

Снитко С.А., канд. техн. наук (ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»), Калужный В.Л., д-р. техн. наук (НТУ Украины «Киевский политехнический институт»)

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

*Виконано постановку і реалізацію задачі кінцево-елементного моделювання багатоперехідного процесу деформування заготовок коліс на пресах і колесопрокатному стані стосовно до умов пресопрокатних ліній ВАТ «Інтерпайп - НТЗ» і ВАТ «ВМЗ». Отримані в системі DEFORM3D результати моделювання в цілому правильно відображають основні закономірності аналізованих процесів, встановлених в умовах промислового виробництва коліс.*

*The formulation and realization of the problem of finite-element modeling of multijunction deformation process wheels workpieces on the presses and wheel-mill to conditions press and roll lines of OJSC "Interpipe NTRP" and OJSC "Vyksunsky Metallurgical Plant" were completed. The simulation results obtained in the system DEFORM3D as a whole correctly reflect the basic laws of the analyzed processes, which have been defined in an industrial production of wheels.*

**Состояние вопроса.** Актуальным для современной теории колесопрокатного производства является создание методов проектирования технологии деформирования точных по массе (отличие заготовок по массе до 1%) заготовок колес, которые бы обеспечивали высокую точность прогноза формоизменения металла и силовых параметров процессов штамповки и прокатки заготовок. Решение данной проблемы требует изменения постановки соответствующих краевых задач и способов их реализации [1] в соответствии с техническими и технологическими особенностями производства колес на конкретной пресопрокатной линии.

В технической литературе приведены данные о результатах исследований процессов деформирования заготовок колес на прессах [2 – 5 и др.] и колесопрокатном стане [2 – 4] с использованием современных систем компьютерного моделирования, базирующихся на методе конечных элементов. Общим недостатком этих работ является то, что в них отсутствуют данные, наличие которых позволило бы говорить о полноте и адекватности математического описания основных закономерностей анализируемого многопереходного процесса деформирования заготовок колес. Отсутствуют исследовательские работы комплексного характера, которые бы с одной стороны включали моделирование основных формообразующих операций перед прокаткой заготовки, а также самой прокатки заготовки с учетом процессов теплообмена заготовки при транспортировке и деформировании, разупрочнения металла при горячей деформации, а с другой – базировались при создании и проверке адекватности конечно-элементных моделей на экспериментальной информации по температурно-скоростным и силовым параметрам производства колес в условиях промышленного производства. Создание таких конечно-элементных моделей и является целью настоящей работы.

**Постановка задачи моделирования.** В настоящей работе выполнена постановка задачи моделирования многопереходного процесса деформирования заготовок колес с последующей ее реализацией в системе DEFORM 3D, разработанной компанией Scientific Forming Technologies Corporation и предоставленной по временной лицензии компанией ТЕСИС.

Моделирование выполнено для нестационарного теплового режима заготовки, то есть с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой, как при деформации, так и во время междеформационных пауз, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации. Процесс теплообмена при этом описывался зависимостью следующего вида:

$$q = A \alpha (t_s - t_c), \quad (1)$$

где  $q$  – тепловой поток;

$A$  – площадь поверхности, на которой происходит теплообмен;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена;

$t_s, t_c$  – температура поверхности тела и окружающей среды соответственно.

Была принята постоянная температура окружающей среды и значение коэффициента  $\alpha$ . В этом случае для расчета процесса теплопередачи при транспортировке заготовки за счет излучения и вынужденной конвекции применимо граничное условие третьего рода [6], которое и использовали при моделировании.

В данной работе рассмотрена технология изготовления заготовок черновых колес  $\varnothing 957$  мм. Данные колеса изготавливают из колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791-2004). Используемые при моделировании теплофизические свойства колесной стали были взяты из базы данных DEFORM 3D для высокоуглеродистой стали.

При моделировании для заготовки использовали жесткопластическую модель материала. Для моделирования прессового инструмента и прокатных валков была выбрана жесткая недеформируемая модель материала.

Поведение материала заготовки в процессе решения описывалось с помощью диаграммы «истинное напряжение-деформация». В компьютерной программе напряжения и деформации, используемые в диаграмме «напряжение-деформация», — это эквивалентные напряжения или напряжения по Мизесу  $\sigma$  (уравнение (2)) и эквивалентные деформации  $\varepsilon$  (уравнение (3)):

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_x$   $\sigma_y$   $\sigma_z$  - осевые напряжения;

$\tau_{xy}$   $\tau_{yz}$   $\tau_{zx}$  - тангенциальные напряжения;

$\varepsilon_x$   $\varepsilon_y$   $\varepsilon_z$  - осевые деформации.

При моделировании использовалась концепция напряжения течения, в соответствии с которой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется из пошаговой суммы деформаций по кривой течения.

Соответствующие реологические кривые (рис. 1) в исследуемом диапазоне температур (1000 – 1260°C), необходимые для реализации процесса моделирования, были построены с использованием методик, изложенных в работах [7 – 10] и на основе процентного содержания элементов в стали, приведенного в табл. 1.

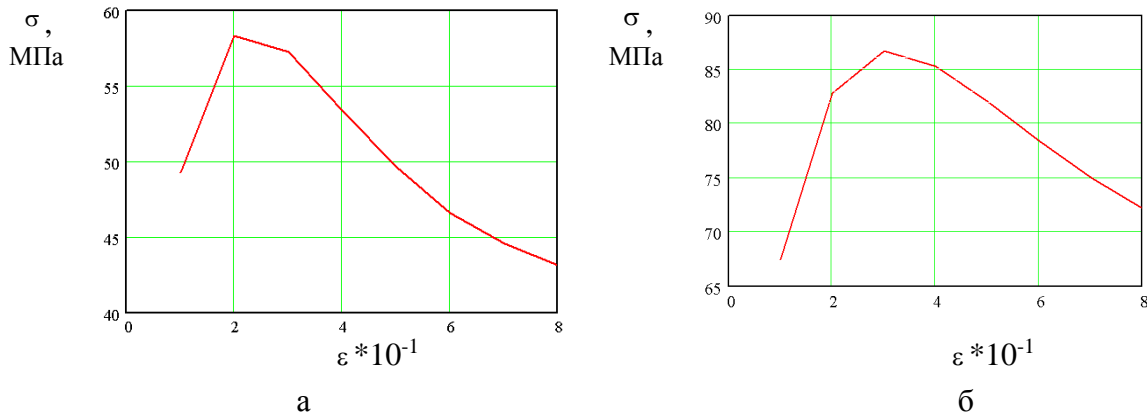


Рис. 1 – Кривые течения колесной стали марки 2 при температуре 1200°C: а – при  $\dot{\varepsilon} = 0,5\text{c}^{-1}$ ; б – при  $\dot{\varepsilon} = 10\text{c}^{-1}$ .

Таблица 1

Химический состав в % колесной стали марки 2

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.6	0.335	0.7	0.1	0.035	0.035	0.1	0.1

В качестве модели контактного трения принята сдвиговая модель трения:

$$\tau_{mp} = m * k, \quad (4)$$

где  $\tau_{mp}$  – напряжение трения;

$m$  – фактор трения;

$k$  – предел текучести материала заготовки на сдвиг.

Значения фактора трения выбрали для условий контактного взаимодействия заготовки со штамповой оснасткой при наличии технологической смазки ( $m = 0,3$ ). Для условий прокатки заготовок величину фактора трения назначали в соответствии с рекомендациями работы [11]. Среднее значение  $m$  при этом составило 0,8.

При моделировании был использован автоматический режим генерации конечно-элементной сетки. При этом достаточно корректно учитывалось условие непроницаемости металла заготовки сквозь стенки инструмента. Использовалась конечно-элементная сетка с четырехузловыми тетраэдрами, которая позволила достаточно корректно описать сложную геометрию заготовки (рис. 2).

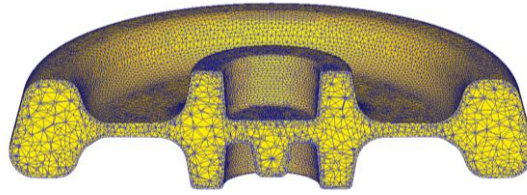


Рис. 2 – Конечно-элементная модель заготовки железнодорожного колеса (заготовка после формовочного прессы силой 100 МН).

При моделировании также был предусмотрен режим компенсации изменения объема заготовки как при регенерации сетки, так и в процессе вычислений. В качестве целевого был выбран объем исходной заготовки, задаваемой в программу с файлом геометрии.

Расчет течения металла проводился на основе принципа минимума работы деформации:

$$\pi = \int_V \sigma \dot{\varepsilon} dV - \int_S F_i u_i dS, \quad (5)$$

$$\delta\pi = \int_V \delta \dot{\varepsilon} dV - \int_S F_i \delta u_i dS + K \int_V \dot{\varepsilon}_V \delta \dot{\varepsilon}_V dV = 0, \quad (6)$$

где  $\pi$  – работа;  $\sigma$  – напряжение;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость эквивалентных деформаций;  $\delta$  – вариация;  $V$  – объем;  $F_i$  – силы;  $u_i$  – перемещения;  $S$  – площадь поверхности;  $K$  – константа.

Основываясь на вышеизложенном было произведено математическое моделирование процессов осадки, разгонки, формовки в штампах и прокатки заготовок колес  $\varnothing 957$  мм по существующей на ОАО «ВМЗ» технологии [4]. Исходные данные для моделирования задавались на основе фактической экспериментальной информации по деформационным, силовым и скоростным параметрам штамповки и прокатки вышеуказанных заготовок черновых колес  $\varnothing 957$  мм, полученной в условиях их промышленного производства на прессопрокатной линии ОАО «ВМЗ» [12, 13].

Температура прессовой оснастки и валков принята постоянной и равной  $300^\circ\text{C}$ , температура выдачи заготовок из печи –  $1260^\circ\text{C}$ .

Скорость перемещения траверс на прессах задавали на основе данных расчетов параметров гидравлических прессов силой 20 МН, 50 МН и 100 МН, изложенных в работе [14], а также с учетом фактической экспериментальной информации о длительности рабочего хода траверс на этих прессах [12]. Это позволило учесть особенности гидросистемы данных прессов, оказывающие влияние на время разгона траверс и скорость их установившегося движения.

Краевые условия задачи, характеризующих воздействия валков на прокатываемую заготовку колеса (рис. 3) в вертикальном (наклонные валки) и горизонтальном (нажимные и коренные валки) направлениях, задавали в виде временных зависимостей сил, действующих со стороны каждого из валков на заготовку. Перемещения каждого из валков получали в качестве результатов моделирования. По их значениям и

характеру изменения судили об адекватности математической модели экспериментальным данным.

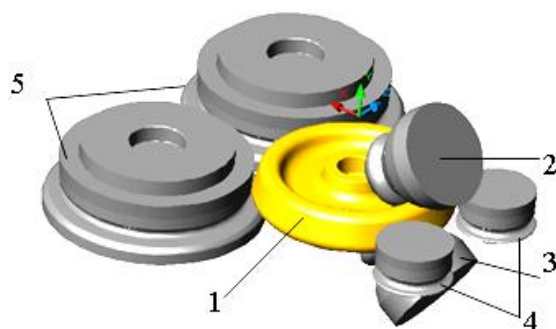


Рис. 3 – Схема расположения валков и заготовки в начальный момент прокатки: 1 – заготовка, 2 – верхний наклонный валок, 3 – нижний наклонный валок, 4 – нажимной валок, 5 – коренной валок.

Скорости вращения наклонных валков с учетом разгона двигателей задавали на основе экспериментальной информации, приведенной в работе [13]. Скорости вращения нажимных и коренных валков, которые задавали как холостые, получали непосредственно при моделировании. Перемещения коренных валков под действием сил, вызванные ростом диаметра прокатываемой заготовки также были получены расчетным путем.

При назначении краевых условий при взаимодействии нажимных валков с прокатываемой заготовкой учитывали, что сила, действующая на плунжер гидроцилиндра прямого хода салазок нажимных валков, является результирующей силой от совместного воздействия двух валков на прокатываемую заготовку. При этом нажимные валки в процессе прокатки самоустанавливаются по поверхности катания колеса, то есть они могут перемещаться в двух взаимно противоположных направлениях вдоль оси  $Ox$  (см. рис. 3).

**Результаты моделирования и их обсуждение.** На первом этапе исследований было выполнено моделирование процесса остывания заготовки на воздухе при ее транспортировке (время транспортировки – 25с) по рольгангу от печи к осадочному прессу силой 20 МН. Распределение температур в заготовке после ее транспортировки и выдержки (время выдержки – 5с) на нижней плите пресса 20МН представлено на рис. 4а. Средняя температура металла на поверхности заготовки перед осадкой составляет 1200 – 1220°C. Свободную осадку заготовки производят до высоты 120–122 мм. Результаты моделирования процесса осадки заготовки, представлены на рис. 4б. Полученное значение силы осадки (24,9МН) является для данного пресса максимально возможным. Его достигают при давлении рабочей жидкости 31,4МН/м<sup>2</sup> [4].

После свободной осадки заготовка подается на пресс 50 МН (время транспортировки – 8 с) для разгонки в технологическом кольце. Перед прессом 50 МН заготовку кантуют на 180° для выравнивания температуры с верхней и нижней сторон заготовки. На рис. 5а представлено распределение температуры в заготовке после ее

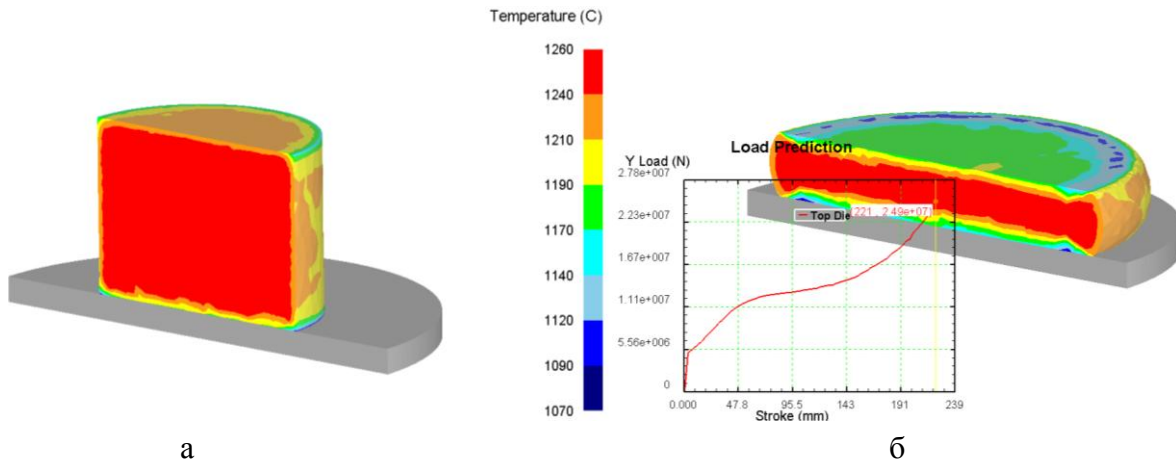


Рис. 4 – Заготовка после транспортировки, выдержки на нижней плите (а) и после осадки (б) на прессе силой 20МН.

транспортировки к прессу 50 МН и выдержке заготовки (время выдержки – 7с) на нижней обжимной плите пресса. Средняя температура металла на поверхности заготовки перед разгонкой составляет 1150 – 1190°C.

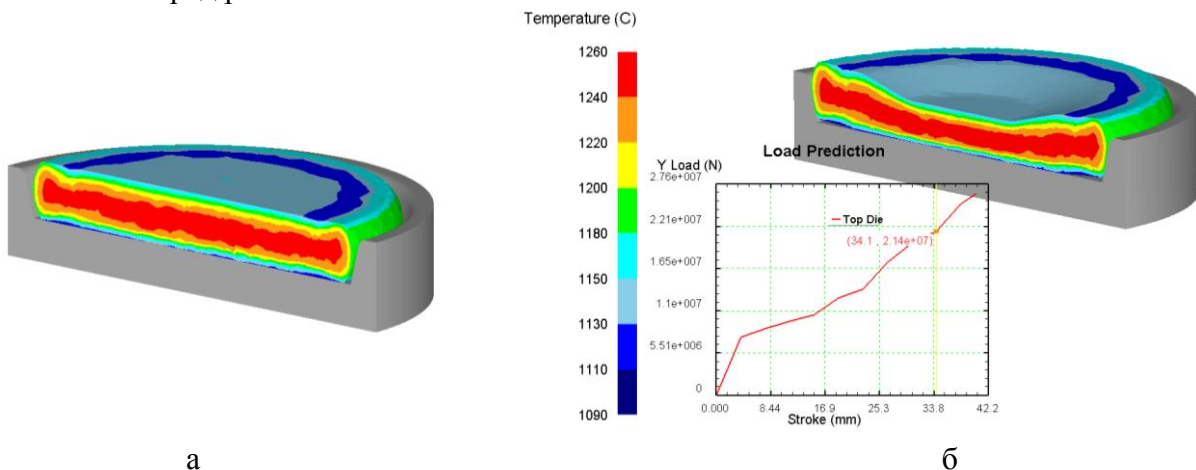


Рис. 5 – Заготовка после транспортировки, выдержки на нижней плите (а) и после разгонки (б) на прессе силой 50МН.

После укладки заготовки на обжимную плиту выполняют центровку технологического кольца по оси пресса и выполняют опускание траверсы пресса до вхождения в контакт конусной плиты с заготовкой. Результаты моделирования процесса разгонки заготовки на прессе силой 50 МН представлены на рис. 5б.

После операции разгонки заготовка подается (время транспортировки – 20 с) на формовочный пресс силой 100 МН. На рис. 6а представлено распределение температуры в заготовке после ее транспортировки к прессу 100 МН и выдержки на нижнем штампе (время выдержки – 8,5 с). Средняя температура металла на поверхности заготовки перед формовкой в штампах составляет 1130 – 1160°C. Результаты моделирования процесса формовки заготовки на прессе силой 100 МН представлены на рис. 6б.

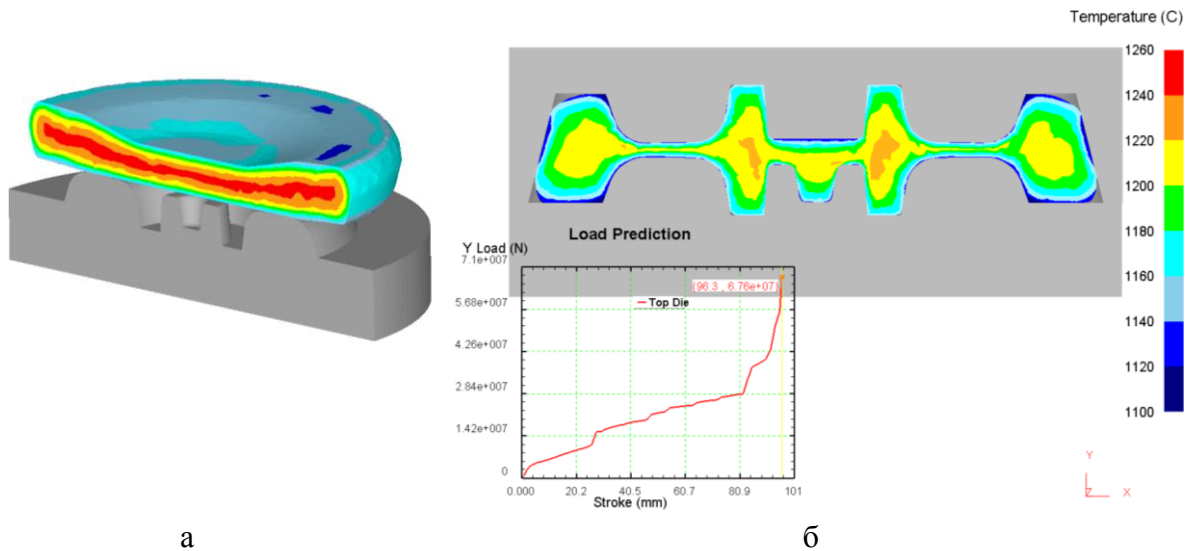


Рис. 6 – Заготовка после транспортировки, выдержки на нижнем штампе (а) и формовки на прессе силой 100МН.

Невысокое значение силы формовки (67,6 МН) объясняется тем, что при моделировании величина разгонки заготовки на прессе 50 МН (34,1мм) обеспечила с одной стороны выполнение ступицы (см. рис. 6б), а с другой – исключение перетекания металла из центральной полости формовочных штампов в периферийную. Естественно, что на практике так точно подобрать величину разгонки не удастся, в том числе по причине разноравеса заготовок. Поэтому в реальных условиях промышленного производства сила формовки с учетом потерь может достигать 90 МН по причине преждевременного заполнения центральной полости штампов в зоне ступицы и изменения направления течения металла в зоне диска на одностороннее. За счет этого избегают получения неисправимого вида брака, «невыполнение ступицы», при допустимой на прессе силе штамповки.

Из рис. 6б видно, что периферийная полость штампов, формирующая верхний торец обода под прокатку, заполняется металлом не полностью и неравномерно. Такая картина формоизменения металла хорошо согласуется, причем не только качественно, но и количественно, с экспериментально установленными закономерностями формоизменения металла в формовочных штампах (рис. 7) авторами работ [15 – 17].

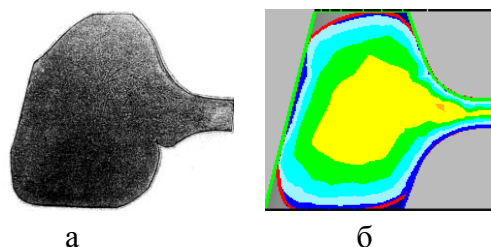


Рис. 7 – Формоизменение металла в периферийной полости штампов при штамповке заготовок колес Ø957 мм по существующей технологии: а – макроструктура поперечного сечения ободной части заготовки [15]; б – форма поперечного сечения ободной части заготовки, полученная при моделировании (рис. 6б).

После формовки в штампах прессы 100 МН заготовка подается к колесопрокатному стану (КПС). На рис. 8а представлено распределение температуры в заготовке после ее транспортировки к КПС и выдержки во время подвода валков (общее время – 20 с). Средняя температура металла на поверхности заготовки перед прокаткой составляет 1110 – 1140°С.

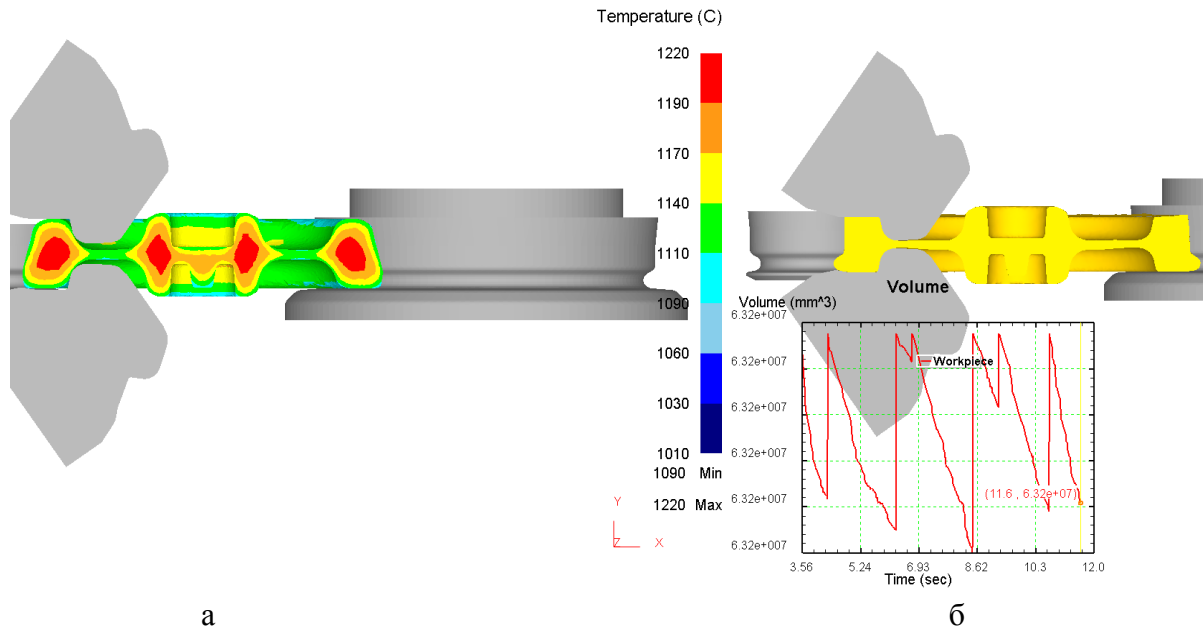


Рис. 8 – Заготовка перед прокаткой (а) и на стадии раскатки обода по диаметру (б).

Следует отметить, что наряду с установленной оптимальной величиной размера элементов сетки (максимальный размер – 10 мм, минимальный – 2,5 мм (см. рис. 2)) режим компенсации изменения объема заготовки позволил поддерживать величину отклонения текущего объема заготовки от целевого на всех этапах моделирования на уровне не более 0,2% (рис. 8б).

Используя экспериментальные данные о силовых параметрах процесса прокатки в качестве исходной информации, оценку адекватности результатов моделирования выполняли путем сравнения расчетных параметров формоизменения заготовки с аналогичными параметрами (в первую очередь это величина раскатки заготовки по внутреннему диаметру обода), зафиксированными в промышленных условиях [13]. Степень адекватности модели подтверждается совпадением с точностью до 1 мм величины приращения внутреннего диаметра обода заготовки в конце основных технологических стадий прокатки (осадка обода по ширине, раскатка обода по диаметру с выкаткой гребня, поверхности катания и диска; полировка обода), полученных расчетным путем, с промышленными данными [13]. Так, величина раскатки обода по внутреннему диаметру, полученная при моделировании, равна 93 мм (рис. 9). Аналогичная величина, зафиксированная системой автоматики стана в промышленных условиях равна 93 – 95 мм.

Полученные при моделировании значения сил штамповки, температур заготовок и параметров их формоизменения хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в условиях промышленного производства колес Ø957 мм [4, 12, 13, 15].



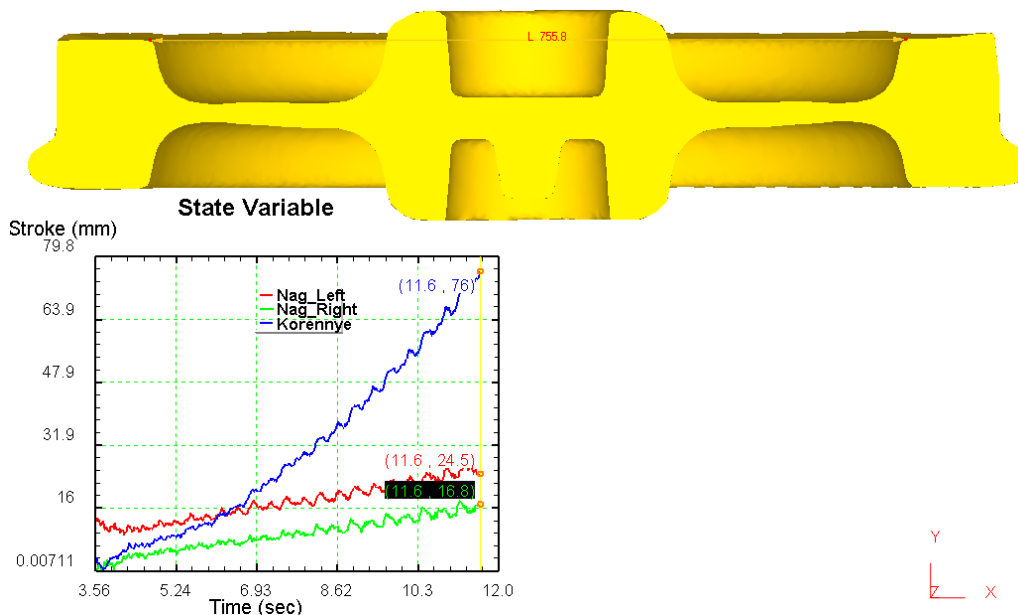


Рис. 9 – Промежуточная стадия раскатки обода по диаметру (Nag\_Left – ход входного нажимного вала (средний график); Nag\_Right – ход выходного нажимного вала (нижний график); Korennye – ход коренных валков (верхний график)).

**Выводы.** Таким образом, выполнена постановка и реализация задачи конечно-элементного моделирования процессов осадки, разгонки, формовки в штампах и прокатки заготовок колес применительно к условиям прессопрокатных линий ОАО «Интерпайп – НТЗ» и ОАО «ВМЗ». Полученные в системе DEFORM 3D результаты моделирования в целом правильно отражают основные закономерности анализируемых процессов, установленные в условиях промышленного производства колес.

Разработанные и реализованные в DEFORM 3D математические модели также были использованы для оценки эффективности новых технологических режимов и способов деформирования, а также при создании аналитических зависимостей для оперативного расчета параметров формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок колес.

## Литература

1. Davey K. Efficient strategies for the simulation of railway wheel forming / K. Davey, B.C. Miller, M.J. Ward. // Journal of Materials Processing Technology. 2001. – Vol. 118. – P. 389 – 396.
2. Шрамко О.В. Обґрунтування і розробка раціональної технології виготовлення залізничних коліс підвищеної якості з урахуванням історії деформування. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.05: захист 13.03.07/ Шрамко Олександр Вікторович.– Дніпропетровськ, 2007. – 19 с.
3. Голышков Р. Оптимизация технологических процессов колесопрокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM / Р. Голышков, А. Латаев, А. Харламов // САПР и графика. – 2006.–№ 7.–С. 73–75.

4. Яковченко А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2008. – 491 с.: ил.
5. Гриневич В.А. Компьютерное моделирование процессов штамповки железнодорожных колес малого диаметра / В.А. Гриневич, В.Н. Данченко, А.А. Миленин и др. // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 12. – С. 44–46.
6. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: *Металлургия*, 1980. – 456 с.: ил.
7. Medina S.F. General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels / S.F. Medina, C.A. Hernandez // *Acta Mater.* 1996. – Vol. 44. – No. 1. – P. 137-148.
8. Medina S.F. Modeling austenite flow curves in low alloy and microalloyed steels / S.F. Medina, C. A. Hernandez, J. Ruiz // *Acta Mater.* 1996. – Vol. 44. – No. 1. – P. 155-163.
9. Medina S.F. Influence of chemical composition on peak strain of deformed austenite in low alloy and microalloyed steels / S.F. Medina, C.A. Hernandez // *Acta Mater.* 1996. – Vol. 44. – No. 1. – P. 149-154.
10. Солод В.С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей / В.С. Солод, Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин // *Металл и литье Украины*. 2006. – № 7–8. – С. 52 – 56.
11. Снитко С.А. Экспериментально-теоретический метод расчета условий контактного трения при прокатке заготовок железнодорожных колес / С.А. Снитко // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Серія: *Машинобудування* / Київ: КПІ, 2010. – Вип. 60. – С. 208 – 211.
12. Яковченко А.В. Экспериментальные исследования силовых параметров и совершенствование процессов штамповки колесных заготовок / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, Собхи Хасан // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ, 2006. – С. 302 – 306.
13. Снитко С.А. Анализ силовых и скоростных параметров прокатки колес / С.А. Снитко // *Наукові праці ДонНТУ. Металургія: Зб. наук. пр.* – Донецьк, 2008. – Вип. 10 (141). – С. 163 – 172.
14. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик, А.М. Иоффе, А.В. Праздников и др. – М.: *Металлургия*, 1982. – 232 с.: ил.
15. Прогнозирование и способ устранения образования зажимов при формовке колесных заготовок / Б.Г. Каплунов, В.Н. Крашевич, М.И. Староселецкий, А.В. Белущенко // *Изв. вузов Черная металлургия*. – 1991. – № 1. – С. 55–56.
16. Шифрин М.Ю. Резервы производительности и выхода годного при прокатке колес / М.Ю. Шифрин. – М.: *Металлургия*, 1989. – 144 с.: ил.
17. Шифрин М.Ю. Рациональный режим осадки обода колесной заготовки / М.Ю. Шифрин // *Сталь*. – 1993. – № 5. – С. 52–54.