

С.А. Снитко /к.т.н./, А.В. Яковченко /д.т.н./, Н.И. Ивлева
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ШТАМПОВКИ КОЛЕСНЫХ ЗАГОТОВОК

Выполнена адаптация методики конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей инструмента деформации заготовочного пресса силой 50 МН. На базе разработанных калибровок и сборочного чертежа инструмента деформации применительно к усовершенствованному профилю колеса диаметром 957 мм с 2-радиусным диском по ГОСТ 10791-2011 выполнен анализ НДС деталей, в которых наиболее вероятно появление изгибающих нагрузок и, соответственно, растягивающих напряжений, приводящих к появлению трещин.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, калибровка, сборочный чертеж инструмента деформации заготовочного пресса, конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния деталей.

Постановка проблемы

Создание новых низконапряженных конструкций железнодорожных колес, которые в соответствии со стратегией инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» рассчитаны на повышенные, до 27 тс (264,9 кН), осевые нагрузки, требует решения комплекса задач по обеспечению требуемых показателей качества и высокой стойкости инструмента деформации металла. При этом актуально разработать компьютерные программы проектирования сборочных чертежей инструмента деформации заготовочных прессов применительно к новым перспективным схемам колесных заготовок, выполнить адаптацию методики конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей инструмента деформации заготовочных, формовочных и выгибных прессов и на этой основе проанализировать напряжения и деформации в деталях, в которых наиболее вероятно появление изгибающих нагрузок и, соответственно, растягивающих напряжений, приводящих к появлению трещин.

Анализ последних исследований и публикаций

Освоение производства новых конструкций железнодорожных колес, которые призваны обеспечить минимизацию в них напряжений от действия эксплуатационных нагрузок, требует разработки технологии их штамповки и прокатки. В связи с тем, что профили новых колес, как правило, во многом отличаются от уже освоенных, ряд элементов разрабатываемых технологий также требует существенного совершенство-

вания. И в первую очередь это относится к одному из основных элементов технологии – калибровкам по металлу и инструменту деформации.

Разработка технологии штамповки и прокатки колес на прессопрокатной линии включает следующие основные этапы: проектирование профиля чистового (рис. 1 и 2а) и чернового колеса (рис. 2б); проектирование калибровок по металлу и инструменту деформации для заготовочного (рис. 2з, 3 и 4); формовочного (рис. 2е, 2ж, 2и); и выгибного (рис. 2в и 2г) прессов, а также колесопроекатного стана (рис. 2д); проектирование сборочных чертежей (рис. 5 и 6) и чертежей деталей основного инструмента деформации и дополнительной оснастки. Разработанные калибровки в значительной степени определяют соответствующие сборочные чертежи.

Методы компьютерного проектирования низконапряженных конструкций колес изложены в работах [1,2], калибровок валков и штампов в работах [3-5]. Вопросы конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния металла при штамповке и прокатке колес освещены в работах [6,7]. Теоретические основы и метод проектирования сборочных чертежей инструмента деформации для заготовочного пресса представлены в работе [8].

Вместе с тем необходимость получения требуемого качества штампованно-катаных колес и высокой стойкости инструмента деформации металла определяет актуальность конечно-элементного моделирования не только НДС металла при его штамповке и прокатке, но также и

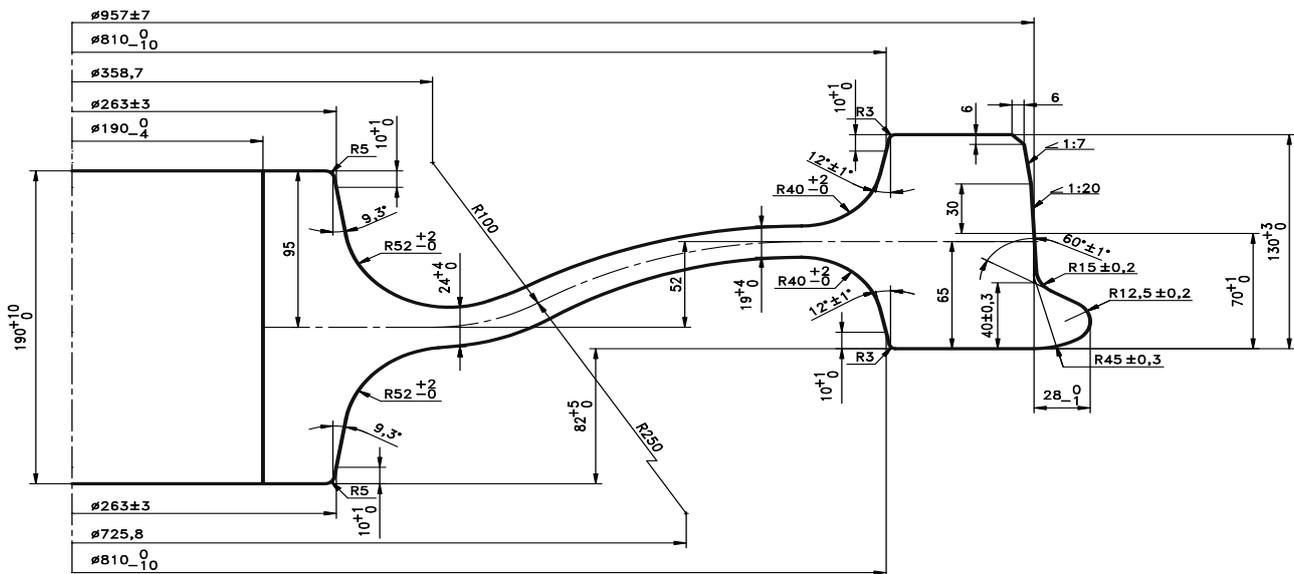


Рис. 1. Профиль чистового колеса с 2-радиусным диском $\varnothing 957$ мм, выполненный по номинальным размерам

деталей основного инструмента деформации и дополнительной оснастки. Полученные при этом результаты могут служить основой для корректировок как калибровок, так и сборочных чертежей и чертежей деталей инструмента деформации для обеспечения их долговечности.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является: адаптация методики конечно-элементного моделирования НДС деталей инструмента деформации заготовочного пресса силой 50 МН; совершенствование компьютерных программ, разработка на их основе калибровок и сборочного чертежа инструмента деформации применительно к усовершенствованному профилю колеса диаметром 957 мм с 2-радиусным диском по ГОСТ 10791-2011; выполнение анализа НДС деталей заготовочного пресса силой 50 МН, в которых наиболее вероятно появление изгибающих нагрузок и, соответственно, растягивающих напряжений, приводящих к появлению трещин.

