

**Список литературы:** 1. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 669 с. 2. Гарбер Э.А. Производство проката : Справочное издание. Том I. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) / Э.А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2007. – 368 с. 3. Управление качеством тонколистового проката / В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, И.Ю. Приходько, А.И. Яценко. – К. : Техника, 1997. – 384 с. 4. Гарбер Э. А. Математическое моделирование усилий в подшипниковых опорах рабочих валков широкополосных станов при переменных скоростях прокатки / Э. А. Гарбер, В. П. Наумченко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 3. – С. 43-46. 5. Хлопонин В. Н. Силовое и кинематическое взаимодействие рабочих и опорных валков при перекосе их осей / В. Н. Хлопонин // Сталь. – 1995. – № 5. – С. 54-57. 6. Гарбер Э. А. Моделирование трения качения в рабочих клетях широкополосных станов / Э. А. Гарбер, С. Н. Самарин, А. И. Трайно, В. В. Ермилов // Металлы. – 2007. – № 2. – С. 36-43. 7. Черменский О. Н., Федотов Н. Н. Подшипники качения : Справочник-каталог / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с. 8. Сатонин А. В. Развитие численных одномерных математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при холодной прокатке относительно тонких полос / А. В. Сатонин, А. Г. Присяжный, А. М. Спаская, А. С. Чуруканов // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 2(31). – С. 62-68.

Надійшла до редколегії 28.10.2013

УДК 621.77.06 : 621.771.07

**Уточненный метод расчета сил, действующих на подшипники рабочих валков станов холодной прокатки тонколистовой стали / Присяжный А. Г., Коренко М. Г., Сотсков В.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43 (1016). – С. 201-206. Бібліогр.: 8 назв.**

У статті розроблений уточнений метод розрахунку сил, що діють на підшипникові вузли робочих валків станів холодного прокатування тонколистової сталі. Цей метод дозволяє визначити довговічність підшипників робочих валків з урахуванням впливу одночасно діючих на них радіальних і осьових сил, значення яких встановлюються залежно від всіх основних технологічних чинників процесу холодного тонколистового прокатування. Аналіз результатів розрахунку, отриманих по розробленому методу, підтверджує доцільність його подальшого застосування.

**Ключові слова:** робочі валки, підшипники, сила прокатування, сила противовигину, натягнення, осьові сили, радіальні сили, кут перекосу валків, довговічність.

The method of calculation of forces, which operate on bearings of workings rollers of the cold rolling mills, is developed in the article. This method allows to determine longevity of bearings of workings rollers taking into account influence of radial and axial forces, the values of which are set depending on all of basic technological factors of process of the cold rolling of thin sheets. Analysis of results of calculation, got on the developed method, expedience of his further application confirms.

**Keywords:** workings rollers, bearings, force of rolling, force of hydraulic bend, pull, axial forces, radial forces, corner of defect of rollers, longevity.

УДК 539

**Э. А. СИМСОН**, докт .техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;  
**STEVEN SCICLUNA**, BEug MBA, Corp. «Metro», Melburn, Australia;  
**В. Л. ХАВИН**, канд. техн. наук, зав.каф.; НТУ «ХПІ»;  
**Л. В. АВТОНОМОВА**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПІ».

## **ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЛЬЦА ПРИ ХОЛОДНОЙ РАСКАТКЕ**

.Рассмотрена задача численного моделирования процесса холодной раскатки подшипниковых колец. Приведена математическая постановка в виде разрешающей системы уравнений. В трехмерной постановке численно методом конечных элементов с помощью пакета DEFORM при различных коэффициентах трения решена контактная задача для операции раскатки кольца.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, кольцо, контактная задача, трение, пластические деформации, конечный элемент.

