

УДК 621. 771.297

Снитко С. А.  
Дужуржи А. А.**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ  
НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА И СИЛ ПРИ  
ШТАМПОВКЕ И ПРОКАТКЕ ЗАГОТОВОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

В настоящее время при анализе процессов обработки металлов давлением (ОМД) широкое распространение получили методы математического моделирования, основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Как правило, эти методы реализованы в виде пакетов прикладных программ, которые нашли применение и при анализе технологий деформирования заготовок железнодорожных колес [1–5 и др.]. Вместе с тем, в технической литературе недостаточно освещена проблема оценки точности получаемых результатов моделирования и степени их соответствия данным экспериментальных исследований процессов штамповки и прокатки заготовок колес.

В современных технологиях изготовления колес, применяемых на предприятиях ведущих мировых производителей колес [6, 7], предусмотрено обязательное использование точных по массе исходных заготовок (максимальное различие заготовок по массе не более 1 %), получаемых путем порезки слитков или непрерывнолитых заготовок дисковыми пилами. Используемые при этом способы деформирования заготовок позволяют получать точные и стабильные размеры черновых колес. Очевидно, что целесообразность применения методов конечно-элементного моделирования для анализа таких технологий будет определяться точностью прогноза формоизменения металла и силовых параметров при штамповке и прокатке заготовок колес.

Современные программные комплексы конечно-элементного моделирования обладают, как правило, широким набором функциональных возможностей. Однако, при работе с ними не исключена возможность получения неадекватных и, в ряде случаев, некорректных решений, противоречащих закономерностям анализируемых процессов, установленным экспериментальным путем. Причем, факты получения негативных результатов конечно-элементного моделирования вовсе не говорят о несостоятельности такого подхода к решению краевых задач ОМД и, соответственно, используемых пакетов программ. Они лишь указывают на необходимость учета специфики исследуемых технологических процессов при выборе параметров конечно-элементной модели, способа задания краевых условий и настроек расчета.

Целью настоящей работы является определение степени влияния параметров конечно-элементных моделей процессов деформирования заготовок железнодорожных колес на точность расчета формоизменения металла и силовых параметров.

Прежде всего, следует отметить, что в состав прессопрокатных линий по производству железнодорожных колес входят, как правило, от двух до четырех прессов и колесопрокатный стан вертикального или горизонтального типа. Заготовка при этом может находиться на линии 5 минут и более, а время пауз между двумя последовательными операциями горячего деформирования может составлять больше 10 секунд. Очевидно, что в таких условиях деформации на величину напряжения текучести металла ( $\sigma_T$ ) наряду с процессами упрочнения существенное влияние должны оказывать процессы разупрочнения. Опираясь на результаты экспериментальных исследований по изучению влияния условий деформации на величину  $\sigma_T$  сталей [8–13], а, также учитывая продолжительность пауз между операциями деформирования и температуру металла (1000–1250 °С), можно с достаточной степенью точности утверждать, что деформационное упрочнение металла за одну операцию частично снимается в результате динамической рекристаллизации и окончательно, – в результате статической рекристаллизации, протекающей в заготовке во время междеформационных пауз.

Проведенные авторами теоретические исследования процессов штамповки и прокатки заготовок колес показали, что накопленная деформация в отдельных элементах заготовки может достигать 1 и более за один технологический переход. Выполненные для колесной марки стали расчеты позволили установить, что если не учитывать разупрочнение металла в результате динамической рекристаллизации, то значение  $\sigma_T$  при температуре 1000–1250 °С и степени деформации 0,5–0,8 будет завышено в среднем на 10–25 %, в зависимости от скорости деформации (рис. 1). При экстраполяции значений  $\sigma_T$  в направлении повышения степени деформации вышеуказанная величина завышения также будет увеличиваться. При моделировании это приводит к существенному превышению расчетной силы деформирования над экспериментально зафиксированной ее величиной в условиях опытно-промышленного производства колес. Причем, это в том случае, когда в качестве исходных данных задаются скорости или перемещения инструмента деформации.

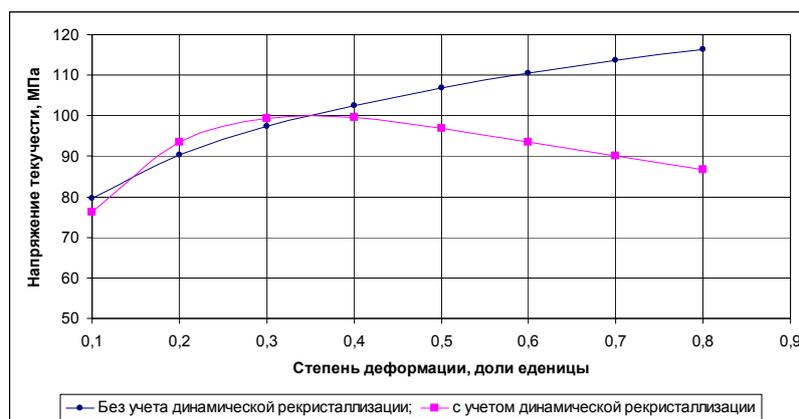


Рис. 1. Расчетные кривые течения стали колес марки 2 (ГОСТ 10791-2004) при температуре 1100 °С и скорости деформации 5 с<sup>-1</sup>

