

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОСТАВНОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА ПРИ СБОРКЕ

Белевская И.В.¹, Корчунов А.Г.¹, Константинов Д.В.¹, Бзовски К.², Белевский Л.С.¹, Федосеев С.А.³

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица, Краков, Польша

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): при определении нагрузочной способности крупногабаритных соединений с натягом обычно учитывается только величина коэффициента трения и не рассматривается микротопография сопрягаемых поверхностей, а также их структура и механические свойства. Однако эти характеристики могут оказывать большое влияние на нагрузочную способность бандажированного прокатного вала, его напряженно-деформированное состояние (НДС), долговечность, и что особенно актуально, качество продукции. **Цель работы:** разработка усовершенствованной методики компьютерного моделирования процесса сборки тепловым способом бандажированных прокатных валков, позволяющей учитывать микротопографию и механические свойства сопрягаемых поверхностей. **Используемые методы:** процесс проектирования сборки деталей типа вал-втулка производится посредством конечно-элементного компьютерного моделирования. Модель процесса состоит из нескольких отдельных взаимосвязанных субмоделей, отражающих поведение металла при деформировании на разных масштабных уровнях. Макромодель строится на представлении металла в качестве изотропного материала, и она необходима для получения численных значений параметров НДС на макроуровне. Полученные в макромодели абсолютные показатели параметров НДС на каждом шаге расчета накладываются на микромодель, что позволяет произвести расчет распределения параметров НДС в отдельных микроструктурных составляющих любой точки тела. Для сбора информации о геометрических параметрах микротопографии выбран ролик из стали 30, поверхность которого обработана лазером (нагрев на глубину более 50 мкм с оплавлением). Помимо исследований микротопографии получены сведения о количественных параметрах микроструктуры поверхностного слоя образца и учтены основные технологические параметры процесса: базовые геометрические параметры деталей, температурные и скоростные режимы. **Новизна:** в результате моделирования получено распределение эквивалентных напряжений после остывания бандаж (моделировался нагрев бандаж перед сборкой до температуры 350°C). Максимальные напряжения возникают по краям бандаж и в зоне соприкосновения оси и бандаж. На поверхности оси максимальные эквивалентные напряжения достигают 150–170 МПа, а на внутренней поверхности бандаж – 772–839 МПа. Максимальные напряжения возникают в области микронеровностей поверхности оси, которая упрочнена лазерной обработкой, величина напряжений – 2190 МПа. **Практическая значимость:** апробация данной методики позволила получить информацию о динамике изменения НДС на уровне микротопографии контактирующих поверхностей. Применение данного подхода к построению компьютерных моделей сборки и эксплуатации металлургического оборудования позволит расширить классическую теорию конструирования составных крупногабаритных изделий.

Ключевые слова: бандажированный валок, компьютерное моделирование, сборка, микротопография, поверхность, лазерная обработка, напряжение.

Введение

При изучении напряженно-деформированного состояния (НДС) бандажированных прокатных валков, собранных по посадке с натягом, обычно используются формулы Ламе. Элементарные расчеты показывают, что при увеличении толщины стенки бандаж до возможно больших значений увеличиваются удельные давления по посадочной поверхности. Эти давления приводят к появлению сил трения, которые препятствуют проворачива-

нию и сползанию бандаж в осевом направлении. Таким образом, нагрузочная способность в окружном и осевом направлении соединений с натягом при прочих равных условиях зависит от коэффициента трения f между сопряженными поверхностями оси и бандаж [1]. Увеличение какими-либо путями коэффициента трения позволяет уменьшить натяг и, как следствие, вероятность разрушения бандаж от растягивающих напряжений. При расчете составных прокатных валков, сборка которых производится с нагревом бандаж, обычно принимают $f = 0,12–0,14$ [2]. Из опыта проектирования и испытаний фрикционных стыковых соединений известно, что при обработке сопрягае-

мых поверхностей вращающимися проволочными щетками $f = 0,35$, при пескоструйной и дробеструйной обработке $f = 0,58$, примерно такие же величины f достигаются при лазерной очистке [3]. Существенное влияние на коэффициент трения оказывают металлические покрытия [4]. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом возможно также электроэрозионным легированием [5] и лазерной закалкой [6]. Лазерная обработка приводит к образованию очень большого количества микроямок и выступов на поверхности. Выступы имеют высокую твердость и при сборке с использованием температурного деформирования могут внедряться в более пластичную сопрягаемую поверхность, что увеличит нагрузочную способность соединения. Следует отметить, что при определении нагрузочной способности крупногабаритных соединений с натягом обычно учитывается только величина коэффициента трения и не рассматривается микротопография сопрягаемых поверхностей, а также их структура и механические свойства. Однако эти характеристики могут оказывать большое влияние на нагрузочную способность составного изделия.