**Описание проблемы.** Раскатка колец широко применяется в машиностроении, автомобильной, аэрокосмической промышленности и исследования этого технологического процесса активно проводилось последние 20 лет. В работах [1-8] изучалось влияние скорости подачи, скорости вращения и геометрии заготовки на усилия в контакте, температурное поле и качество изделия. Например, в работе [8], например, получено, что повышение коэффициента трения в контакте в 3-4 раза (с 0,15 до 0,8) повышает уровень однородности в распределении пластических деформаций по толщине изделия. В работе [9] при изменении коэффициента трения от 0,5 до 0,95 отмечается усиление неравномерности деформации и заметная неоднородность температурного поля при больших коэффициентах трения. Таким образом, влияние феномена трения носит комплексный характер и зависит от геометрии и материалов заготовки и инструмента, операционных параметров процесса, моделей трения в контакте, наличия смазочно-охлаждающей среды. Задача раскатки колец требует, как правило, 3-х мерной постановки и расчета в области больших пластических деформаций, поэтому цель настоящей работы – моделирование процесса холодной радиальной раскатки кольца в 3-х мерной постановке и изучение влияния трения в контакте на выходные параметры процесса.

**Постановка и численная реализация задачи.** Модель процесса холодной раскатки подшипникового кольца включает в себя деформируемую кольцевую заготовку прямоугольного поперечного сечения, абсолютно жесткие рабочие инструменты – ролик привода и оправку. Заготовка моделируется как 3-х мерное деформируемое твердое тело с линейно упругими свойствами в области упругих деформаций и жестко-вязко-пластическими свойствами при пластическом деформировании. Условия в контакте – проскальзывание с трением в рамках модели Треска. Процесс деформирования изотермический без учета термомеханической связи.

Математическая модель включает:

Уравнение равновесия в форме принципа виртуальной работы в динамической формулировке для материала, несжимаемого в области пластических деформаций в отсутствие объемных и поверхностных усилий (кроме контактных), и для виртуального поля материальных скоростей  $v^*$  имеет вид:

$$\int_V \sigma' : \dot{\varepsilon}^* dV - \int_V \rho \operatorname{div}(v^*) dV - \int_{S_c} \tau_f v^* dS = 0 \quad (1)$$

где  $\sigma'$  – тензор девиатора напряжений;

$\dot{\varepsilon}^*$  – тензор скоростей деформаций;

$\rho$  – плотность материала;

$\rho \cdot \tau_f$  – касательные усилия в контакте;

$\rho \cdot V$  – объем деформируемого тела;

$\rho \cdot S_c$  – площадь контактной поверхности.

Закон сохранения массы представляется в форме:

$$\int_V (K \operatorname{div}(v^*) + \dot{\rho}) p^* = 0 \quad (2)$$

где  $p^*$  – давление в пластическом объеме.

Модель материала – упруго-вязко-пластическая, закон пластического деформирования – закон течения, подчиняющийся уравнению Леви – Мизеса:

$$D_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где  $\dot{\lambda}$  – параметр пластичности,

$D_{ij}^p$  – тензор скоростей пластических деформаций для жесткопластической среды.

$$D_{ij} = D_{ij}^p, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где  $D_{ij}$  – тензор скоростей полных деформаций,

$F$  – пластический потенциал, задающий закон пластического течения:

$$F = \bar{\sigma} - \sigma_Y(\varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (5)$$

$F < 0$  – пластическое деформирование материала отсутствует,  $F \geq 0$  – материал деформируется пластически,  $\bar{\sigma}$  – эквивалентные (эффективные) напряжения.

Соотношение, определяющее состояние материала в области пластического деформирования, представляет собой функциональную зависимость напряжений пластического течения материала (текущего предела текучести) от текущего значения деформации (пластической деформации) и скорости деформации:

$$\sigma_Y = \sigma_Y(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (6)$$

В изотермической постановке рассматривается для фиксированного значения температуры (начального).

Физические и кинематические соотношения представляют собой: связь тензора скоростей напряжений  $\dot{\sigma}_{ij}$  с тензором скоростей деформаций

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} D_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$C_{ijkl}$  – упруго-пластический тензор 4-го порядка, где компоненты тензора  $C_{ijkl}$  определяются с учетом зависимостей (3–5). Кинематические условия представляют собой связь скоростей деформаций со скоростями материальных точек [11].