Когда же в качестве исходных данных задают закон изменения сил, действующих на заготовку со стороны инструмента деформации, то результаты расчета покажут конечное формоизменение заготовки, не соответствующее данным экспериментальных замеров заготовок. Причина такого несоответствия – достигнутый при моделировании предел по силе деформирования. Например, при моделировании процесса штамповки заготовки под прокатку будет иметь место неудовлетворительное заполнение полостей формовочных штампов при толщине диска у ступицы больше требуемой.

При моделировании процесса прокатки заготовок использование завышенных значений  $\sigma_T$  приводит к невыполнению размеров чернового колеса, прежде всего по величине его раскатки по диаметру. То есть, в этом случае сил прокатки будет недостаточно, чтобы реализовать при моделировании имеющие место на практике радиальные и осевые обжатия заготовки при тех же температурно-скоростных параметрах процесса. Естественно, что такие результаты моделирования, не будут адекватно отражать закономерности реальных процессов деформации заготовок колес.

Существенное влияние на величину напряжения текучести металла (а, следовательно, и на параметры формоизменения) также оказывает химический состав стали колес, марочный сортамент которой постоянно претерпевает изменения. Поэтому при создании конечно-элементной модели, необходим учет влияния процентного содержания элементов в стали (в том числе примесей) на величину  $\sigma_T$ .

Важное значение при моделировании имеет размер используемых элементов сетки в поверхностных слоях заготовки. Зачастую элементы с размером ребра более 5 мм не могут качественно описать контур сечения заготовки колеса, в особенности на последних стадиях ее формообразования (рис. 2). Использование крупной конечно-элементной сетки кроме

неудовлетворительного описания формоизменения отдельных элементов заготовки приводит к изменению объема заготовки, как в целом, так и по отдельным ее элементам. Причем указанное изменение объема может наблюдаться и в меньшую сторону и в большую. Следовательно, при разбиении заготовки сеткой конечных элементов имеет место искусственное перераспределение объема металла по элементам заготовки, которое уже не будет соответствовать исходному его распределению, заложенному при расчете калибровки.

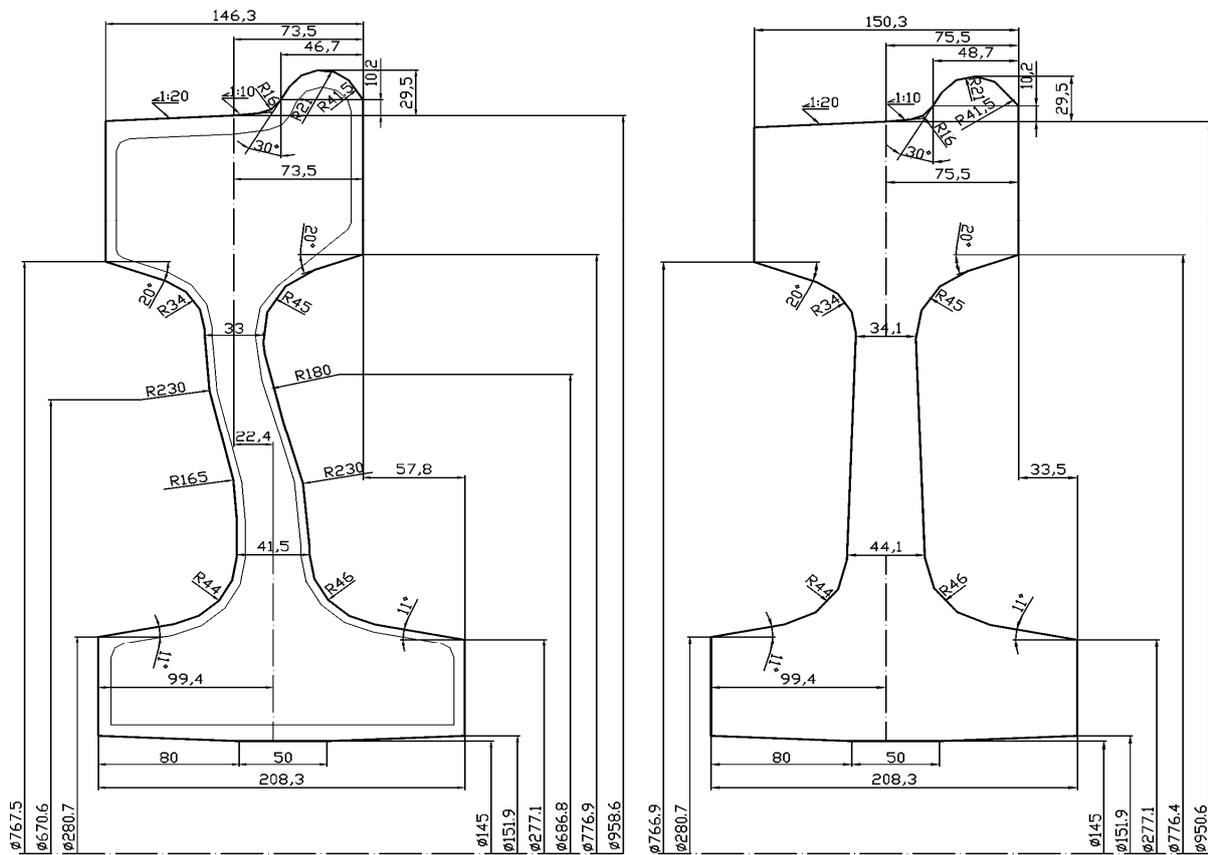
При использовании МКЭ для анализа процессов ОМД колебания объема деформируемой заготовки – это характерное явление. При моделировании процессов деформирования заготовок железнодорожных колес эти колебания необходимо обязательно учитывать. Выполненные авторами расчеты показали, что если на каждом этапе моделирования отдельно взятой операции деформирования (которых может быть больше трех) пренебрегать указанными выше колебаниями объема, то на заключительной стадии формообразования масса заготовки колеса может измениться более чем на 5 кг. Естественно, что полученные в этом случае результаты моделирования будут малопригодны для анализа формоизменения металла при штамповке и прокатке точных по массе заготовок.

