



УДК 621.771.073

А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов,
Т.В. Швейва, А.Э. Новоселов
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: pesin@bk.ru
Дата поступления 28.10.2018

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ ВАЛКОВ СТАНА АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ДУО-400

Аннотация

Разработана методика компьютерного моделирования трехмерного напряженно-деформированного состояния (НДС) материала рабочих валков с использованием САД/САЕ-систем КОМПАС 3D и DEFORM 3D. Методика позволяет на стадии проектирования конструкции рабочих валков оценить ресурс их прочности. Представлены результаты расчета НДС рабочих валков из стали 9Х2, предназначенных для опытно-экспериментального стана асимметричной прокатки ДУО-400 с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН и крутящими моментами 2×70 кНм. Показано, что для более точного описания НДС материала рабочих валков при симметричной или асимметричной прокатке необходимо учитывать обе прикладываемые нагрузки: силу P , действующую на рабочий валок со стороны прокатываемого листа (полосы), и крутящий момент $M_{кр}$, действующий со стороны главного привода.

Ключевые слова: асимметричная прокатка, рабочий валок, напряженно-деформированное состояние, моделирование, САД/САЕ, метод конечных элементов.

Введение

Перспективными способами наноструктурирования металлических материалов являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), которые относятся к современным и развивающимся методам обработки металлов давлением [1]. Однако существующие методы ИПД, например, такие как равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением и другие характеризуются рядом конструктивно-технологических недостатков, ограничивающих возможности их широкого промышленного применения. Среди таких недостатков следует отметить, прежде всего, малые размеры получаемых полуфабрикатов, низкую технологичность деформирования, и, как следствие, существенные ограничения по производительности и экономической целесообразности использования таких технологий [2]. В последние годы методы ИПД получили новый импульс развития. Это выразилось в разработке новых специальных способов прокатки, обеспечивающих достижение

больших пластических деформаций в длиннономерных объемных и плоских заготовках [3-4]. Одним из таких способов является процесс асимметричной тонколистовой прокатки, основанный на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования окружных скоростей рабочих валков [5-8]. При асимметричной прокатке деформированное состояние металла описывается тензором, учитывающим все составляющие деформации: линейные, угловые и поворотные. Поворотная деформация и сдвиги обеспечивают немонотонность течения металла и значительное приращение интенсивности деформации, что является отличительной особенностью процесса асимметричной прокатки как метода ИПД. Однако практическая реализация этой технологии невозможна без решения характерных задач: расчета силовых параметров процесса, проектирования и изготовления деформирующего инструмента и т.д.

Выполненные ранее исследования показали [9-10], что целенаправленно создаваемая кинематическая асимметрия очага

деформации приводит к кардинальному изменению эпюры распределения нормальных напряжений на контакте рабочих валков и листа (полосы), и, как следствие, существенно влияет на силовые параметры процесса. Установлено [9-10], что особенностью силовых параметров процесса асимметричной прокатки в режиме ИПД является значительное снижение (в 2...3 раза) силы деформирования в сравнении с обычной прокаткой при прочих равных условиях. Однако при этом существенно возрастают моменты прокатки: до 3,5 раз – на валке, вращающемся с большей скоростью, и до 2,5 раз – на валке, вращающемся с меньшей скоростью. Существующие лабораторные прокатные станы (не только в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Носова», но и в любых других научных лабораториях, институтах и университетах РФ) не отвечают необходимым техническим требованиям для реализации технологий асимметричной прокатки в режиме ИПД. Поэтому на основе научного задела, сформированного коллективом под руководством Песина А.М. в рамках выполнения проекта №15-19-10030 Российского научного фонда (2015-2017 гг.) планируется спроектировать и изготовить не имеющий аналогов в РФ опытно-экспериментальный двухвалковый стан асимметричной прокатки с номинальным диаметром рабочих валков 360 мм, длиной бочки 400 мм, максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН (250 тс) и крутящими моментами 2×70 кНм, что обеспечит возможность получения и испытания опытных образцов металлических наноматериалов толщиной 0,4...0,8 мм.

Поскольку при асимметричной прокатке (в сравнении с обычной) рабочие валки, как деформирующий инструмент, подвергаются повышенным нагрузкам, то на этапе проектирования требуется более

детальный анализ их напряженно-деформированного состояния (НДС), в особенности в трехмерной постановке задачи. Целью данной работы является разработка методики компьютерного моделирования и анализ трехмерного НДС материала рабочих валков стана асимметричной прокатки ДУО-400 с использованием CAD/CAE-систем КОМПАС 3D и DEFORM 3D.

Основная часть

Моделирование и анализ трехмерного НДС материала рабочих валков стана асимметричной прокатки ДУО-400 проводили методом конечных элементов с использованием инженерного программного комплекса DEFORM 3D. Геометрическую CAD-модель рабочего валка строили с использованием КОМПАС 3D. В ходе численных расчетов определяли максимальные главные растягивающие напряжения, возникающие в конструкции рабочего валка, и сравнивали эти напряжения с допустимыми значениями. В качестве материала рабочих валков рассматривали сталь 9Х2 с величиной временного сопротивления разрыву 680 МПа. С учетом 5-кратного запаса прочности, принимаемого при конструировании рабочего валка, за допустимое принимали напряжение $[\sigma] = 136$ МПа. В ходе расчетов анализировали также величину прогиба образующей бочки валка под действием прикладываемых нагрузок. Реологическая модель материала валка – упругая среда. Модуль Юнга $E = 206,754$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Основные размеры рабочего валка представлены на рисунке 1. Это упрощенная геометрическая модель без учета концевых отверстий, конструктивных фасок и скруглений, за исключением галтели R40 в области перехода бочки в шейку, а также скруглений R10 в области приводного конца, выполненного с двумя лысками (рисунок 1).

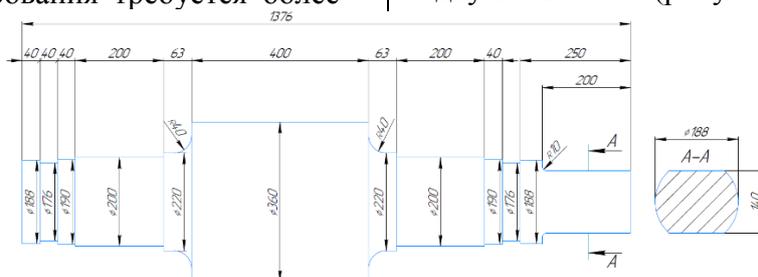


Рисунок 1. Основные размеры рабочего валка

Трехмерная CAD-модель рабочего вала показана на рисунке 2. Поскольку рабочая клеть стана асимметричной прокатки ДУО-400 должна быть рассчитана на максимальное усилие прокатки 2500 кН, то в качестве опор для рабочих валков выбраны четырехрядные конические роликоподшипники №77140 по ГОСТ 8419-75 со следующими характеристиками: внутренний диаметр подшипника 200 мм; наружный диаметр 310 мм; высота 200 мм; динамическая грузоподъемность 1250 кН. CAD-модель сборки, включающей рабочий валок с двумя подшипниками качения и полумуфтой на приводном конце, показана на рисунке 3.

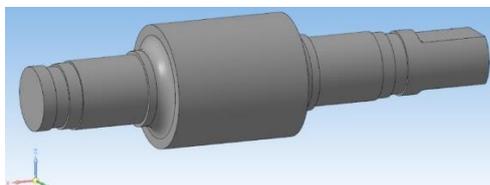


Рисунок 2. CAD-модель рабочего вала

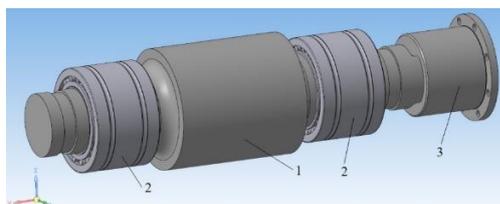


Рисунок 3. CAD-модель сборки:
1 – рабочий валок; 2 – подшипники;
3 – полумуфта

На рисунке 4 представлена САЕ-модель для расчета НДС методом конечных элементов с использованием DEFORM 3D. Во всех вариантах расчета упругий валок разбивался на 230 000...270 000 конечных элементов с коэффициентом сгущения 1:3. Подшипники и полумуфта принимались абсолютно жесткими (недеформируемыми). Рассматривали два варианта приложения нагрузок: 1) простое нагружение вала только силой $P = 2500$ кН; 2) сложное нагружение вала силой $P = 2500$ кН и крутящим моментом $M_{кр}$ от 20 до 70 кНм. Граничные условия задавали следующим образом. Силу $P = 2500$ кН прикладывали к бочке вала через прокатываемый лист (полосу) шириной 300 мм, начальной толщиной 1,0 мм и конечной толщиной 0,5 мм,

что соответствовало относительному обжатю 50%. При этом лист задавали с учетом формы контактной поверхности «лист-валок» в очаге деформации ($l_d = \sqrt{R\Delta h} = 9,49$ мм) (рисунок 5). Лист принимали абсолютно жестким. Конкретные размеры листа определяют только геометрию контактной поверхности, через которую передается нагрузка на валок, и принципиально могут быть любыми, но соответствующими размерному сортаменту стана. Крутящий момент $M_{кр}$ прикладывали к приводному концу вала через полумуфту (рисунок 4).

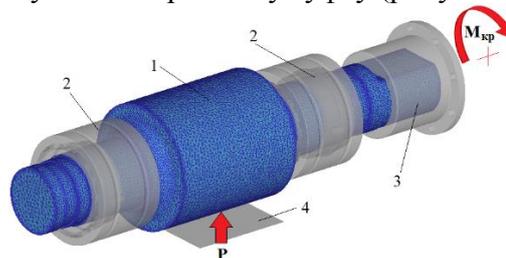


Рисунок 4. САЕ-модель для расчета НДС:
1 – рабочий валок; 2 – подшипники;
3 – полумуфта;
4 – прокатываемый лист (полоса)

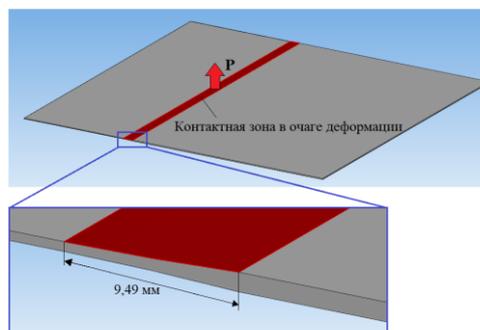


Рисунок 5. К определению граничных условий при задании силы P , действующей на рабочий валок со стороны прокатываемого листа (полосы)

В расчетах сравнивали два режима прокатки: симметричный и асимметричный. В обоих случаях валок нагружали максимальной силой $P = 2500$ кН. Отличие первого режима от второго заключалось только в величине прикладываемых крутящих моментов. При симметричном режиме максимальный крутящий момент составлял 20 кНм и был одинаковым для верхнего и нижнего рабочего вала. Ранее в предыдущих работах было установлено, что при асимметричном режиме прокатки крутя-

щий момент на валке, вращающемся с большей скоростью, возрастает до 3,5 раз, а крутящий момент на валке, вращающемся с меньшей скоростью, возрастает до 2,5 раз в сравнении с обычным симметричным режимом при прочих равных условиях. С учетом этого, для имитации асимметричного режима первый валок (верхний) нагружали максимальным крутящим моментом 70 кНм, а второй валок (нижний) нагружали максимальным крутящим моментом 50 кНм.

Результаты расчета НДС для симметричного и асимметричного режимов прокатки показали, что максимальные главные растягивающие напряжения в материале рабочих валков в обоих случаях концентрируются в области перехода бочки в шейку валка, однако, при этом они соответствуют допустимому уровню $[\sigma] = 136$ МПа (рисунок 6). При асимметричном режиме прокатки опасные напряжения дополнительно концентрируются в области приводного конца, что объясняется повышенным уровнем прикладываемых крутящих моментов.

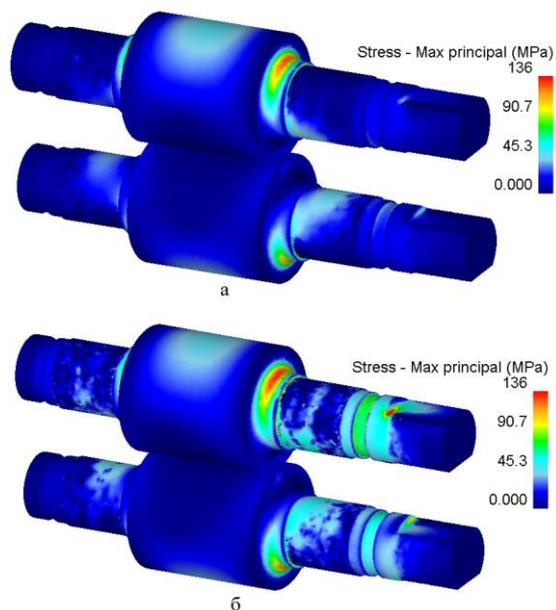


Рисунок 6. Поле главных растягивающих напряжений двухвалковой системы при сложном нагружении силой $P=2500$ кН и крутящими моментами $M_{кр}$: а – при симметричной прокатке ($M_{кр} = 2 \times 20$ кНм); б – при асимметричной прокатке ($M_{кр} = 70$ кНм и 50 кНм)

Соответствие максимальных главных растягивающих напряжений в материале

рабочих валков допустимому уровню свидетельствует о корректном выборе геометрических размеров рабочего валка для стана асимметричной прокатки ДУО-400.

Для оценки вклада каждого типа нагрузки в общую картину НДС сравнивали два варианта: простое нагружение валка только силой P , и сложное нагружение валка силой P и крутящим моментом $M_{кр}$. Результаты расчета показали, что НДС в области перехода бочки в шейку валка определяется только силой P . Поля главных напряжений в этой области и при простом, и при сложном нагружении выглядят практически одинаково (рисунок 7).

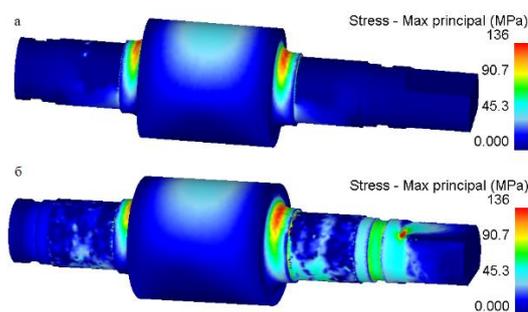


Рисунок 7. Поле главных растягивающих напряжений в материале рабочего валка: а – при простом нагружении только силой $P=2500$ кН; б – при сложном нагружении силой $P=2500$ кН и крутящим моментом $M_{кр}=70$ кНм

Высокий крутящий момент приводит к концентрации растягивающих напряжений на приводном конце рабочего валка. Причем напряжения концентрируются в области скруглений $R10$ на верхней (слева) и нижней (справа) поверхностях (рисунок 8) (показано стрелками). Крутящий момент здесь приложен по направлению против часовой стрелки, если смотреть со стороны приводного конца.

Выполнен также анализ влияния радиуса галтели на концентрацию растягивающих напряжений в области перехода бочки в шейку. Результаты расчета показали, что с уменьшением радиуса от 40 мм до 16 мм главные растягивающие напряжения в этой области возрастают с 136 МПа до 179 МПа, а при отсутствии галтели – до 185 МПа (рисунок 9), т.е. превышают допустимый уровень 136 МПа.

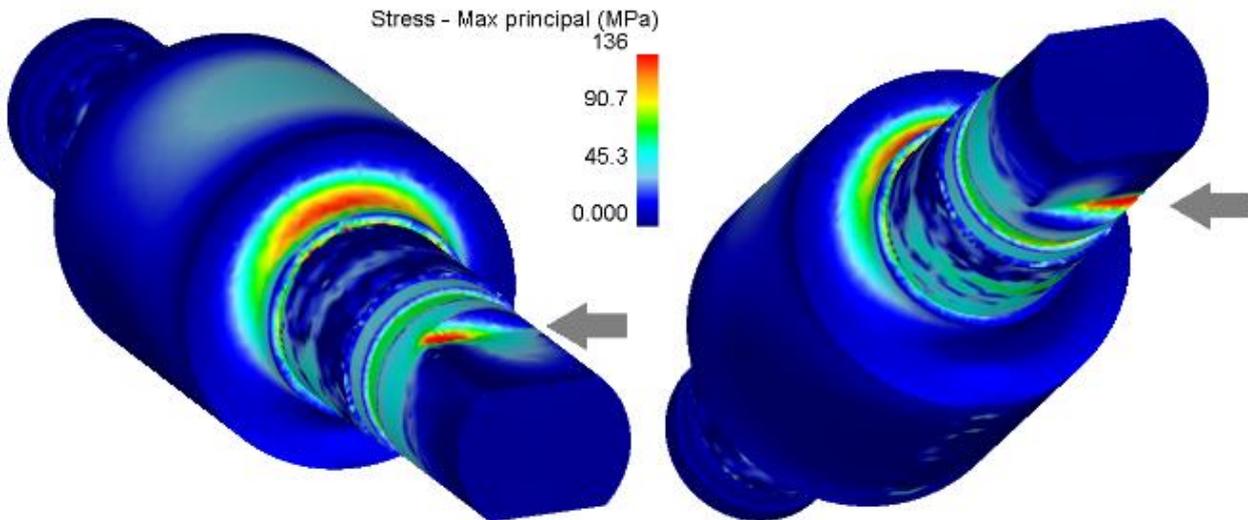


Рисунок 8. Концентрация растягивающих напряжений на приводном конце верхнего рабочего вала (показано стрелками с верхней и нижней стороны) при асимметричной прокатке с силой $P=2500$ кН и крутящим моментом $M_{кр}=70$ кНм

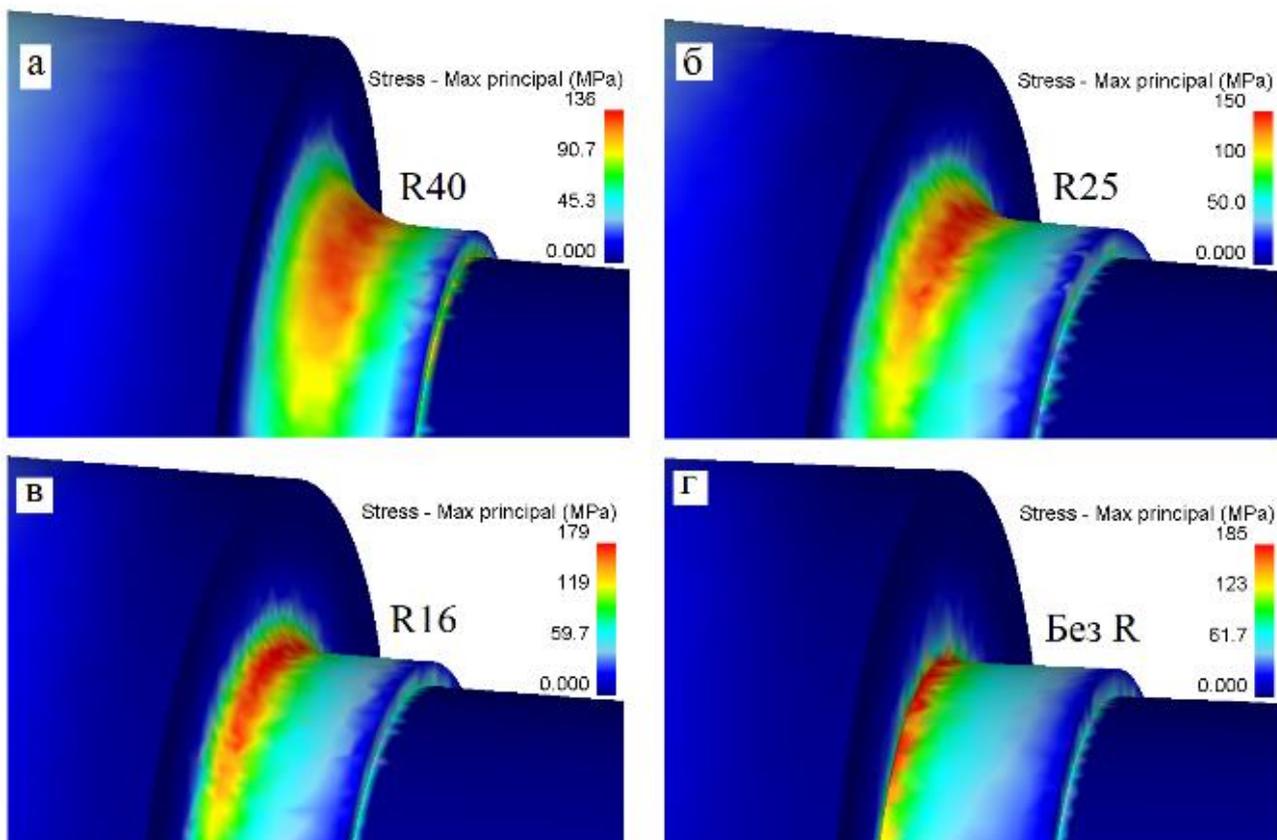


Рисунок 9. Концентрация растягивающих напряжений в области перехода бочки в шейку: а – галтель R40; б – галтель R25; в – галтель R16; г – без галтели

Результаты расчета величины прогиба образующей бочки рабочего вала при прокатке листа показали, что при сложном нагружении вала силой $P = 2500$ кН и крутящим моментом $M_{кр} = 70$ кНм величина прогиба снижается в сравнении с простым

нагружением вала только силой $P = 2500$ кН (рисунки 10-11).

Проанализировали также влияние ширины прокатываемого листа (полосы) на величину прогиба образующей бочки вала при нагружении его постоянной силой $P = 2500$ кН. Результаты расчета показали,

что с уменьшением ширины листа (полосы) с 300 мм до 50 мм при постоянной интегральной нагрузке $P = 2500$ кН максимальный прогиб образующей бочки рабочего валка возрастает с 0,18 мм до 0,39 мм (рисунок 12).

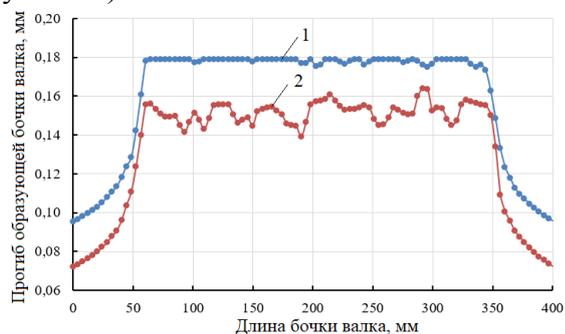


Рисунок 10. Прогиб образующей бочки валка при прокатке листа шириной 300 мм: 1 – простое нагружение силой $P = 2500$ кН; 2 – сложное нагружение силой $P = 2500$ кН и $M_{кр} = 70$ кНм

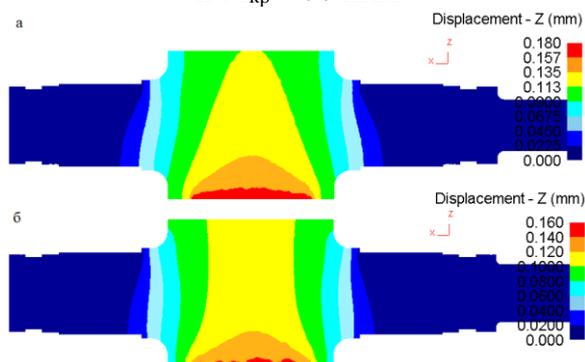


Рисунок 11. Поле перемещений в направлении оси Z: 1 – простое нагружение валка только силой $P = 2500$ кН; 2 – сложное нагружение валка силой $P = 2500$ кН и $M_{кр} = 70$ кНм

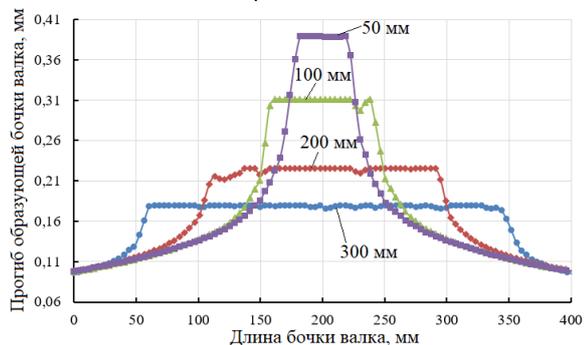


Рисунок 12. Влияние ширины прокатываемого листа (полосы) на величину прогиба образующей бочки рабочего валка (простое нагружение силой $P = 2500$ кН)

Заключение

Представлена методика компьютерного моделирования трехмерного НДС материала рабочих валков с использованием CAD/CAE-систем КОМПАС 3D и DEFORM 3D. Результаты расчета НДС для симметричного и асимметричного режимов прокатки показали, что максимальные главные растягивающие напряжения в материале рабочих валков в обоих случаях концентрируются в области перехода бочки в шейку валка, однако, при этом с учетом 5-кратного запаса прочности соответствуют допустимому уровню $[\sigma] = 136$ МПа. При асимметричном режиме прокатки опасные напряжения дополнительно концентрируются в области приводного конца, что объясняется повышенным уровнем прикладываемых крутящих моментов. Результаты выполненных расчетов также показали, что для более точного описания величины прогиба образующей бочки рабочего валка при прокатке необходимо учитывать обе прикладываемые нагрузки: силу P и крутящий момент $M_{кр}$. При сложном нагружении валка силой P и крутящим моментом $M_{кр}$ расчетная величина прогиба снижается в сравнении с простым нагружением валка только силой P . Выполненный анализ полей максимальных главных растягивающих напряжений подтвердил корректность выбора основных геометрических размеров рабочих валков из стали 9Х2, предназначенных для опытно-экспериментального стана асимметричной прокатки ДУО-400 с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН и крутящими моментами 2×70 кНм.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10030)

Библиографический список

1. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Уфа: Гилем. 2013. 375 с.
2. Перспективы использования методов ИПД для получения высокопрочных ме-

- таллических материалов в промышленных масштабах / Рааб Г.И. // Сб. материалов IV межд. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН. 2011. С. 205-206.
3. Галкин С.П. Траекторно-скоростные особенности радиально-сдвиговой и винтовой прокатки // Современные проблемы металлургии. 2008. Т. 11. С. 26-33.
 4. Yu H., Lu C., Tieu K., Li H., Godbole A., Zhang S. Special Rolling Techniques for Improvement of Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Metal Sheets: A Review // *Advanced Engineering Materials*. 2015. P. 1-16.
 5. Ji Y.H., Park J.J. Development of Severe Plastic Deformation by Various Asymmetric Rolling Processes // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. V. 499. No 1. P. 14-17.
 6. Ji Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite Element Analysis of Severe Deformation in Mg-3Al-1Zn Sheets through Differential-Speed Rolling with a High Speed Ratio // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. V. 454. P. 570-574.
 7. Kim W.J., Yoo S.J., Lee J.B. Microstructure and Mechanical Properties of Pure Ti Processed by High-Ratio Differential Speed Rolling at Room Temperature // *Scripta Materialia*. 2010. V. 62. No 7. P. 451-454.
 8. Li Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio // *Materials Science and Engineering: A*. 2007. V. 454. P. 570-574.
 9. Анализ силовых параметров процесса асимметричной листовой прокатки алюминиевого сплава 5083 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К. // *Металлургия: технологии, инновации, качество. Часть 2. Труды XIX Международной научно-практической конференции*. 2015. С. 160-167.
 10. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации: монография / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Свердлов М.К. Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. 151 с.

Information about the paper in English

A. Pesin, D. Pustovoitov, T. Shveyova, A. Novoselov
 Nosov Magnitogorsk State Technical University
 Magnitogorsk, Russian Federation
 E-mail: pesin@bk.ru
 Received 28.10.2018

COMPUTER SIMULATION OF THE STRESS AND STRAIN STATE OF WORK ROLLS ON
 ASYMMETRICAL ROLLING MILL DUO 400

Abstract

The authors developed a procedure for computer simulation of the three-dimensional stress and strain state of the work roll material, using KOMPAS 3D and DEFORM 3D CAD/CAE systems. The procedure ensures the assessment of the work roll lifetime at a stage of designing their structure. The paper present calculations of the stress and strain state of 9Kh2 steel rolls used for pilot and experimental asymmetrical rolling mill duo 400 with a maximum allowed rolling force of 2500 kN and torques of 2×70 kNm. It is showed that to get a more accurate description of the stress and strain state of the work roll material during symmetrical or asymmetrical rolling, it is required to consider both acting loads: force P, acting on the work roll by rolled sheets (strips), and rotational torque Mrot, acting from a main drive.

Keywords: asymmetrical rolling, work roll, stress and strain state, simulation, CAD/CAE, finite-element method.