Основной материал исследования

Результаты исследований выполнены применительно к профилю железнодорожного колеса $\varnothing 957$ мм с 2-радиусным диском [1], которое является усовершенствованным вариантом колеса с плоскоконическим диском («облегченка»). Основная идея усовершенствования конструкции колеса заключалась в том, чтобы изменить в нем на базе теории [2] только один элемент, а именно плоскоконическую часть диска на криволинейную. На рис. 1 представлен чертеж усовершенствованного колеса с 2-радиусным диском, соответствующего требованиям ГОСТ 10791-

2011. Ось криволинейной части диска спроектирована на основе уравнения «цепной линии», что, как показано в работах [1,2], способствует минимизации напряжений от эксплуатационных нагрузок и их наиболее равномерному распределению в диске колеса.

Контур чистового колеса с 2-радиусным диском $\varnothing 957$ мм и соответствующий ему контур чернового колеса $\varnothing 965$ мм, выполненный по номинальным размерам, представлены на рис. 2а, 2б.

Результаты проектирования профилей чистовых и черновых колес являются основой для последующего проектирования калибровок и инструмента деформации металла.

Методы компьютерного проектирования калибровок валков и штампов, изложенные в работе [3], в первую очередь были ориентированы на оборудование и технологию прессопрокатных линий колесопркатных цехов АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) и ПАО «Интерпайп» Нижнеднепровский трубопрокатный завод (НТЗ).

Прессопрокатное оборудование нового колесопркатного цеха ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (НТМК) существенно отличается [4]. В настоящей работе эти отличия учтены, причем как в математических моделях и компьютерных программах, так и на всех этапах проектирования калибровок по металлу и инструменту деформации (рис. 2): *в* – калибровка по металлу для выгибного пресса силой 50 МН (учтены температурное расширение металла и противосдвиг обода относительно ступицы для компенсации соответствующего смещения этих элементов при последующей термообработке колеса); *г* – калибровка по

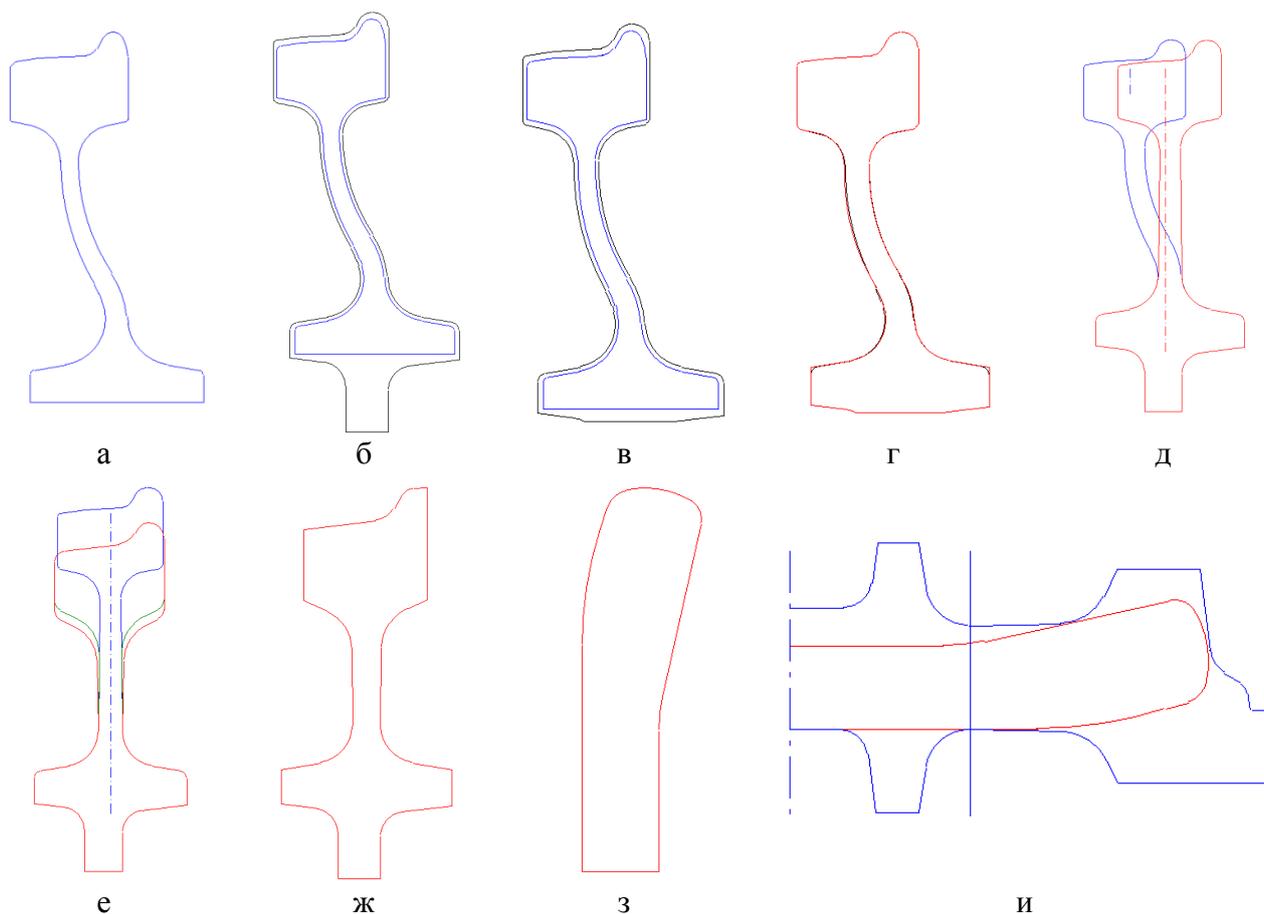


Рис. 2. Калибровки по металлу и инструменту деформации

инструменту деформации, совмещенная с калибровкой по металлу для выгибного пресса; *д* – калибровка по металлу для колесопрокатного стана (КПС) с учетом полного распрямления диска; *е* – калибровка по металлу для формовочного пресса; *ж* – калибровка по инструменту деформации для формовочного пресса; *з* – калибровка по металлу для заготовочного пресса