Помимо вышесказанного, относительно большой размер элементов контактного слоя заготовки может явиться причиной проскальзывания приводных прокатных валков по поверхности заготовки даже при задании больших значений напряжения контактного трения, вплоть до величины предела текучести деформируемого металла на сдвиг. Отмеченные здесь проблемы при использовании МКЭ для моделирования процессов деформирования заготовок колес могут быть устранены путем измельчения сетки конечных элементов, по крайней мере, поверхностного слоя заготовки. Степень измельчения и глубина данного слоя в каждом конкретном случае определяются из практических соображений с учетом многопереходности процесса формообразования черного колеса.

Ответственным этапом создания конечно-элементной модели является задание условий контактного взаимодействия заготовки колеса с инструментом деформации. Выполненные авторами исследования показали, что величину напряжения трения ( $\tau$ ) целесообразно задавать как часть от напряжения текучести контактного слоя металла на сдвиг ( $K$ ), поскольку использование моделей трения, основанных на определении  $\tau$  в зависимости от величины контактного давления ( $p$ ), приводит к искусственному завышению  $\tau$  до величины  $K$  и более. Это может иметь место при моделировании, как операций штамповки, так и прокатки заготовок, отдельные этапы которых, в силу различных причин, характеризуются высокими значениями  $p$ .

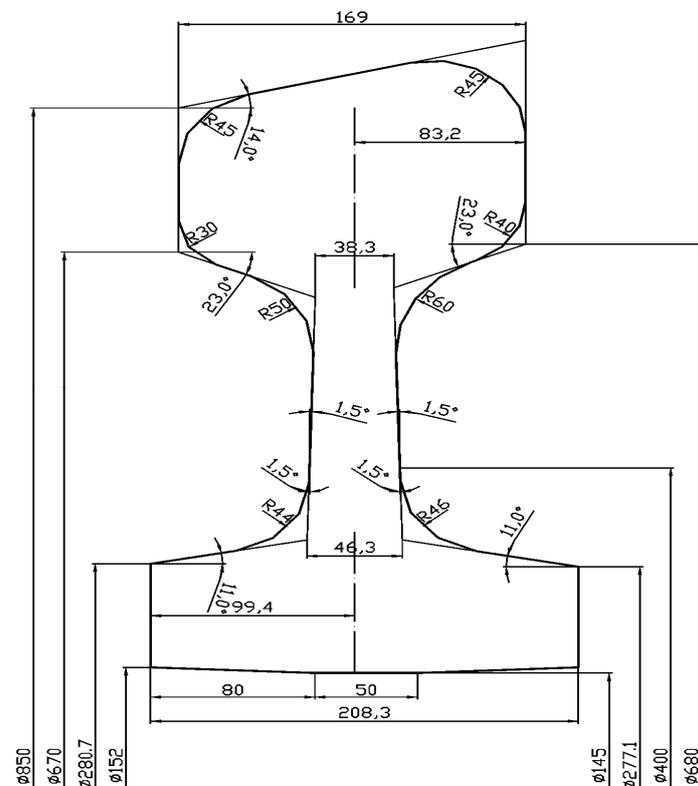
Принципиальное значение при моделировании процессов деформирования заготовок колес имеет точность воспроизведения скоростных параметров процессов штамповки и прокатки, от которых в известной степени зависят силовые параметры и параметры формоизменения металла. С целью изучения данного вопроса авторами проведен ряд исследований. С одной стороны был произведен анализ силовых и скоростных параметров штамповки и прокатки заготовок железнодорожных колес на основе экспериментальной информации, полученной в условиях промышленного производства колес [14–16]. Параллельно выполнялись работы по конечно-элементному моделированию процессов осадки, разгонки, формовки в штампах и прокатки заготовок колес с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой, как при деформации, так и во время междеформационных пауз. Выполненные исследования показали следующее.