Условия контактного взаимодействия представляют собой контакт с проскальзыванием между жесткими инструментами и упругопластическим материалом. В настоящей работе используется закон Треска:

$$\tau_f = -m \tau_k \frac{v^*}{|v|}, \quad (8)$$

где  $\tau_f$  – касательные усилия (напряжения) в точке контакта,

$v$  – скорость относительного проскальзывания,

$\tau_k$  – предел прочности материала заготовки на сдвиг,

$\tau_k m$  – параметр трения ( $m < 1$ ).

В качестве граничных условий используются условия контакта с трением заготовки с абсолютно жесткими поверхностями инструментов и свободная от поверхностных усилий остальная поверхность заготовки. Вследствие движения инструмента с постоянной скоростью имеет место кинематическое нагружение.

Численное решение задачи осуществляется методом конечных элементов (МКЭ) в смешанной формулировке для приращения скоростей  $\Delta v^*$  и давлений  $\Delta p^*$  в рамках инкрементального независимого (смешанного) подхода Лагранжа-Эйлера (ALE), реализованного в большинстве коммерческих программных комплексов. Для численных расчетов был использован специализированный модуль «Ring-rolling», входящий в состав программного комплекса DEFORM 3D.

Задача решается в инкрементальной нестационарной динамической (учитывались силы инерции) постановке. Расчетная схема, представленная в работе [7], изображена на рис.1. Использовалась 3-х мерная модель заготовки. Геометрическая модель инструментов и заготовки для процесса раскатки подшипникового кольца создавалась с помощью CAD – системы Pro/Engineer в виде профилей 2-х мерных контуров тел вращения. Использовался 8-и узловой элемент – гексаэдр, общее число элементов – 55000. Материал заготовки – подшипниковая сталь ШХ15, определяющее соотношение  $\sigma_\gamma = \sigma_\gamma(\epsilon, \dot{\epsilon})$  – формировалось по таблично заданным из базы данных пакета DEFORM кривым деформирования, полученным при температуре  $T=20^\circ\text{C}$  и диапазоне скоростей деформирования  $10^{-3}\text{c}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2\text{c}^{-1}$ . Физико-механические характеристики заготовки и технические параметры процесса раскатки подшипникового кольца представлены в таблице 1.

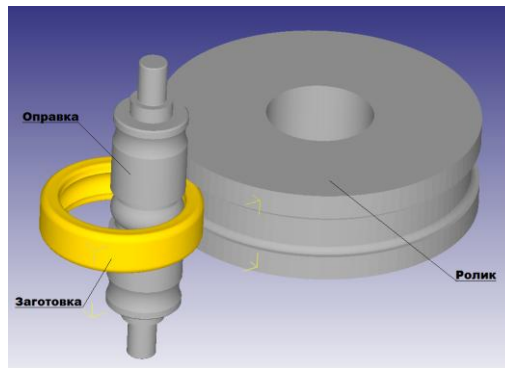


Рис. 1 – Расчётная модель процесса холодной раскатки наружного кольца подшипника 317

Таблица 1 – Физико-механические характеристики заготовки и технические параметры процесса раскатки подшипникового кольца

Геометрические параметры		Физические характеристики заготовки		Операционные параметры	
Внутренний диаметр заготовки, $d$ , мм	96.3	Модуль упругости, $E$ , Н/мм <sup>2</sup>	$2 \cdot 10^5$	Скорость вращения раскаточного ролика, $n$ , об/мин	350
Наружный диаметр заготовки, $D$ , мм	132.7	Коэффициент Пуассона, $\nu$	0.3	Скорость подачи, $v^*$ , мм/с	1.5
Диаметр раскаточного ролика, $D_0$ , мм	300	Плотность, $\rho$ , кг/мм <sup>3</sup>	$7.8 \cdot 10^{-3}$	Полное время обработки, с	12

**Результаты численного моделирования.** В процессе расчета определялись поля эквивалентных (эффективных) деформаций, скоростей эквивалентных деформаций, напряжений, материальных скоростей и перемещений, момент на раскатном ролике, усилие на инструментах (контактное). Расчеты проводились для двух значений параметра трения из зависимости (7) –  $m=0.012$ ,  $m=0.24$ , соответствующих различным условиям смазки. Распределения эквивалентных напряжений и контактных давлений представлены на рис. 2-3. С увеличением параметра трения  $m$  (с 0,12 до 0,24) к моменту достижения квазиустановившегося процесса деформирования уровень максимальной интенсивности напряжений в заготовке