[5]; *и* – контрольное построение захода заготовки в формовочные штампы.

На базе контура, показанного на рис. 2з, разработана калибровка по инструменту деформации для заготовочного пресса (рис. 3), которая позволила выполнить анализ формоизменения металла при осадке и разгонке исходной заготовки (рис. 4).

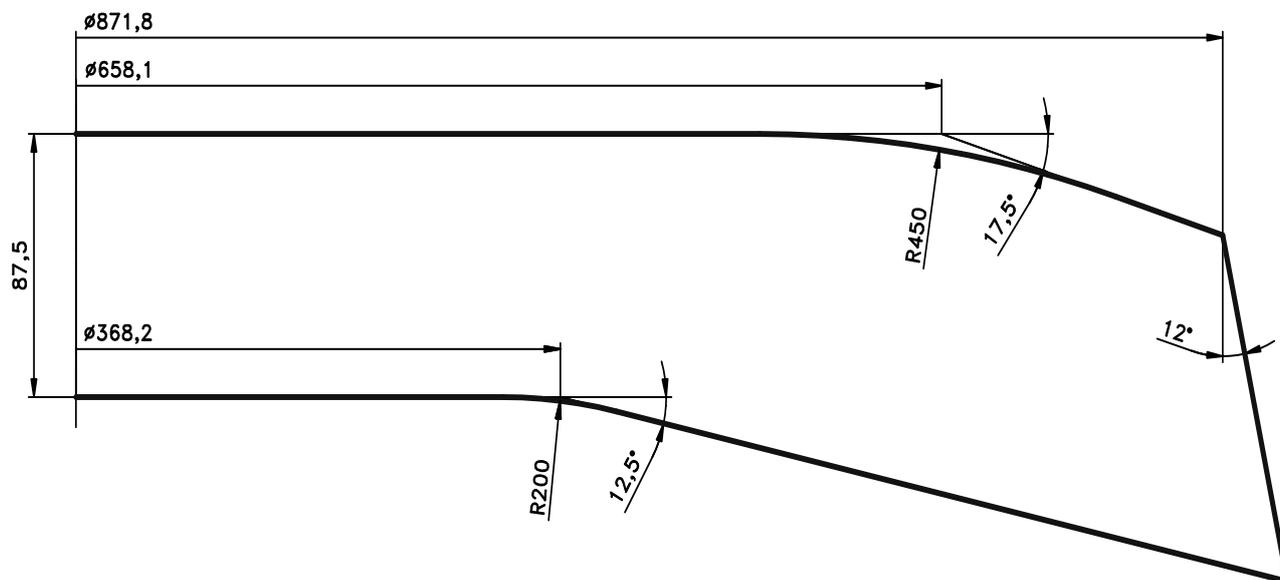


Рис. 3. Калибровка по инструменту деформации для заготовочного пресса силой 50 МН

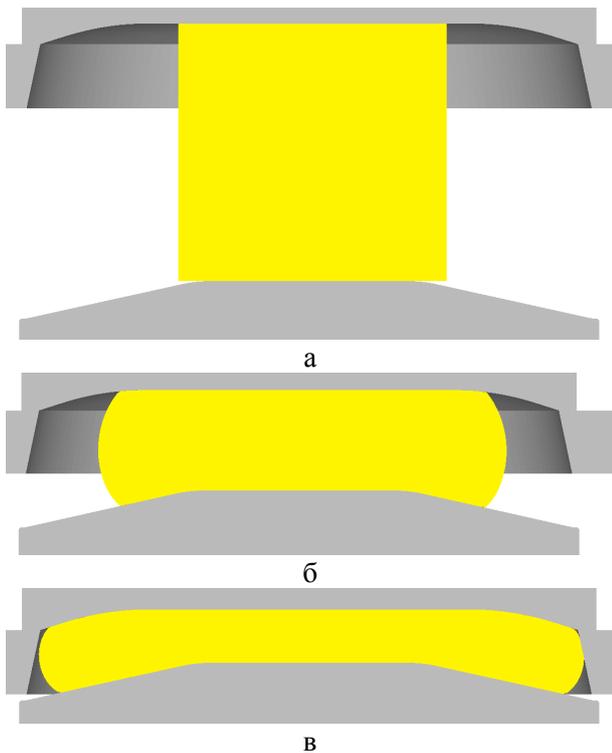


Рис. 4. Формоизменение металла при осадке и разгонке исходной заготовки:
а, б, в – этапы заполнения штампа

Указанная калибровка по инструменту деформации также используется для проектирования сборочного чертежа инструмента деформации заготовочного пресса силой 50 МН (рис. 5 и 6).

Разработка калибровок (рис. 2-4) на всех этапах сопряжена с конечно-элементным моделированием напряженно-деформированного состояния металла при его штамповке и прокатке. Указанная задача является многовариантной, а ее решение в конечном итоге должно обеспечить как получение требуемого качества штамповано-катаных колес, так и высокую стойкость инструмента деформации металла. Это, в свою очередь, определяет актуальность конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния основного инструмента деформации и дополнительной оснастки. Полученные при этом результаты служат основой для корректировок как калибровок, так и чертежей деталей инструмента деформации.