Цель настоящей работы – разработка усовершенствованной методики компьютерного моделирования процесса сборки тепловым способом бандажированных прокатных валков, позволяющей учитывать микротопографию и механические свойства сопрягаемых поверхностей.

Теория, материалы и методы исследования

Процесс проектирования сборки деталей типа вал-втулка может производиться посредством конечно-элементного (КЭ) компьютерного моделирования. Однако размеры оси валка и бандаж слишком велики, и учет влияния элементов микротопографии контактирующих поверхностей и её структурных составляющих, соизмеримых с размерами зерен, в таких моделях технически затруднен.

В последнее время в материалообработке все чаще предпочтение отдается мультимасштабной схеме компьютерного моделирования, при которой компьютерная модель процесса состоит из нескольких отдельных взаимосвязанных субмоделей, отражающих поведение металла при деформировании на разных масштабных уровнях [7–12]. Макромодель строится на традиционном представлении металла в качестве изотропного материала, и она необходима для получения численных значений параметров НДС на макроуровне. Полученные в макромодели абсолютные показатели параметров НДС на каждом шаге расчета накладываются на микромодель, что

позволяет оперативно произвести расчет распределения параметров НДС в отдельных микроструктурных составляющих любой точки тела [13–15]. Применительно к задачам проектирования составных изделий данная методика позволит детально исследовать феноменологическую картину поведения микрорельефов контактирующих при сборке сопрягаемых поверхностей составных изделий. На **рис. 1** представлена концептуальная схема мультимасштабной модели сборки бандажированного валка.

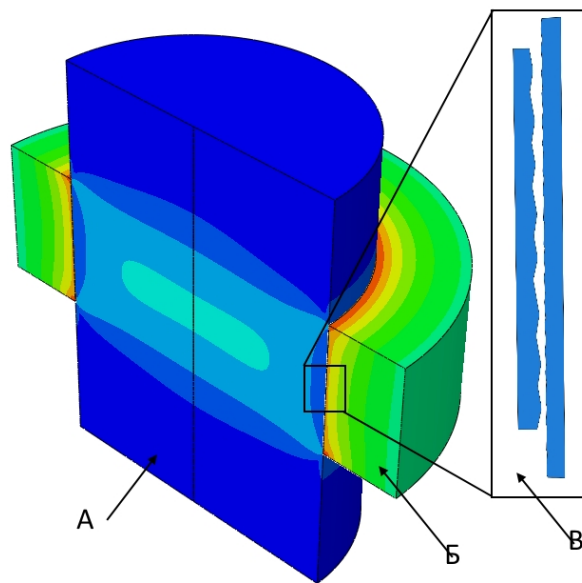


Рис. 1. Концептуальная схема мультимасштабной модели сборки бандажированного валка:
А – ось; Б – бандаж; В – зона контакта сопрягаемых поверхностей

Для создания мультимасштабной компьютерной модели процесса сборки прокатного валка необходимым условием является получение информации о микротопографии* контактирующих поверхностей до начала сборки. Требуется определить геометрические параметры шероховатости и распределение размерных параметров выступов и впадин микрорельефа. Исследование данных параметров должно проводиться по такому количеству трасс, которое позволяло бы сделать вывод о статистической достоверности выборки. Сбор информации о геометрических параметрах микротопографии и их распределении может осуществляться на опытных образцах. В качестве образца выбран ролик из стали 30, поверхность которого обработана лазером (нагрев на глубину более 50 мкм с оплавлением) (**рис. 2, а**).

* Исследование проводилось в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микротопография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на установке Contour GT K1 (Bruker).