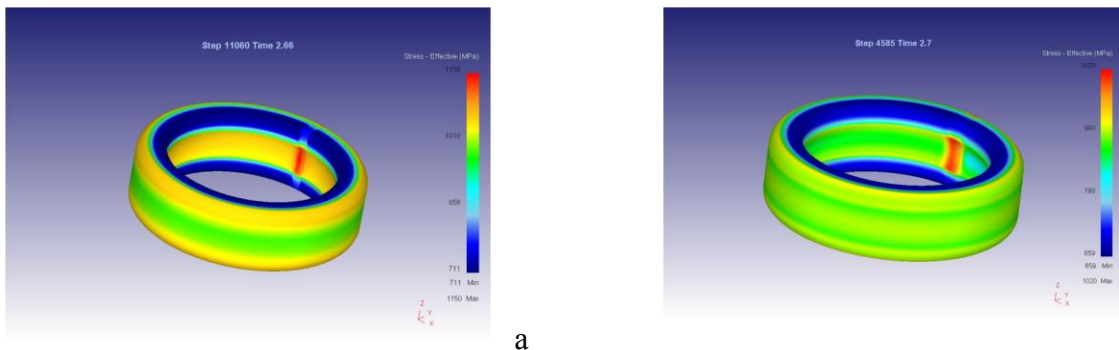


Рис. 2 – Распределение эквивалентных напряжений: а –  $m=0.012$ ; б –  $m=0.24$

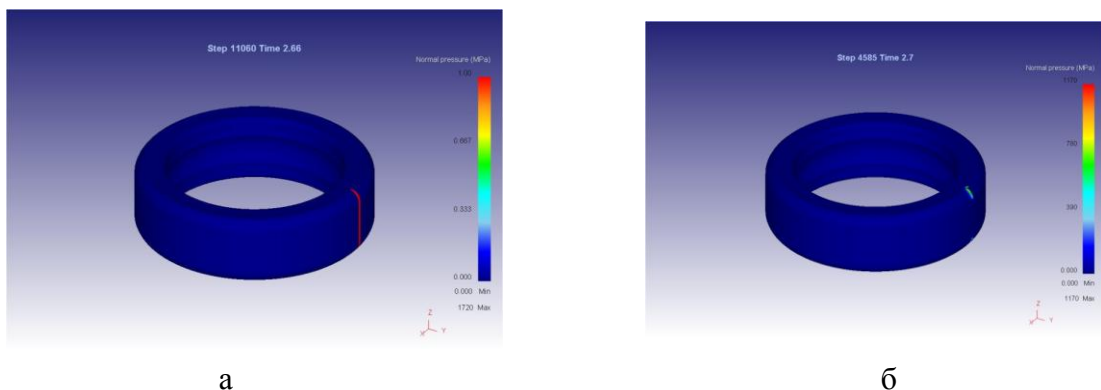


Рис. 3 – Распределение контактных давлений: а –  $m=0.012$ ; б –  $m=0.24$

снижается на 10%, максимальные контактные давления существенно падают (на 50%) при практически сохраняющихся суммарных усилиях на инструменте. Момент на инструмент при этом возрастает на 30%.

**Выводы.** 1. В работе рассмотрено моделирование процесса радиальной холодной раскатки колец. Задача представлена в виде контактного взаимодействия 3-х мерной кольцевой упруговязкопластической деформируемой заготовки, контактирующей с двумя профильными абсолютно жесткими инструментами – роликами. 2. Получено распределение выходных параметров процесса холодной раскатки подшипникового кольца при различных значениях параметров трения. 3. Выявлено, что при росте сил трения в 2 раза наблюдается незначительное снижение максимального уровня интенсивности напряжений и существенное снижение уровня максимальных контактных давлений при практически не изменяющемся усилии на инструменте. При этом существенно возрастает момент на инструменте.