Автоматизированное проектирование пресового инструмента, необходимого для освоения новых высокоэффективных конструкций железнодорожных колес, имеет высокую актуальность. Методы его проектирования, предложенные в работе [3], применимы для условий АО «ВМЗ» и ПАО «Интерпайп НТЗ», где при освоении производства новых колес необходимо разрабатывать и изготавливать только инструмент,

который непосредственно контактирует с деформируемым металлом. На современных пресопрокатных линиях, в том числе на ОАО «ЕВРАЗ НТМК», установлены прессы новой конструкции, которые обладают более высокими техническими характеристиками, но при освоении производства новых колес требуют проектирования и изготовления как основного инструмента деформации, который контактирует с металлом, так и деталей дополнительной оснастки, которые с ним не контактируют. Компьютерное проектирование такого инструмента возможно только на основе соответствующих сборочных чертежей по методу, созданному в работе [8].

Проектирование сборочного чертежа инструмента деформации заготовочного пресса силой 50 МН ($R 5000$) (рис. 6) выполнено в окнах компьютерной программы (рис 5), разработанной для используемой схемы заготовки (рис. 2з) [5].

Анализ НДС в деталях инструмента при штамповке колесных заготовок на прессе $R 5000$, выполняли путем решения объемной задачи для сектора, имеющего угол 90° . Это позволило, с одной стороны, уменьшить количество конечных элементов, а с другой – обеспечить достаточно точное моделирование формы и размеров деталей инструмента, вступающих в контакт как с деформируемым металлом заготовки, так и между собой (рис. 7а).

Также с целью «минимизации» модели сеткой разбивали не все детали, а только те, в которых наиболее вероятно появление изгибающих нагрузок и, соответственно, растягивающих напряжений, приводящих к появлению трещин и повышенному износу. К ним относятся верхний и нижний штампы и пуансон, которые контактируют с деформируемым металлом, а также верхний опорный платик, контактирующий с верхним штампом и пуансоном (рис. 7а).

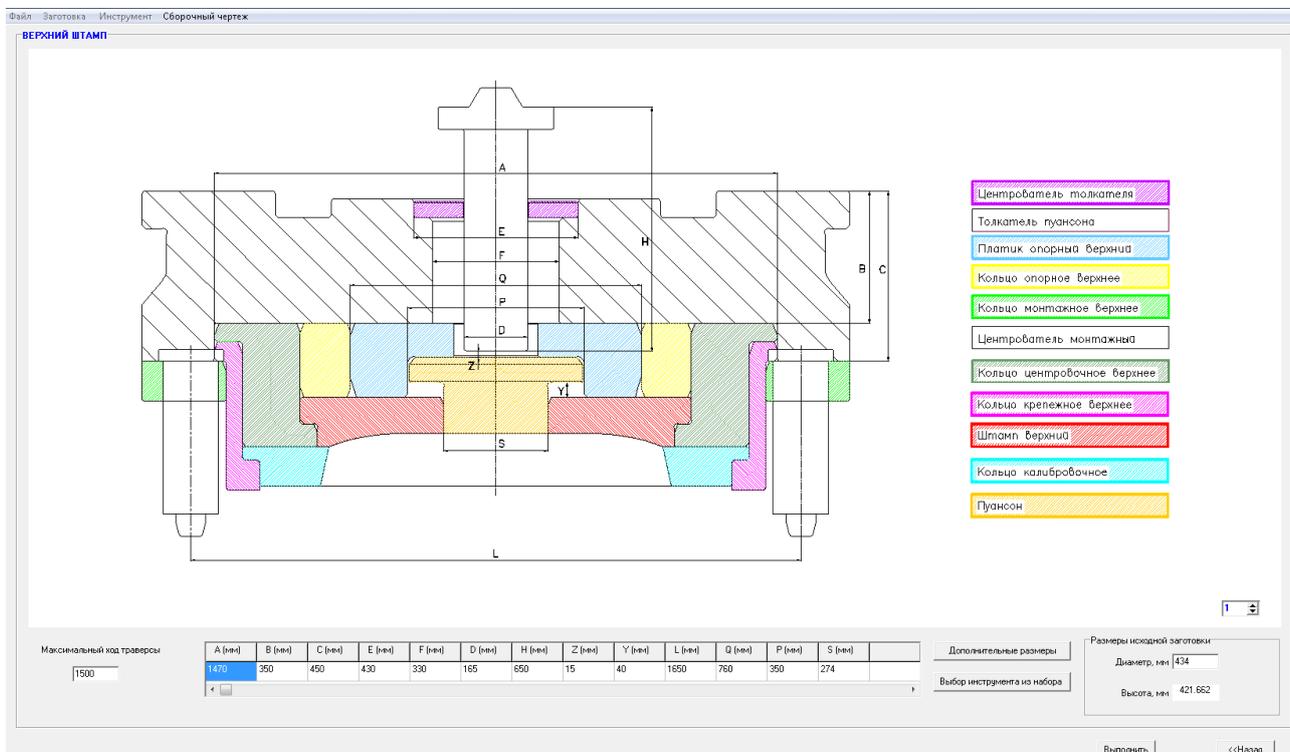
Для моделирования пресового инструмента выбрали упругий тип объекта. В качестве материала использовали имеющуюся в библиотеке DFORM-3D штамповую сталь AISI-H-13 с соответствующими механическими и теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры.

Для колесной заготовки использовали пластическую модель материала. Начальную температуру штампов приняли равной 20°C . Заготовка перед штамповкой имела неравномерное температурное поле в диапазоне $1066-1260^\circ\text{C}$, полученное в путем моделирования гидросбива окалины с торцевых поверхностей заготовки и ее передачи от нагревательной печи к заготовочному прессу.

