольца. Получена картина рационального распределения волокнистой структуры поковки кольца подшипника с минимальным значением величины углов выхода волокон на дорожку качения, что повышает сопротивление данной поверхности контактной усталости и увеличивает долговечность подшипника.

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. Плишивцева Ю. Э. Оптимальное по быстродействию и энергопотреблению управление периодическим процессом индукционного нагрева металла / Ю. Э. Плишивцева, А. В. Попов, А. И. Дьяконов. // Альманах современной науки и образования. 2013. №2 (69) С.135-142.
3. Банных О. А. Штамповка поковок с направленным волокнистым строением / О. А. Банных, О. А. Белокуров // Вестник машиностроения. – 2000 – №10. – С. 33-37.
4. Колотенков И. В. К вопросу о влиянии макроструктуры металла на долговечность подшипников качения / И. В. Колотенков // Труды ВНИИПП. –1962. – Вып. 3. – С. 3-16.
5. Шейн А. С. Влияние ориентировки волокон на контактную усталостную прочность закаленной стали / А. С. Шейн // Митом. 1957. – № 12. – С. 61-66.
6. Унсов Е. П. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унсов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др]. – М. : Машиностроение, 1992. – 720с.
7. 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.
8. 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.
9. Hertzberg R. W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. New York, John Wiley & Sons, 1983. 697 p.

References (transliterated)

1. Danilushkin A. I., Knyazev S. V., Semenov S. I. Matematicheskaya model induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok pered raskatkoy. *Vestnik VGTU*, 2012, no10-1, pp. 101-103.
2. Pleshivtseva Yu. E., Popov A. V., Dyakonov A. I. Optimalnoe po bystrodeystviyu i energopotrebleniyu upravlenie periodicheskim protsessom induktsionnogo nagreva metalla. *Almanah sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2013, No 2 (69), pp.135-142.
3. Banniyh O. A., Belokurov O. A. Shtampovka pokovok s napravlyennym voloknistym stroeniem. *Vestnik mashinostroeniya*, 2000, No 10. 33 p.
4. Kolotenko I. V. K voprosu o vliyaniy makrostruktury metalla na dolgovechnost podshipnikov kacheniya. *Moskv, Trudy VNIIPP*, 1962, No 3. 3 p.
5. Sheyn A. S. Vliyanie orientirovki volokna na kontaktnuyu ustalostnuyu prochnost zakalennoy stali. *Moskva, Trudy VNIIPP*, 1957, no 12. 61 p.
6. Unsov E. P., Dzhonson U., Kolmogorov V. L. i dr. *Teoriya kovki i shtampovki*. Moscow, Mashinostroenie, 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 podshipnikoviyh kolets. *Visnik NTU «HPI». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin*. Kharkov, NTU «HPI», 2016, No 26 (1198), pp. 50-53.
8. Rauzin Ya. R. Vliyanie makrostruktury na kontaktnuyu vyinoslivost i dolgovechnost podshipnikov kacheniya. *Kontaktnaya prochnost mashinostroitelnykh materialov: Sb. nauchnykh trudov*. Moscow: Nauka, 1964.
9. Hertzberg R. W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. New York: John Wiley & Sons, 1983. 697 p.

Поступила (received) 17.10.15

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження розподілу волокнистої структури підшипникового кільця при гарячому штампуванні / Л. В. Автономова, Є. Д. Грозенюк, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 69–73. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Исследование распределения волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенюк, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 69–73. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping / L. V. Avtonomova, I. D. Grozenok, A. V. Stepuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.69–73. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Автономова Людмила Володимирівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Опір матеріалів», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Автономова Людмила Владимировна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ведущий научный сотрудник кафедры «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Avtonomova Ludmila – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Leading Researcher at the Department of "Strength of Materials", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Грозенюк Євген Денисович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Опір матеріалів», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Грозенюк Евгений Дмитриевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Grozenok Ievgen – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student at the Department of "Strength of Materials", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Степук Александр Владимирович – кандидат физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: alexstepuk@gmail.com

Степук Александр Владимирович – кандидат физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: alexstepuk@gmail.com

Stepuk Oleksandr – Candidate of Physical- Mathematical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher, Department of "Strength of Materials", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: alexstepuk@gmail.com