**Список литературы 1.** Yang D.V., Kim K.H. Hawhyard Simulation of T-section profile ring rolling by 3D rigid plastic Finite Element Method//International Journal Mechanical Science.- 1991.- V.33, №7.-P. 541-

550. 2. *Coupu J., Raulin J., Huer J.* Investigation of hot ring rolling using 3D finite element simulation// Modeling of Metal Rolling Processes/- 1999, London. 3. *Huer j., Noyes J-l., Coupu J.* Three-dimensional finite-element simulation of hot ring rolling// Minerals, Metals and Materials Society.-2001.-P.249-258. 4. *Davey K., Ward M.J.* A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation// International Journal Mechanical Science.- 2002.- V.44.-P. 165-190. 5. *Song J.L., Dwson A.L., Jacob M.H., Brooks J., Beden I.* Cupled thermo-mechanical finite element modeling of hot ring rolling process//Journal of Materials Processing Technology.- 2002.- V. 121.- P. 332-340. 6. *Yan F.L., Hua L., Wu Y.-Q.* Planning feed speed in cold ring rolling//International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007.- V.47.-P. 1695-1701. 7. *Сімсон Е. А., В.В. Овчаренко, В.И. Демидов, И.Д., Прево И.В., Назаренко С. А.* Холодная раскатка заготовок подшипниковых колец// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків, НТУ «ХПІ», 2011, №52 . с. 156-160 8. *Yang H., Gu O.L., Zha N. M.* Role of friction in cold ring rolling// Journal Mechanical Science and Technology.- 2005.- V.21, №6.-P. 914-920. 9. *Sun Z.-C., Yang H., Ou X.-Z.* Thermo-mechanical coupled analysis of hot rolling process// Trans actions of Noferrous Metals Society of China.- 2008.- V. 18.- P. 1216-1220. 10. *Wagoner R.H., Chenot J.-L.* Metal forming analysis//Cambridge University Press, Cambridge.-2001.- P. 11. *Yu-Kan Hu, Wing Kam Lin.* ALE finite element formulation for ring rolling analysis//International Journal of Numerical Methods in engineering. - 1992.- V.33. - P. 1217-1236.

Поступила до редколегії 04.11.2013 г.

УДК539

**Влияние трения на напряженно-деформированное состояние кольца при холодной раскатке / Симсон Э. А., Scicluna Steven, Хавин В. Л., Автономова Л. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43 (1016). – С. 206-211. Бібліогр.: 11 назв.**

Розглянуто задача чисельного моделювання процесу холодного розкочування підшипникових кілець. Приведена математична постановка у вигляді вирішуючої системи рівнянь. У тривимірній постановці чисельно методом скінченних елементів за допомогою пакету DEFORM при різних коефіцієнтах тертя вирішена контактна задача для операції розкочування кільця.

**Ключові слова:** математичне моделювання, кільце, контактна задача, тертя, пластичні деформації, кінцевий елемент.

It is considered the problem of numerical modeling of cold rolling bearing rings. The resolved equations of mathematical formulation is provided. In the three-dimensional formulation contact problem is solved numerically for different coefficients of friction by using a finite element software DEFORM.

**Keywords:** mathematical modeling, ring, contact problem, friction, plastic deformation, finite element.

УДК 621.774.36

**С. Л. СТАСЕВСКИЙ**, директор института, ГП «УКРГИПРОМЕЗ»,

Днепропетровск;

**Ю. Д. УГРЮМОВ**, канд. техн. наук, вед. инженер, ГП «УКРГИПРОМЕЗ»,

Днепропетровск;

**Д. Ю. ГАРМАШОВ**, канд. техн. наук, вед. инженер, ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ», Днепропетровск;

**А. А. КСЁНЗ**, инженер-технолог, ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ»,

Днепропетровск.

## **ПУТИ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРЕЗИ НА ПИЛИГРИМОВОМ СТАНЕ**

Рассмотрены методы уменьшения массы пилигримовых головок при прокатке толстостенных и тонкостенных труб. Выполнены промышленные исследования при прокатке труб размером 245×10