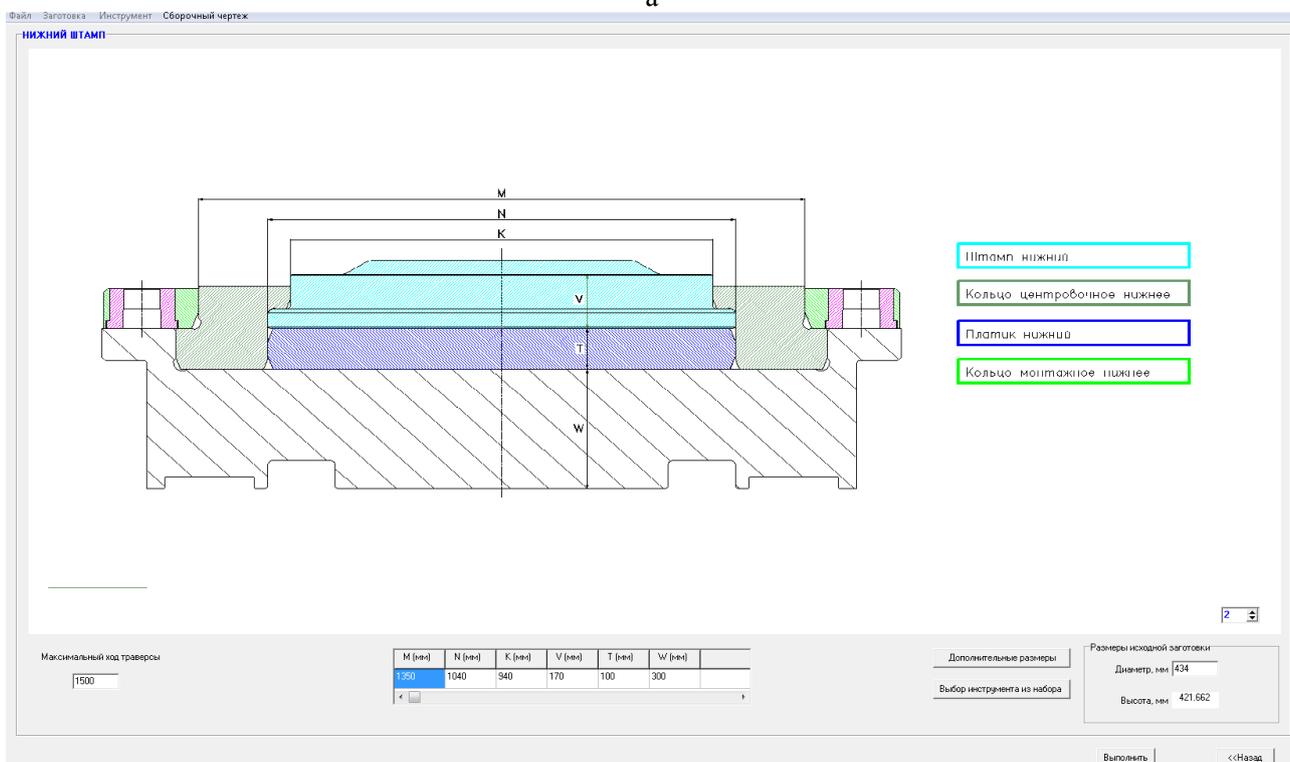
Результаты моделирования показали, что при осадке заготовки, совмещенной с ее разгонкой, имеет место разогрев контактных поверхностей инструмента деформации до температур: 355 °С – в верхнем штампе и пуансоне; 368 °С – в нижнем штампе (рис. 7б).

В последний момент штамповки на контакт-

ных поверхностях штампов создаются достаточно большие напряжения. Так, эквивалентные напряжения по Мизесу достигают: 700 МПа в нижнем штампе; 595 МПа в верхнем штампе; 560 МПа в пуансоне. Вместе с тем, они являются сжимающими, причем и для верхнего и для нижнего инструмента деформации (рис. 7в).



а



б

Рис. 5. Окно проектирования сборочного чертежа инструмента деформации заготовочного прессы силой 50 МН: а – верхний штамп; б – нижний штамп