При моделировании процесса прокатки адекватность воспроизведения частных радиальных и осевых обжатий заготовки колеса находится в прямой зависимости от характера изменения сил прокатки и числа оборотов заготовки при прокатке, задаваемых в качестве исходных данных. Также было установлено, что наиболее точного учета скоростных параметров штамповки и прокатки можно добиться путем задания краевых условий задачи на основе экспериментальной информации об изменении давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах рабочего хода прокатных валков (подвижных траверс прессов) и изменении числа оборотов приводных валков в зависимости от времени.



а

б



в

Рис. 2. Калибровка по металлу для штамповки и прокатки колес  $\varnothing 918$  мм:

а – профиль черного колеса с вписанным в него контуром чистового колеса (калибровка для выгибного пресса); б – калибровка для колесопрокатного стана; в – калибровка для формовочного пресса

## ВЫВОДЫ

Таким образом, на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено влияние основных параметров конечно-элементных моделей, а также способа задания краевых условий на точность расчета формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок колес. Показано, что вносимые при создании моделей упрощения решаемой задачи могут приводить к существенным искажениям результатов расчета, делая их малоприменимыми для практического использования при анализе технологий деформирования заготовок железнодорожных колес.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кушнарев А. В. Совершенствование технологии производства железнодорожных колес на основании математического моделирования процесса формоизменения металла при штамповке / А. В. Кушнарев, А. А. Богатов, А. А. Киричков // *Современные технологии производства транспортного металла: материалы конференции «Трансмет – 2007»*. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2008. – С. 253–255.
2. Моделирование формоизменения металла и силы при штамповке колесных заготовок / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, А. С. Волков [и др.] // *Наукові праці ДонНТУ. Металургія. Випуск 102*. – Донецьк, ДонНТУ, 2005. – С. 124–135.
3. Совершенствование технологии штамповки заготовок железнодорожных колес с помощью математической модели / А. А. Миленин, В. Н. Данченко, А. В. Шрамко [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 6. – С. 33–37.
4. Гольшиков Р. Оптимизация технологических процессов колесопрокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM / Р. Гольшиков, А. Латаев, А. Харламов // *САПР и графика*. – 2006. – № 7. – С. 73–75.
5. Гольшиков Р. А. Исследование процесса производства железнодорожных колес методом конечных элементов / Е. В. Галкин, А. А. Харламов, Р. А. Гольшиков // *Металлургия машиностроения*. – 2008. – № 3 – С. 21–25.
6. ОАО «Нижеднепровский трубопрокатный завод» в свете современных мировых тенденций развития производства железнодорожных колес / А. И. Козловский, В. П. Есаулов, А. В. Шрамко [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 1. – С. 8–13.
7. Копперс У. Производство железнодорожных колес на высоком техническом уровне / У. Копперс, М. Куни, М. Линденблатт // *Черные металлы*. – 2006. – № 3. – С. 75–79.
8. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
9. Андреев Л. В. Об учете упрочнения стали при дробной деформации / Л. В. Андреев, А. А. Гурков, Г. Г. Тюленев // *Сталь*. – 1972. – № 9. – С. 245–246
10. Солод В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Металл и литейные Украины*. – 2006. – № 7–8. – С. 52–56.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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 : ДДМА, 2006. – С. 302–306.
15. Снитко С. А. Метод совершенствования калибровок, освоенных в условиях промышленного производства штампованно-катаных колес / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, Н. И. Ивлева // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 211–216.
16. 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.

Снитко С. А. – канд. техн. наук, доц. ГВУЗ ДонНТУ;

Дужуржи А. А. – магистр ГВУЗ ДонНТУ.

ГВУЗ ДонНТУ – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

E-mail: omd@fizmet.dgtu.donetsk.ua