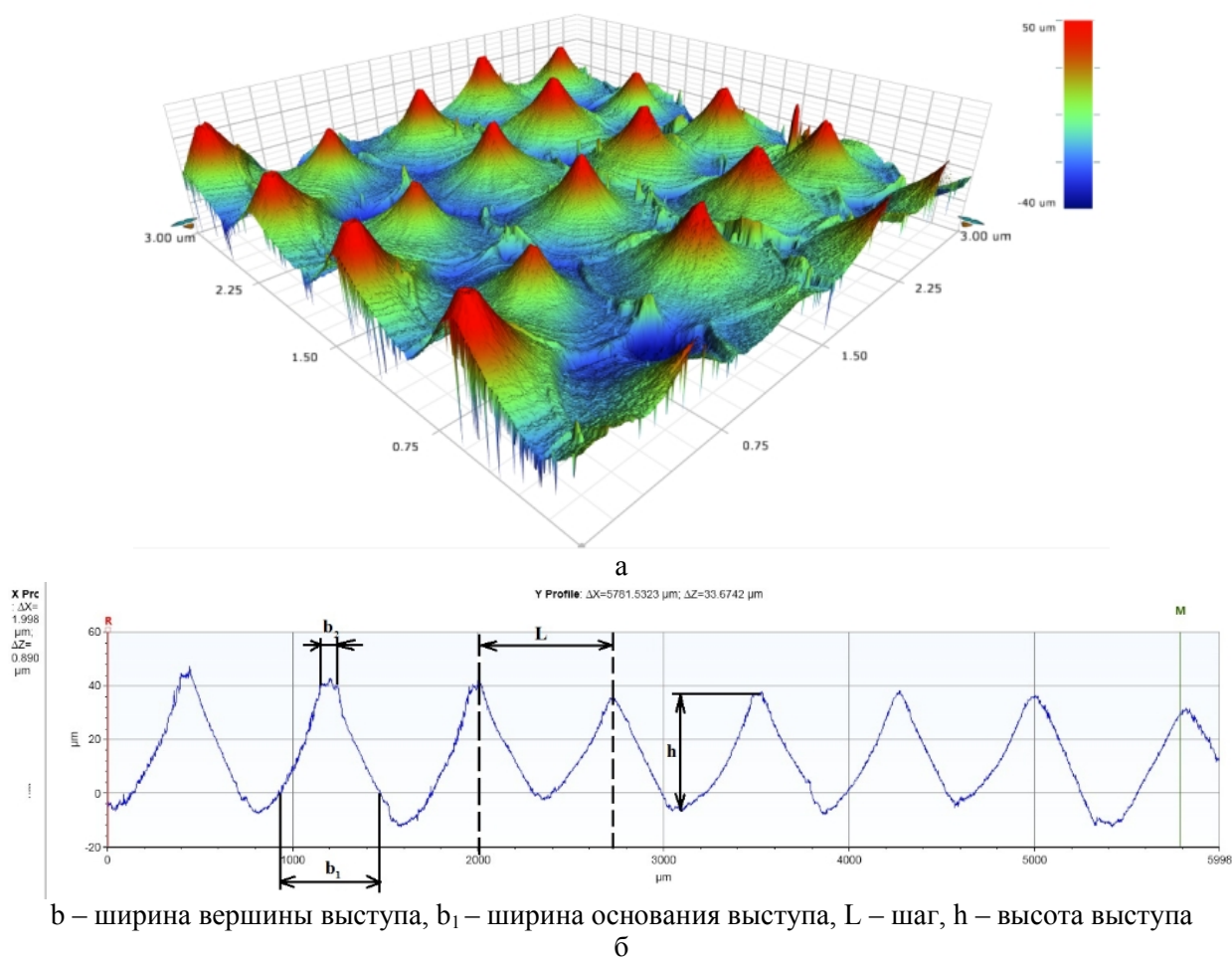


Рис. 2. Вид (а) и характеристики поверхности образца после обработки лазером (б)

Помимо исследований микротопографии (рис. 2, а, б) необходимы сведения о количественных параметрах микроструктуры* поверхностного слоя образца. Для построения макромодели сборки прокатного валка необходимо также учесть основные технологические параметры процесса: базовые геометрические параметры деталей, температурные и скоростные режимы.

Построение макромодели процесса сборки прокатного валка соответствует традиционно применяемой в области CAD/CAM методике.

В качестве программного комплекса для решения поставленной задачи использовался конечно-элементный пакет Abaqus. При помощи функции Partition face на геометрических моделях бандажа и оси создаются дополнительные сечения в областях, в которых будет исследоваться контакт микрорельефов.