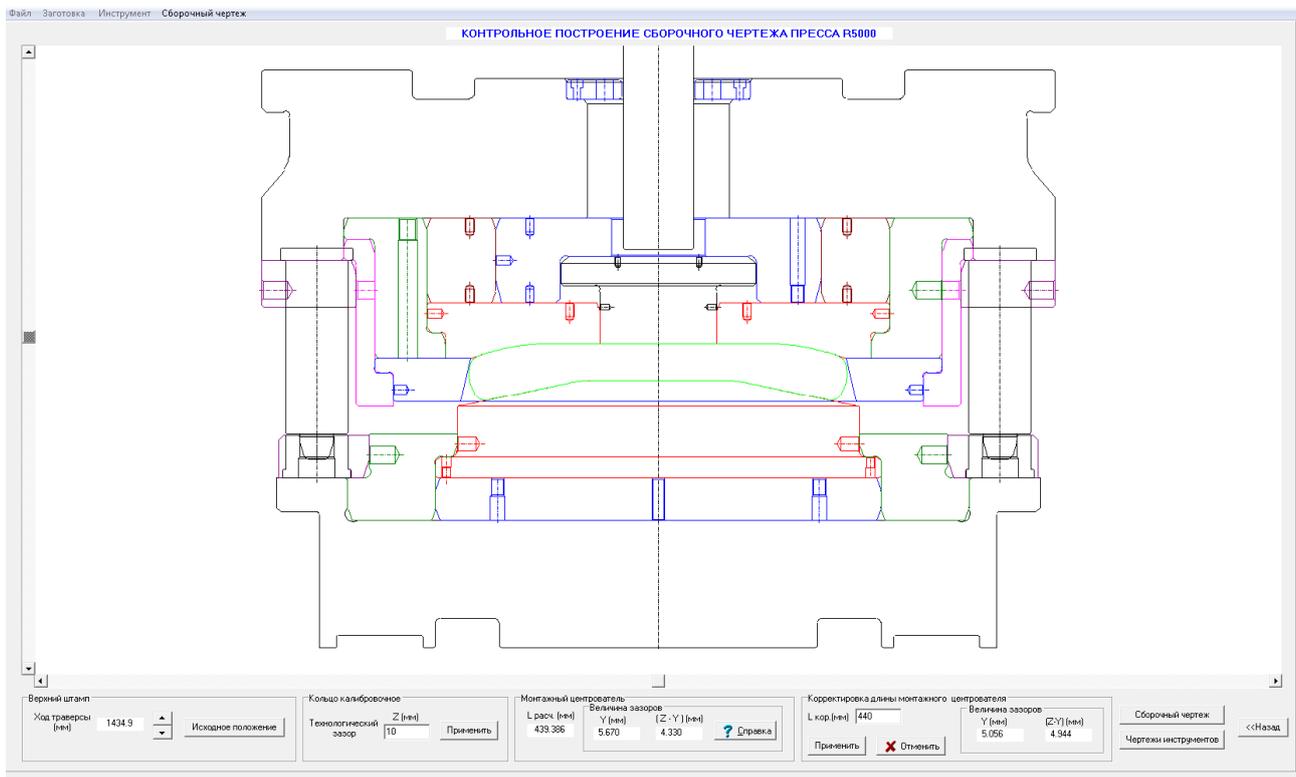


Рис. 6. Контрольное построение сборочного чертежа инструмента деформации заготовочного пресса силой 50 МН ($R\ 5000$), компьютерное проектирование которого выполнено в автоматическом режиме

Растягивающие напряжения в штампах и в пуансоне создаются лишь на их периферийных поверхностях, но, как показали расчеты, их величина небольшая (не более 73 МПа).

Следует отметить, что наиболее высокие напряжения в верхнем штампе наблюдаются в его центральной части вблизи отверстия. Здесь же наблюдается его прогиб (рис. 7г). Прогибы имеют место также в верхнем платике и в пуансоне.

В результате прогиба центральной части верхнего штампа на боковой поверхности пуансона, контактирующей с верхним штампом в зоне его центрального отверстия (в области фаски), развивается зона концентрации напряжений. Однако величина этих напряжений в окончательном варианте разработанного инструмента деформации незначительна и не превышает величины предела текучести. Так, эквивалентные напряжения составляют 137 МПа (рис. 7д), а среднее главное напряжение, являющееся растягивающим, равно 51 МПа (рис. 7е).

При взаимодействии пуансона и верхнего опорного платика также возникает зона концентрации напряжений, расположенная в зоне фаски центрального отверстия платика с верхней его стороны (рис. 7д). Эквивалентные напряжения в этой зоне достигают 325 МПа. Среднее главное напряжение – растягивающее, но оно не превышает 12 МПа.

Кроме того, как показали результаты моде-

лирования, в результате прогиба внутреннего фланца платика у основания фланца и с верхней стороны платика появляется зона действия растягивающих напряжений: величина среднего главного напряжения в этих областях достигает 55 МПа (рис. 7е).

Выводы

Необходимость получения требуемых показателей качества штампованно-катаных колес и высокой стойкости инструмента деформации металла определяет актуальность конечно-элементного моделирования НДС металла при его штамповке и прокатке, а также деталей основного инструмента деформации и дополнительной оснастки. Полученные при этом результаты служат основой для корректировок как калибровок, так и чертежей деталей инструмента деформации.

Выполнена адаптация методики конечно-элементного моделирования НДС деталей инструмента деформации заготовочного пресса силой 50 МН. На базе разработанных калибровок и сборочного чертежа инструмента деформации применительно к профилю колеса диаметром 957 мм с 2-радиусным диском по ГОСТ 10791-2011 выполнен анализ НДС деталей, в которых наиболее вероятно появление изгибающих нагрузок и, соответственно, растягивающих напряжений, приводящих к появлению трещин.

Растягивающие напряжения в окончательном варианте разработанного инструмента деформации

не превышают величины предела текучести, что способствует повышению стойкости инстру-

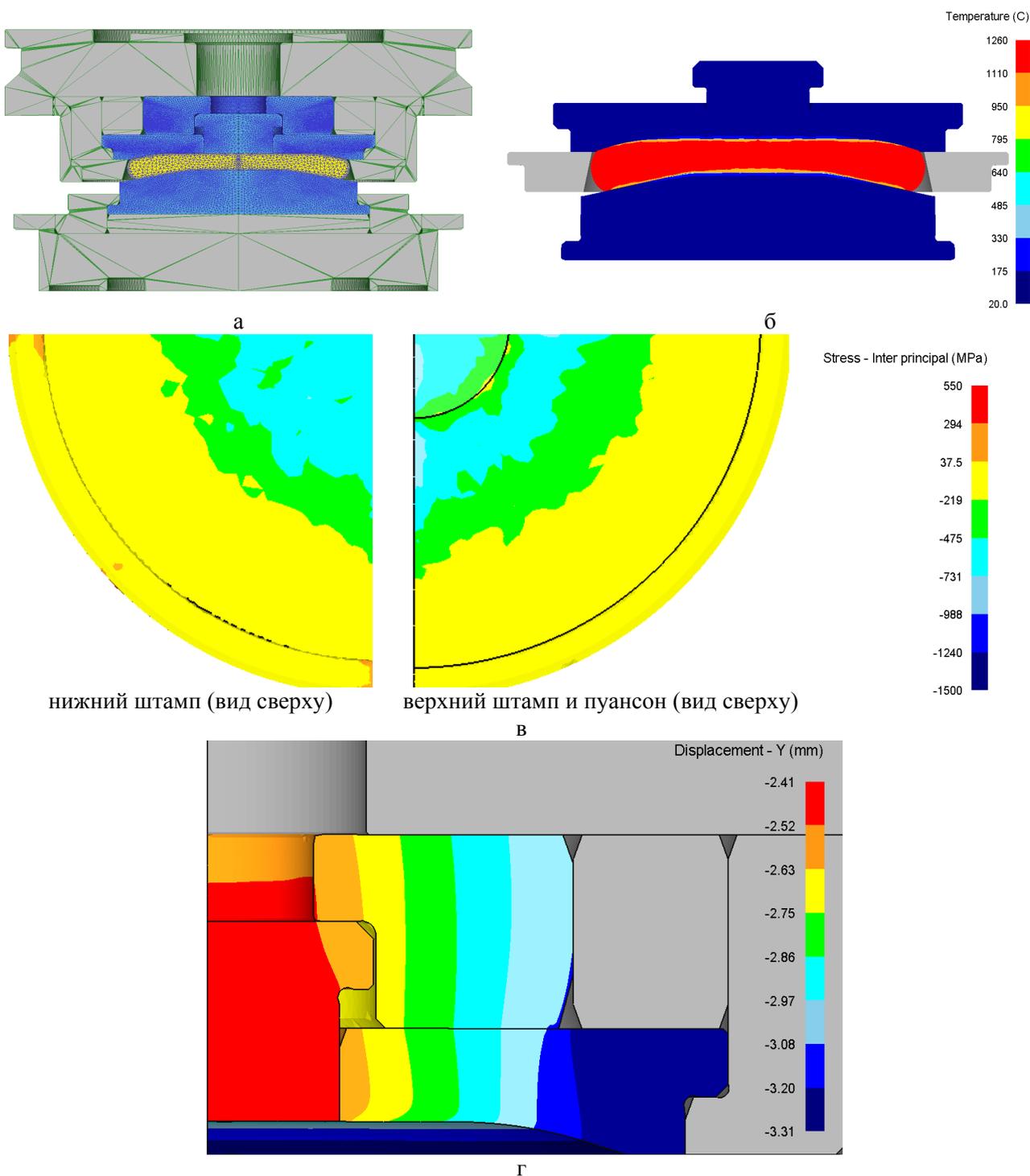
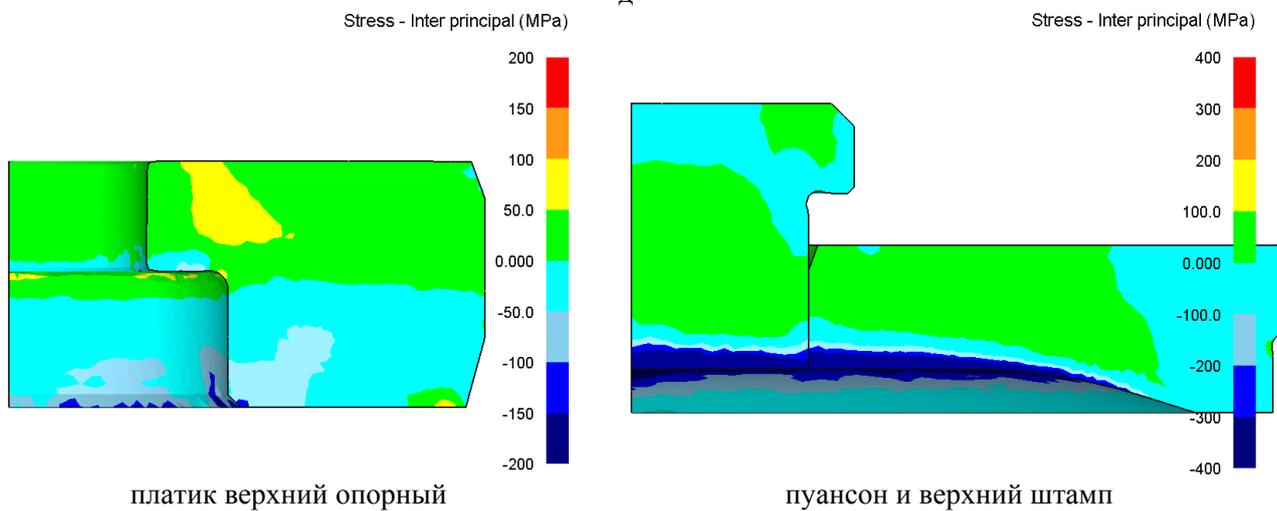
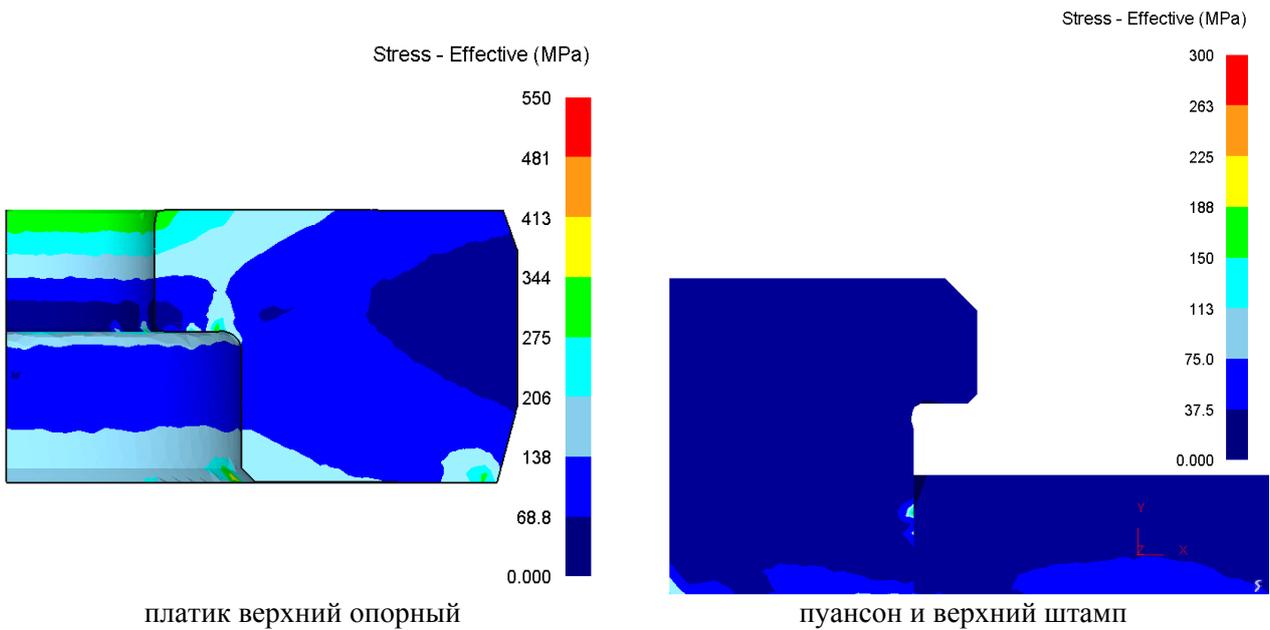