Во вкладке Materials создается материал бандажа (сталь 150ХНМ) и оси (сталь марки

30). Минимальными и достаточными параметрами для описания материала будут MassDensity, Young's Modulus, Poisson'sRatio, Expansion, а также YieldStress и PlasticStrain. Уплотнение КЭ сетки (рис. 3) используется для повышения точности передачи данных об НДС и перемещении контрольных точек между уровнями мультимасштабной модели от макромодели к микромоделям.

Первым этапом построения микромоделей является создание геометрической модели участка микрорельефа на основании исследований микротопографии поверхности лабораторных образцов, а также их микроструктурного анализа. При построении микромоделей использованы результаты замеров микрорельефа: ширина вершины выступа 4 мкм, его основания 40 мкм, высота выступа 50 мкм. Основа образца состоит из ферритно-перлитной структуры с микротвердостью 2500 МПа. Выступы, образующиеся после лазерной обработки, имеют мартенситную структуру с микротвердостью 6500 МПа.

* Исследования проводились в Центре коллективного пользования НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

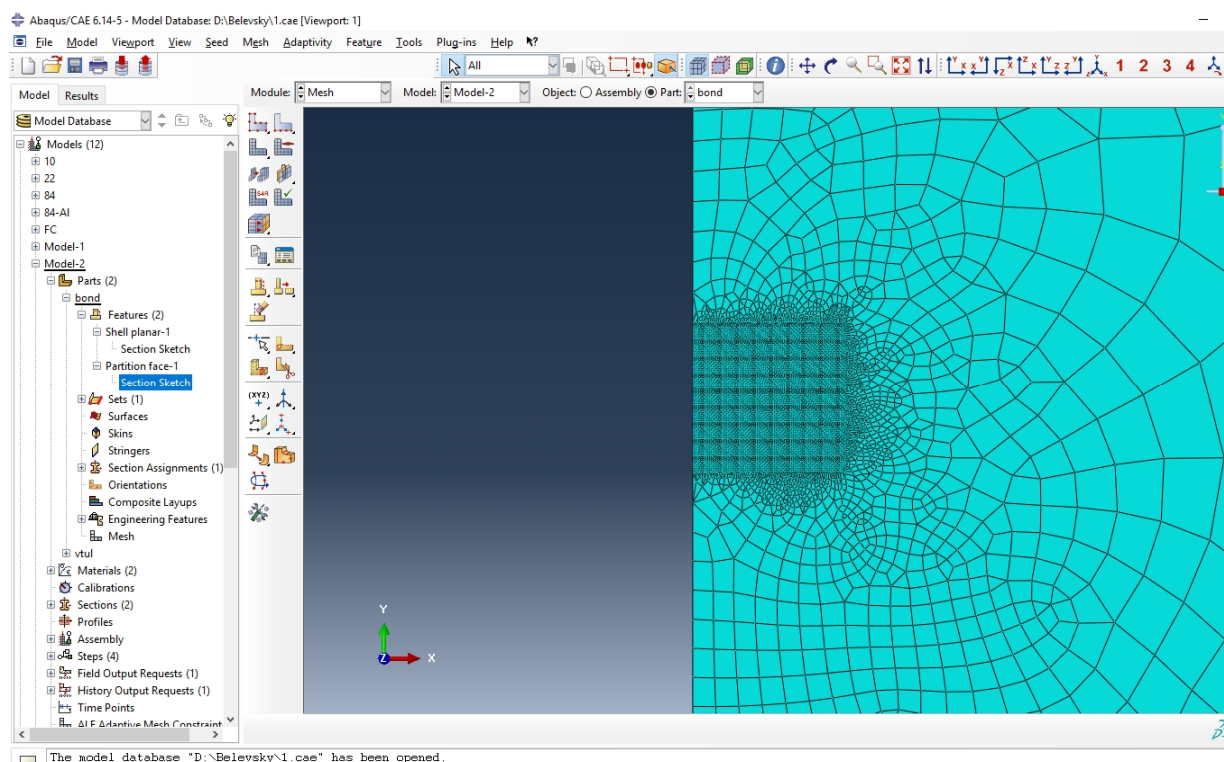


Рис. 3. Конечно-элементная сетка с уплотнением на поверхности контакта

Построенные геометрические модели участков микрорельефа наделяются свойствами соответствующих микроструктурных элементов. Далее посредством модуля Assembly данные участки микрорельефа позиционируются в местах с координатами, соответствующими уплотнениям сетки в макромодели. Заключительным этапом построения макромодели является задание граничных условий во вкладке BC (Boundaries Conditions).

Результаты исследования и их обсуждение*

На рис. 4 представлено распределение эквивалентных напряжений после остывания бандажа (моделировался нагрев бандажа перед сборкой до температуры 350°C). Из рисунка видно, что максимальные напряжения возникают по краям бандажа и в зоне соприкосновения оси и бандажа. На поверхности оси максимальные эквивалентные напряжения достигают 150–170 МПа, а на внутренней поверхности бандажа – 772–839 МПа.

После моделирования процесса охлаждения бандажа величина натяга составила 0.86 мм. Распределение эквивалентных напряжений в собранной конструкции представлено на рис. 5.

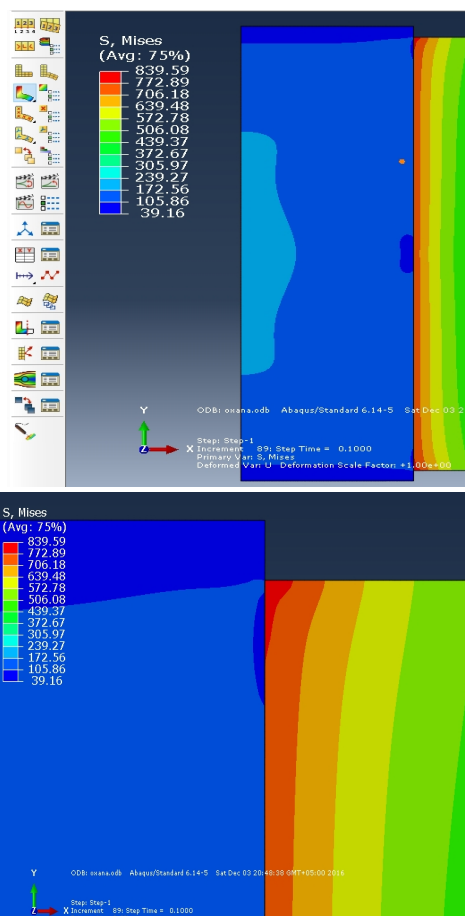


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) после остывания бандажа

* В работе принимала участие Коттелова О.С.

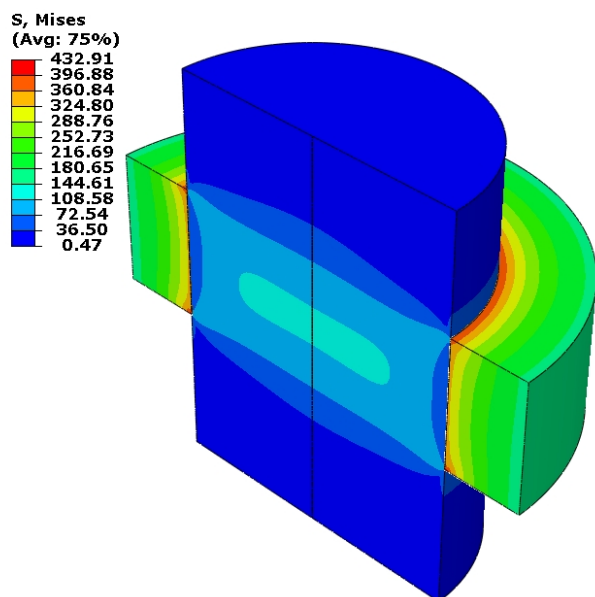


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в валке после сборки

Распределение осевых напряжений в поверхностных слоях сопрягаемых поверхностей оси и бандажа показано на рис. 6, а. Максимальные напряжения (до 2190 МПа) возникают в области микронеровностей поверхности оси, которая

упрочнена лазерной обработкой. Распределение осевых деформаций в направлении оси У (рис. 6, б) позволяет предположить, что наибольшее сопротивление сдвигу будет при наличии на поверхности оси максимально высоких выступов микрорельефа, так как они наиболее интенсивно деформируют микрорельеф внутренней части бандажа. На рис. 6, в представлено распределение эквивалентных напряжений на поверхности контакта. Из рисунка видно, что максимальные напряжения возникают на вершинах микровыступов.

Очевидно, что такой микрорельеф будет иметь большую площадь контакта с участками микрорельефа бандажа при их пластическом деформировании в процессе внедрения в бандаж более твердых выступов на поверхности оси.

На основании результатов моделирования было установлено, что максимально высокий и острый выступ микрорельефа оси оказывается окруженным упрочненными (а значит, более твердыми) областями микрорельефа бандажа, что способствует повышению несущей способности соединения.

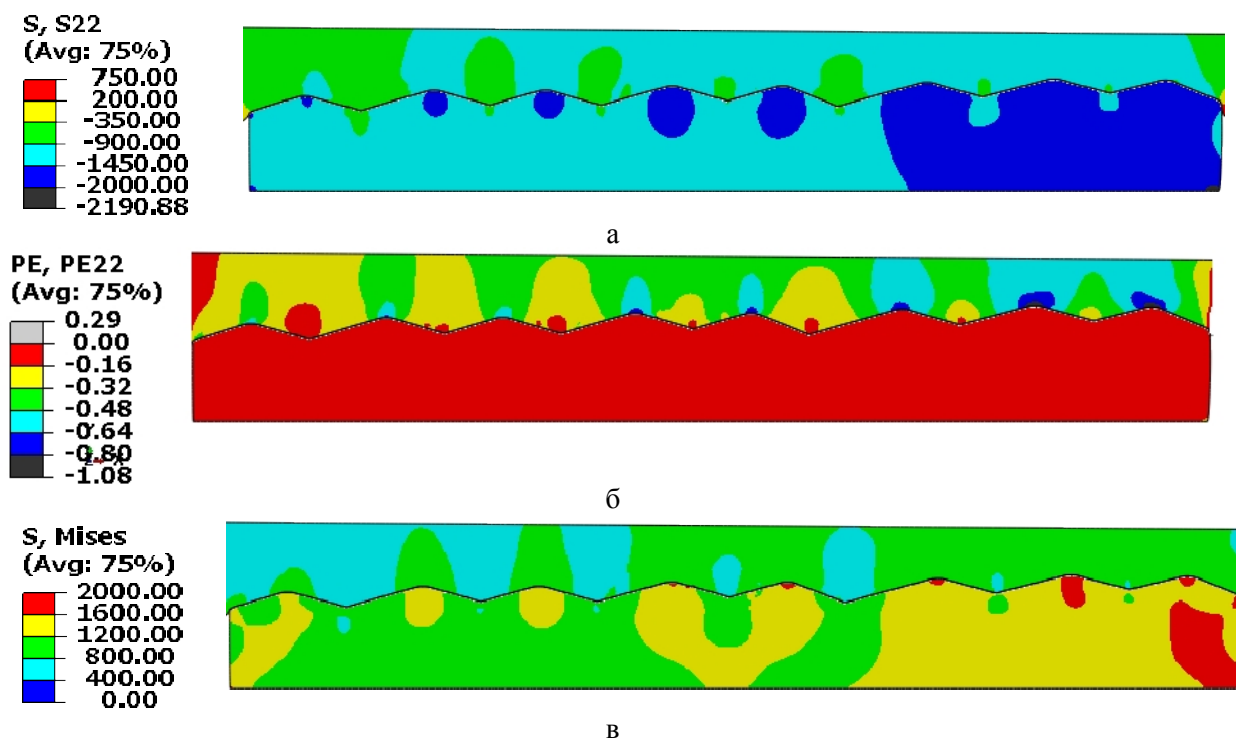


Рис. 6. НДС зоны контакта сопрягаемых поверхностей (участок микрорельефа бандажа сверху, оси – снизу): а – распределение осевых напряжений в направлении оси У; б – распределение осевых деформаций в направлении оси У; в – распределение эквивалентных напряжений

Заключение

1. Разработана усовершенствованная методика компьютерного моделирования процесса сборки бандажированных прокатных валков, позволяющая производить учет феноменологического поведения микрорельефа контактирующих поверхностей.

2. Первичная апробация данной методики позволила получить информацию о динамике изменения напряженно-деформированного состояния на уровне микротопографии контактирующих поверхностей.

3. Применения данного подхода к построению компьютерных моделей сборки и эксплуатации металлургического оборудования позволит расширить классическую теорию конструирования составных крупногабаритных изделий.

Список литературы

1. Прочность прокатных валков / П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др. Алма-Ата: Наука, 1984. 295 с.
2. Составные прокатные валки: Монография / Л.С. Белевский, А.Ю. Фиркович, И.В. Судоргин и др. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 206 с.
3. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. СПб.: НИУ ИТМО. 2013. 103 с.
4. Грешищев Е.С., Ильященко А.А. Соединение с натягом. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
5. Лебедь В.Т. Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. С. 181–184.
6. Алехин А.Г. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом на основе лазерной закалки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград. 2004. 18 с.
7. J. Kusiak, D. Szeliga, L. Sztangret. Modelling techniques for optimizing metal forming processes // *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. 2012. P. 35–66.
8. M.H.A. Bonte, A.H. Van Den Boogaard, J. Huétink. A metamodel based optimisation algorithm for metal forming processes // *Advanced Methods in Material Forming*. 2007. P. 55–72.
9. K. Saanouni, P. Devalan. *Damage Mechanics in Metal Forming: Advanced Modeling and Numerical Simulation*. Springer, 2013. 523 p.
10. E.A. De Souza Neto, D. Perić, D.R.J. Owen. *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 791 p.
11. Bertram, G. Risy, T. Böhlke. On different strategies for micro-macro simulations of metal forming // *Micro-Macro-interaction: In Structured media and Particle Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. P. 33–39.
12. R. De Borst. Challenges in computational materials science, multiple scales, multiphysics and evolving discontinuities // *Computational Material Science*. 2008. № 43. P. 1–15.
13. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. №1. С. 36–43.
14. Корчунов А.Г., Константинов Д.В. К вопросу воссоздания реального структурно-фазового состава металла при моделировании процессов ОМД // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2014. № 1. С. 117–121.
15. Моделирование процессов осесимметричного деформирования с учетом микроструктуры металла / Константинов Д.В., Бзовски К., Корчунов А.Г. и др. // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2015. №4. С. 897–908.

Поступила 03.04.17.

Принята в печать 15.05.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-94-100>

MODELING OF THE STRESS STATE OF A COMPOSITE MILL ROLL DURING ASSEMBLY

Irina V. Belevskaya – Senior Lecturer

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: belirena@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9931-4349>

Alexey G. Korchunov – D.Sc. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Affairs

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: international@magtu.ru

Dmitry V. Konstantinov – Ph.D. (Eng.)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: magstu.international@gmail.com

Krzysztof Bzowski – Postgraduate Student

AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland. E-mail: kbzowski@agh.edu.pl

Leonid S. Belevskiy – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: l.belevskiy@mail.ru

Sergei A. Fedoseev – D.Sc. (Eng.), Professor

Perm State National Research Polytechnic University, Russia. E-mail: fsa@gelicon.biz

Abstract

Problem Statement (Relevance): When determining the load capacity of large size pressure couplings it seems to be a common practice to only account for the friction factor while overlooking the microtopography of mating surfaces or their structure or mechanical properties. However, in the case of composite mill rolls these characteristics may have a considerable im-

act on the load capacity, the stress-strain state, the durability and, what is particularly essential, the quality of rolled products. **Objectives:** The authors aimed to improve the modelling technique used to simulate the hot assembly of composite mill rolls by introducing the capability to account for the microtopography and the mechanical properties of mated surfaces. **Methods Applied:** Finite-element modelling technique

is applied for simulation of the shaft-bushing assembly. The process model consists of several interrelated submodels that simulate the behaviour of metal during deformation at different scale. The macro model represents the metal as an isotropic material. It is used to obtain the values of the stress-strain state parameters on a macro level. The absolute values of the stress-strain state parameters produced by the macro model are superimposed on the micro model at each step, due to which one can simulate the distribution of the stress-strain state parameters in separate microstructural components in any point of the roll body. A steel roll made of steel 30 with laser-hardened surface (the depth of the heated area is 50 μm , with fusion applied) was used to collect microtopographic data. In addition to the microtopographic studies, the quantitative parameters of the surface layer microstructure were obtained and the key process parameters (such as the geometry of the parts, the temperature and the speeds) taken into account. **Originality:** The simulation helped obtain a picture showing the distribution of equivalent stresses after the roll sleeve has cooled down (the simulation roll sleeve was heated up 350°C before the assembly). The maximum stresses occur at the edges of the sleeve and at the contact area. The maximum equivalent stresses registered were 150-170 MPa on the roll surface and 772-839 MPa on the inside of the sleeve. The maximum stresses occur around the microwaves found on the roll surface after laser hardening with the stress level reaching 2190 MPa. **Practical Relevance:** Through validation of this method the authors were able to obtain data on the dynamics of changing stress-strain state at a microtopographic scale. The application of this approach for computer simulation of the assembly and operation of metallurgical equipment can help expand the classical design theory applicable to large size composite parts.

Keywords: Composite mill roll, computer modeling, assembly, microtopography, surface, laser hardening, stress.

References

1. Polukhin P.I., Nikolaev V.A., Polukhin V.P. et al. *Prochnost' prokatnykh valkov* [Durability of mill rolls]. Alma-Ata: Nauka, 1984. 295 p. (In Russ.)
2. Belevskiy L.S., Firkovich A.Yu., Sudorgin I.V. et al. *Sostavnye prokatnye valki: Monografiya* [Composite mill rolls: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004. 206 p. (In Russ.)
3. Veyko V.P., Smimov V.N., Chirkov A.M. *Lazemaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii* [Laser cleaning in machine building and instrument industries]. St. Petersburg: ITMO, 2013. 103 p. (In Russ.)
4. Grechishchev E.S., Ilyashchenko A.A. *Soedinenie s natyagom* [Pressure coupling]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 247 p. (In Russ.)
5. Lebed V.T. *Povyshenie kachestva soedineniya krupnogabaritnykh sostavnykh izdeliy* [Improved quality of couplings in large size composite products]. Kharkov: NTU "KhPI", 2015, pp. 181–184.
6. Alekhin A.G. *Povyshenie nagruzochnoy sposobnosti soedineniy s natyagom na osnove lazernoy zakalki: Avtoref. dis. k-ta tekhn. nauk* [Enhancing the load carrying capacity of pressure coupling by laser hardening: Extended abstract Ph.D. dissertation]. Volgograd, 2004. 18 p. (In Russ.)
7. J. Kusiak, D.Szeliga, L. Sztangret. Modelling techniques for optimizing metal forming processes. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. 2012, pp. 35–66.
8. M.H.A. Bonte, A.H. Van Den Boogaard, J. Huétink. A metamodel based optimisation algorithm for metal forming processes. *Advanced Methods in Material Forming*. 2007, pp. 55–72.
9. K. Saanouni, P. Devalan. *Damage Mechanics in Metal Forming: Advanced Modeling and Numerical Simulation*. Springer, 2013. 523 p.
10. E.A. De Souza Neto, D. Perić, D.R.J. Owen. *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 791 p.
11. A. Bertram, G. Risy, T. Böhlke. On different strategies for micro-macro simulations of metal forming. *Micro-Macro-interaction: In Structured media and Particle Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 33–39.
12. R. De Borst. Challenges in computational materials science, multiple scales, multiphysics and evolving discontinuities. *Computational Material Science*. 2008, no. 43, pp. 1–15.
13. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. Multi-scale computer simulation of metal forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no.1 (49), pp. 36–43. (In Russ.)
14. Korchunov A.G., Konstantinov D.V. On reconstruction of a real metal microstructure in metal forming processes simulation. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Important problems of modern science, technology and education], 2014, no. 1, pp. 117–121. (In Russ.)
15. Konstantinov D.V., Bzowski K., Korchunov A.G., Pietrzyk M. Modeling of axisymmetric deformation processes allowing for the metal microstructure. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling], 2015, no. 4, pp. 897–908. (In Russ.)

Received 03/04/17

Accepted 15/05/17

Образец для цитирования

Моделирование напряженного состояния составного прокатного вала при сборке / Белевская И.В., Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Бзовски К., Белевский Л.С., Федосеев С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №2. С. 94–100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-94-100>

For citation

Belevskaya I.V., Korchunov A.G., Konstantinov D.V., Krzysztof B., Belevskiy L.S., Fedoseev S.A. Modeling of the stress state of a composite mill roll during assembly. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 94–100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-94-100>