Рис. 7. Результаты расчетов НДС деталей основного инструмента деформации и дополнительной оснастки заготовочного прессы силой 50 МН:

- а* – геометрия и конечно-элементная сетка элементов прессовой оснастки, использованные при моделировании процесса штамповки колесной заготовки на прессы R 5000;
- б* – распределение температуры в заготовке и инструменте деформации в последний момент штамповки;
- в* – распределение среднего (с учетом знака) главного напряжения σ_2 на поверхности штампов в последний момент штамповки;
- г* – перемещение по вертикали (прогибы) элементов верхнего штампа, платика и пуансона в последний момент штамповки;
- д* – распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в верхнем штампе, платике и пуансоне в последний момент штамповки;
- е* – распределение средних главных напряжений в верхнем штампе, платике и пуансоне в последний момент штамповки



е
Продолжение рис.7.

румента.

Результаты конечно-элементного моделирования НДС деталей инструмента деформации могут служить основой для прогнозирования интенсивности их износа в зонах контакта с деформируемым металлом.

Список литературы

1. Yakovchenko A.V. Railroad Wheels Satisfying State Standard GOST 10791-2011 / A.V. Yakovchenko, S.A. Snitko // Steel in Translation. – 2015. – Vol.45, No.12. – P. 967-974.
2. Снитко С.А. Теоретические основы проектирования профилей железнодорожных колес с криволинейными дисками, построенными на базе принципа «золотого сечения» и «цепной линии» / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецк: Дон-

НТУ, 2012. – Вип.1(14)-2(15). – С. 131-146. (сер.: металургія).

3. Яковченко А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес: монография / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 491 с.
4. Копперс У. Производство железнодорожных колес на высоком техническом уровне / У. Копперс, М. Кунц // Черные металлы. – 2006. – № 3. – С. 75-79.
5. Снитко С.А. Технологические схемы и механизмы, обеспечивающие повышение точности и стабильности размеров штампованных колесных заготовок / Сталь. – 2013. – №10. – С. 72-80.
6. Analysis of railway wheel rolling process based on three-dimensional simulation / X. Shen [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol.72,

- Issue 1. – P. 179-191.
7. Experiment and Simulation of Metal Flow in Multistage Forming Process of Railway Wheel / X. Shen [et al.] // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2015. – Vol.22, Issue 1. – P. 21-29.
8. Снитко С.А. Теоретические основы автома-

тизированного проектирования сборочных чертежей прессового инструмента для осадки и разгонки колесных заготовок / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 1(16)-2(17). – С. 209-225. (сер.: металургія).

S.A. Snitko /Cand. Sci. (Eng.), A.V. Yakovchenko /Dr. Sci (Eng.), N.I. Ivleva
Donetsk National Technical University (Donetsk)

COMPUTER DESIGN OF FORGING DEFORMATION TOOL FOR STAMPING WHEELS BILLETS

Background. The creation of new low-cost railway wheels, designed for the higher, up to 27 tf (264,9 kN), axial load, in accordance with the strategy of innovative development of JSC "Russian Railways", requires the solution of a set of tasks to ensure the necessary indicators of their quality and long life of metal deformation tools. This determines the relevance of finite-element modeling not only of the stress-strain state (SSS) of metal at stamping and rolling but also parts of main deformation tool and additional tooling.

Materials and/or methods. The objective of this paper is adaptation of technique of finite-element modeling of the stress-strain state of the details of the billet press deformation tool of 50 MN force; development of calibration and assembly drawing of the deformation tool applied to an improved wheel profile with 957 mm diameter with a 2-radius disk according to GOST 10791-2011; analysis of SSS of the details of the billet press force of 50 MN, which are most likely to have bending loads and accordingly, tensile stresses leading to cracking.

Results. Methods and computer design calibration programs by metal and deformation tool improved as applied to rolling and press equipment at a new wheel-rolling shop of JSC "EVRAZ NTMK". A computer program developed for the design of assembly drawings and drawings of the deformation tool parts of billet presses in relation to a promising new scheme of wheel billet.

Conclusion. Performed the adaptation of the technique of finite-element modeling of stress-strain state of the deformation tool parts of the billet press force of 50 MN. Based on calibrations and assembly drawing of the deformation tool as applied to the wheel profile of 957 mm diameter with 2-radius disk according to GOST 10791-2011, performed the SSS analysis of the parts, which are most likely to have bending loads, and accordingly, tensile stresses leading to cracking. Tensile stress in the final version of the developed deformation tool does not exceed the value of the yield stress. The results of finite-element modeling of SSS of the deformation tool parts can serve as a basis for predicting the intensity of the wear in the contact area with wrought metal.

Keywords: railway wheel, calibration, assembly drawing, deformation tool, billet press, finite element modeling, the stress-strain state of parts.

Сведения об авторах

С.А. Снитко

SPIN-код: 8463-3786
Телефон: +380(50) 683-17-29
Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

Н.И. Ивлева

Телефон: +380 (95) 426-84-83
Эл. почта: ivl22@mail.ru

А.В. Яковченко

SPIN-код: 1314-1795
Телефон: +380 (50) 995-10-47
Эл. почта: mond1991@mail.ru

Статья поступила 16.11.2016 г.

© С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, 2016
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько