

УДК: 621.771.294.04: 539.4

А. И. Бабаченко /д. т. н./, Е. Г. Дёмина /к. т. н./,
А. В. Кныш /к. т. н./

Институт чёрной металлургии
им. З. И. Некрасова НАН Украины,
г. Днепро, Украина
e-mail: a_babachenko@mail.ru

А. Н. Головко /д. т. н./

Ганноверский университет им. Лейбница,
Институт материаловедения,
г. Ганновер, Германия
e-mail: golovko@iw.uni-hannover.de

А. В. Ашкелянц /к. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина
e-mail: ashkelianets@gmail.com

Влияния параметров исходных заготовок для производства железнодорожных колёс на процесс горячей пластической деформации

О. І. Babachenko /Dr. Sci. (Tech.)/,
К. G. Domina /Cand. Sci. (Tech.)/
А. V. Knysh /Cand. Sci. (Tech.)/

Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the
National Academy of Science of Ukraine,
Dnipro, Ukraine
e-mail: a_babachenko@mail.ru

О. N. Golovko /Dr. Sci. (Tech.)/

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover,
Institut of Materials Science, Hannover, Germany
e-mail: golovko@iw.uni-hannover.de

А. V. Ashkelianets /Cand. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine,
Dnipro, Ukraine
e-mail: ashkelianets@gmail.com

The influence of parameters of an incoming billet for the manufacturing of railway wheels on the hot plastic deformation process

Цель. С помощью компьютерного моделирования процесса горячей пластической деформации определить влияние фактора формы H/D исходных заготовок на распределение накопленной деформации в объёме колёсных заготовок и положение осевой некачественной зоны их макроструктуры.

Методика. Математическое моделирование течения металла на основных стадиях процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок – осадки, разгонки и штамповки – выполнено с помощью программного обеспечения «Forge 3».

Результаты. С помощью компьютерного моделирования процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок $\varnothing 360 - 520$ мм и фактором формы $H/D = 0,5 - 1,6$ выполнена оценка деформированного состояния металла в объёме изделий. Определено, что оптимальной исходной заготовкой для производства железнодорожных колёс $\varnothing 957$ мм является заготовка $\varnothing 450$ мм ($H/D = 0,84$), применение которой обеспечит хорошую проработку металла обода (величина накопленной деформации порядка 85 %) и диска (величина накопленной деформации порядка 92 %) и исключит попадание отдельных дефектов макроструктуры в элементы колёс.

Научная новизна. Впервые показано влияние геометрических параметров исходной заготовки на распределение степени накопленной деформации и положение осевой некачественной зоны их макроструктуры в колёсных заготовках после горячей пластической деформации. Установлено, что при факторе формы колёсных заготовок (H/D), равном 0,73, 0,84 и 1,11, степень накопленной деформации в ободу колёс изменяется незначительно и составляет порядка 85 %.

Практическая значимость. Показано, что оптимальной исходной заготовкой для производства железнодорожных колёс $\varnothing 957$ мм является заготовка $\varnothing 450$ мм ($H/D = 0,84$), применение которой обеспечит хорошую проработку металла обода (величина накопленной деформации порядка 85 %) и диска (величина накопленной деформации порядка 92 %) и исключит попадание отдельных дефектов макроструктуры центральной зоны слитков в элементы колёс. (Илл. 5. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.)

© А. И. Бабаченко /д. т. н./, Е. Г. Дёмина /к. т. н./, А. В. Кныш /к. т. н./, А. Н. Головко /д. т. н./, А. В. Ашкелянц /к. т. н./, 2016 г.

Ключевые слова: колёсная заготовка, фактор формы, компьютерное моделирование, горячая пластическая деформация, макроструктура.

Состояние вопроса. В настоящее время для достижения всё ужесточающихся требований к уровню эксплуатационных и служебных свойств железнодорожных колёс необходима оптимизация технологии их производства не только на стадии выплавки стали и термической обработки, но и в процессе горячей пластической деформации колёсной заготовки [1; 2].

Технологический процесс изготовления вагонных цельнокатаных колёс предусматривает несколько стадий деформирования заготовок, которое носит специфический характер, сочетая в себе элементы штамповки и прокатки.

Основные стадии формоизменения исходной литой заготовки при производстве колёс следующие:

- 1) получение плоской круглой заготовки (иногда уже с прошитым в центре отверстием);
- 2) формовка колёсной заготовки, близкой по конфигурации к готовому колесу (эта заготовка отличается от прокатанного колеса лишь формой и размерами обода);
- 3) прокатка колёсной заготовки;
- 4) выгибка диска и калибровка обода по ширине.

Такая схема деформации является наиболее рациональной [3]. Дальнейшее совершенствование технологии возможно лишь при подробном изучении течения металла при деформации, что поможет определить пути улучшения качества колёс.

Известно, что механические характеристики металла изделия определяют его служебные свойства и зависят от формируемой структуры в процессе его изготовления. Одним из основных факторов, влияющих на них, является степень деформации [4]. Повысить степень деформации колёсной заготовки можно за счёт изменения геометрических параметров исходного слитка – фактора формы H/D (где H – высота заготовки, а D – её диаметр [5]).

В работе [2] показано, что повышение степени деформационной проработки обода железнодорожного колеса (возрастание величины накопленной деформации) за счёт уменьшения диаметра исходной заготовки при горячей пластической деформации приводит к формированию более плотной дендритной структуры. Также горячая деформация уменьшает устойчивость аустенита в перлитной области и увеличивает скорость перлитного превращения, в результате чего образуется мелкое рекристаллизованное перлитное зерно. Интенсифицирующее влияние горячей деформации на перлит-

ное превращение проявляется тем сильнее, чем выше степень обжатия [6]. Это оказывает положительное влияние как на статические характеристики прочности и пластичности, так и на служебные характеристики железнодорожных колёс (ударную вязкость и вязкость разрушения K_{1c}).

В настоящее время, наряду с традиционными методами оценки деформированного состояния, используется метод конечных элементов (МКЭ), в частности программа «Forge3» фирмы «Transvalor» (Франция).

С его помощью уже был успешно решён ряд задач, связанных с особенностями процесса осадки и штамповки образцов цилиндрической формы [7–10].

Цель данного исследования заключалась в том, чтобы с помощью компьютерного моделирования процесса горячей пластической деформации определить влияние фактора формы H/D (отношение исходного диаметра заготовки к её высоте) исходных заготовок на распределение накопленной деформации в объёме колёсных заготовок и положение некачественной осевой зоны их макроструктуры.

Материал и методика исследований. Для компьютерного моделирования был выбран процесс изготовления железнодорожных колёс диаметром $\varnothing 957$ мм с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791-2011).

Математическое моделирование течения металла на основных стадиях процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок – осадки, разгонки и штамповки – выполнено с помощью программного обеспечения «Forge3». Исходные данные для моделирования технологических переходов формоизменения колёсных заготовок приведены в табл. 1.

Результаты исследований. При разработке технологии производства железнодорожных колёс одной из актуальных задач является выбор оптимального диаметра исходной заготовки с одновременным учётом особенностей её затвердевания и последующей деформации.

Технологические схемы горячего деформирования при производстве колёс, используемые на различных предприятиях, отличаются, как правило, рядом особенностей, связанных со специфическими условиями, присущими каждому из этих предприятий. При этом схема деформирования заготовок включает предварительную осадку для удаления окалина с боковой поверхности; осадку в кольце; разгонку металла пуансоном для требуемого распределения его

Параметры исходных колёсных заготовок для математического моделирования процесса горячей пластической деформации

№ п/п	Диаметр (D), мм	Высота (H), мм	Масса, кг	Отношение H / D	Диаметр колеса Ø, мм	Зона распространения осевой пористости (1 балл - 10% D _{нпз})*, мм
1	520	295	465	0,57	957	52,0
2	485	320		0,66		48,5
3	470	345		0,73		47,0
4	450	380		0,84		45,0
5	410	454		1,11		41,0
6	360	588		1,63		36,0

между отдельными элементами колеса; окончательную формовку ступицы и прилегающей к ней части диска, предварительную формовку обода и другой части диска, прокатку обода и прилегающей к нему части диска на прокатном стане; выгибку диска и калибровку размеров колеса; прошивку отверстия в ступице.

Анализируя различные виды обработки давлением, сочетание которых применяется при изготовлении цельнокатаных колёс, весьма важно установить степень проработки металла (величину деформации) на том или ином этапе обработки. Имея представления о распространении деформации, можно судить о степени участия того или иного инструмента в рассматриваемом процессе, а также стремиться обеспечить наилучшую проработку металла во всех элементах колёс.

Осаживание цилиндрического или близкого по своим очертаниям к цилиндру тела достаточно хорошо исследовано авторами работы [3]. Исследованиями установлено, что наличие сил трения на поверхностях контакта приводит к неравномерному распределению деформации по объёму тела при его осадке. Деформируемый объём разбивается на три области (рис. 1). В области 1 деформация затруднена вследствие влияния сил трения. Область 2 представляет область наиболее интенсивной деформации. Линии течения в этой области расположены

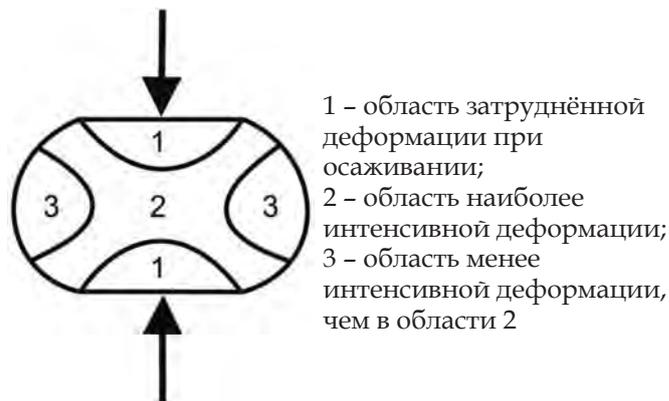


Рис. 1. Деформируемость металла при осаживании

наиболее выгодным образом к направлению действия сжимающих сил, т. е. под углом 45° или близким к нему. Наконец, степень деформации в области 3 меньше, чем в области 2.

Осаживание характеризуется разноимённой схемой деформации. По одной из главных осей (вертикальной) имеет место сжатие, а по двум другим - по радиальному и тангенциальному - удлинение. При осаживании наличие сил трения вызывает объёмное напряжённое состояние, которое можно охарактеризовать схемой всестороннего неравномерного сжатия (рис. 2). Высота диска, получаемого при осаживании заготовок, определяется размером диаметра калибровочного кольца, который назначается на ос-

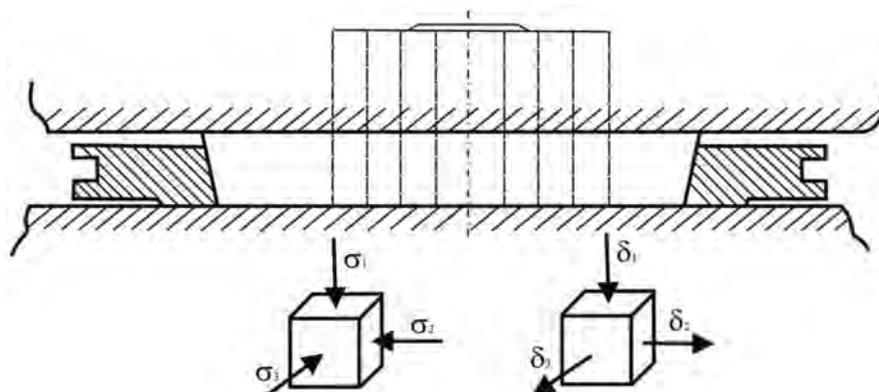


Рис. 2. Схема деформированного и напряженного состояния при осаживании заготовки

нове условно допустимой высоты деформации, с одной стороны, и ограничивается размерами штампов, применяемых при формовке колёсной заготовки, с другой.

Характер течения металла, т. е. распределение отдельных зон исходных заготовок в элементах (диск, ступица, обод) колеса связан главным образом с отношением высоты исходной заготовки к её диаметру (H/D). При осадке цилиндрических заготовок напряжённо-деформированное состояние зависит от фактора формы следующим образом: 1) $H/D < 0,3 \div 0,4$ – имеет место на боковой поверхности одинарное бочкообразование, на значительной части контактной поверхности развивается скольжение, а практически весь объём поковки находится в условиях всестороннего сжатия; 2) $0,3 \div 0,4 < H/D < 1,5 \div 2,0$ – на боковой поверхности также имеет место одинарное бочкообразование, однако почти вся контактная поверхность представляет собой зону прилипания, а схема объёмного неравномерного сжатия выражена менее резко; 3) $H/D > 1,5 \div 2,0$ – характерны двойное бочкообразование на боковой поверхности и зона прилипания на контактных поверхностях, а трёхстороннее неравномерное сжатие имеет место не во всём объёме заготовки, в середине её высоты металл находится под действием линейного напряжённого состояния сжатия. В зависимости от значения фактора формы принято классифицировать заготовки как низкие, умеренной высоты и высокие соответственно [5].

Ранее, например, в условиях ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ», железнодорожные колёса $\varnothing 957$ мм производили из слитков диаметром 520 мм, отлитых в изложницы. После порезки слитка на заготовки их фактор формы находился в пределах 0,4–0,6, т. е. заготовки, используемые при производстве этих изделий, находятся на границе между низкими и умеренно высокими. Обычно высоту заготовки после осадки принимают равной 105–110 мм. Ориентируясь на эти данные, можно определить, что величина высотной деформации при осадке колёсных заготовок находилась в пределах 63–65 % для колёс $\varnothing 957$ мм.

Последующая формовка заготовки является наиболее сложной из штамповочных операций, осуществляемых в прессо-прокатном отделении. Сложность этой операции определяется необходимостью получения окончательных размеров ступицы и диска в фигурных штампах. Штампы формовочного прессы образуют две кольцевых конических полости, расположенные концентрично у центра и по периферии штампов. При этом заполнением центральной кониче-

ской полости образуется ступица, а наружной полости – обод. В результате обжатия диска в штампах формовочного прессы получается заготовка сложной конфигурации, напоминающая по форме колесо.

С целью исследования влияния параметров исходной непрерывнолитой заготовки (соотношение размера заготовки H/D) на особенности её горячей пластической деформации, а именно степень прорабатываемости обода колеса, который формируется из зоны слитка 3 (рис. 1) в работе проведено компьютерное моделирование процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок.

На рис. 3 показаны результаты моделирования процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок после осадки в кольце и разгонки центральной части пуансоном на прессы усилием 5 000 т и последующей формовки заготовки на прессы усилием 10 000 т, где достигается максимальная степень накопленной деформации в элементах железнодорожного колеса. Именно эти операции оказывают основное влияние на проработку структуры в средних слоях заготовки. Прокатка, выгибка диска, калибровка обода по ширине придают колесу только окончательную форму и геометрические размеры и не приводят к существенному накоплению деформации.

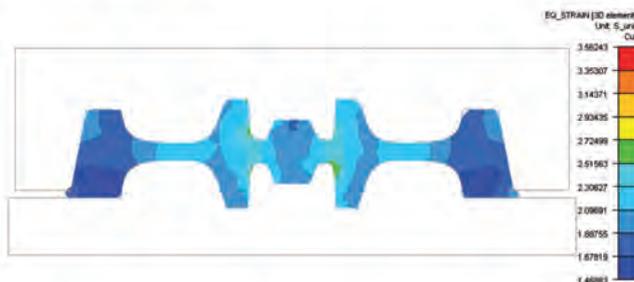
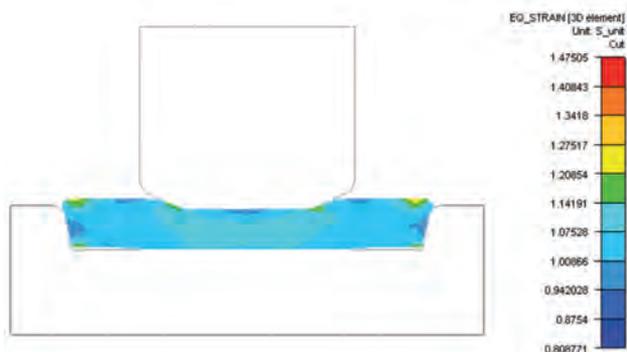
Как показал анализ полученных данных (рис. 4–5), максимальная проработка периферийной зоны заготовки, из которой в последующем будет сформирован обод железнодорожного колеса, происходит на стадии осадки и разгонки на прессы 5 000 т. Накопленная степень деформации в данной зоне находится в пределах от 57 % для заготовки размером ($D \times H$) 520 × 295 мм до 72 % для заготовки размером 360 × 588 мм (рис. 5). Очевидно, что с уменьшением соотношения H/D степень прорабатываемости металла элементов колёс снижается. Однако данная зависимость имеет нелинейный характер, и её интенсивность снижается по мере уменьшения отношения H/D , и при величинах соотношения высоты к диаметру ниже 0,73 она практически не изменяется.

После формовки на прессы усилием 10 000 т степень деформации отдельных частей колёсной заготовки различна (рис. 3). Но, несмотря на разный фактор формы (H/D) анализируемых заготовок, распределение накопленной деформации между элементами колеса имеет общую тенденцию – металл, образующий обод, претерпевает наименьшую деформацию в отличие от ступицы и особенно диска. На данном этапе накопленная деформация увеличивается в среднем на 20 %, и в основном это происходит

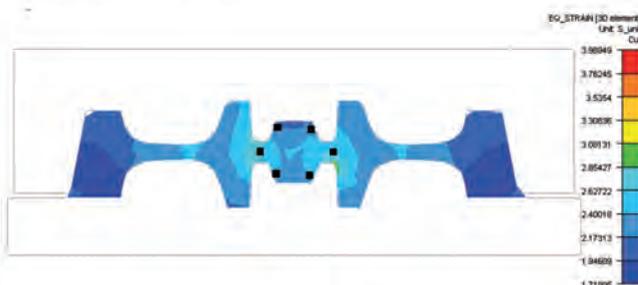
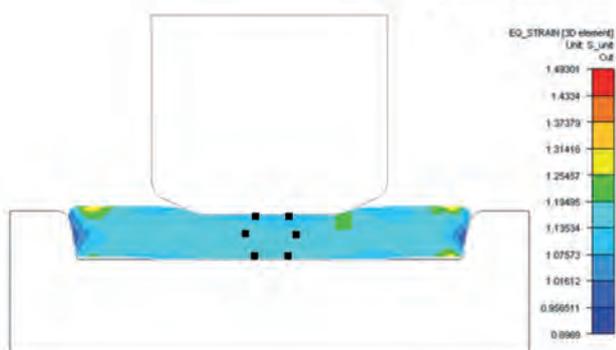
После прессы 5 000 т

После прессы 10 000 т

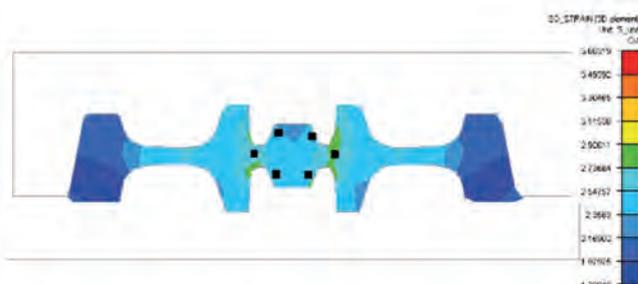
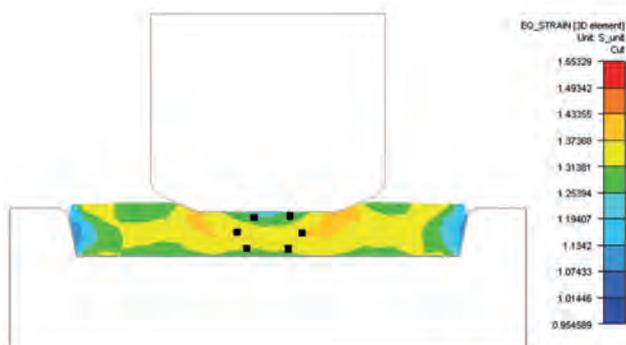
Заготовка 520 × 295 мм (H / D = 0,57)



Заготовка 485 × 320 мм (H / D = 0,66)



Заготовка 450 × 380 мм (H / D = 0,84)



Заготовка 360 × 588 мм (H / D = 1,63)

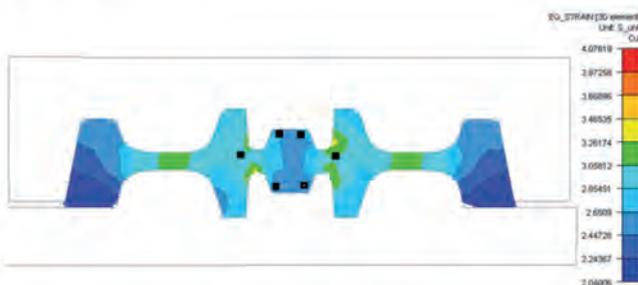
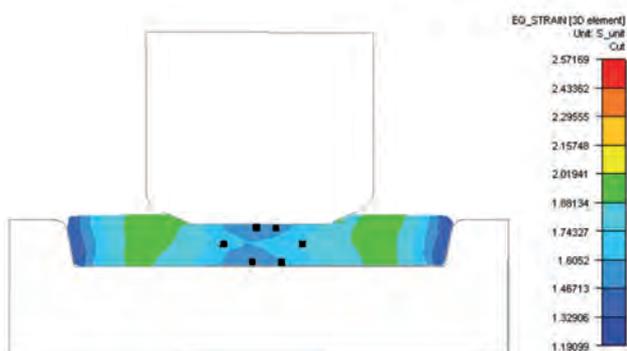


Рис. 3. Распределение накопленной степени деформации колёсных заготовок различного диаметра после осадки в кольцо и разгонки центральной части пуансоном на прессе усилием 5 000 т и последующей формовки на прессе усилием 10 000 т

за счёт перераспределения металла в процессе заполнения штампа из области диска колеса (рис. 5).

Естественно, что с увеличением фактора формы $H/D > 1,5$ исходной заготовки накопленная степень деформации достигает максимальных значений во всех элементах колеса. Однако использование заготовки с размерами 360×588 мм в реальных производственных условиях сопровождается целым рядом затруднений. Например, в связи с продольной неустойчивостью заготовок диаметром 360 мм их осадку необходимо проводить в специальном контейнере [5]. Поэтому использование для серийного производства железнодорожных колёс высоких заготовок является нетехнологичным и не может быть принято для промышленного внедрения.

Таким образом, с учётом особенностей процесса горячей деформации показано, что исходные заготовки, фактор формы которых находится в пределах $0,3 \div 0,4 < H/D < 1,5 \div 2,0$, обеспечивают нормальные условия деформации, хорошую проработку не только центральной, но и периферийной зоны и являются оптимальными для производства железнодорожных колёс.

Кроме обеспечения максимально возможной проработки металла всех элементов колеса, при выборе оптимального диаметра колёсной заготовки существует другой важный момент, связанный с особенностями её макроструктуры. Нужно стремиться к тому, чтобы в процессе горячей пластической деформации участки центральной некачественной зоны литой заготовки за счёт течения металла не попадали в ступицу и тем более в диск колеса [11; 12].

В требованиях нормативно-технической документации по производству колёс (ТУ У 27.1 – 23365425 – 663: 2011 «Заготовка непрерывнолитая круглая для производства колёсобандажной продукции») сказано, что осевая пористость и осевая ликвация не должны превышать 2 балла по СОУ МПП 77.040 – 191: 2007 «Заготовка непрерывнолитая для производства сортового проката и трубных заготовок. Метод контроля макроструктуры», или 15 и 25 % диаметра исходной заготовки соответственно.

В данной работе при моделировании процесса деформации заготовок с различным соотношением H/D на модели заготовки граница зоны осевой пористости и осевой ликвации, степень развития которой составляет 1 балл по СОУ МПП 77.040 – 191: 2007 (табл. 1), была отмечена маркерами. По перемещению маркеров в процессе деформации колёсных заготовок оценили вероятность попадания данных дефектов в готовое изделие (рис. 3).

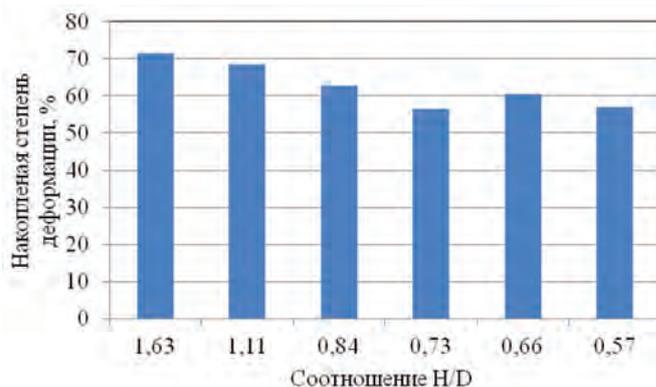


Рис. 4. Накопленная степень деформации заготовки после прессы 5 000 т в периферийной зоне (зоне обода колеса)

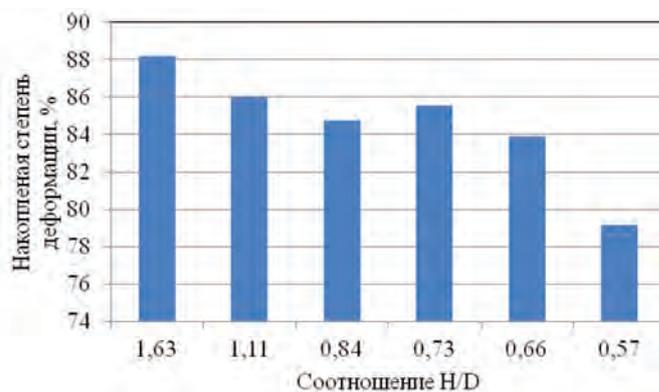


Рис. 5. Накопленная степень деформации заготовки после прессы 10 000 т в зоне обода колеса

На основании результатов компьютерного моделирования процесса деформации колёсных заготовок с разным фактором формы H/D можно сделать вывод, что некачественная осевая зона в макроструктуре литых заготовок с фактором формы $0,5 < H/D < 1,0$ полностью концентрируется в выдавке и удаляется при прошивке технологического отверстия в ступице, а с фактором формы $H/D \geq 1,0$ даже при минимальном ($0,1 D_{исх.}$) диаметре этой зоны её следы попадают в тело ступицы. Это является недопустимым.

Таким образом, оптимальной исходной заготовкой для производства железнодорожных колёс $\varnothing 957$ мм является непрерывнолитая заготовка $\varnothing 450$ мм ($H/D = 0,84$), применение которой повысит степень проработки металла в процессе горячей пластической деформации и исключит попадание отдельных дефектов макростроения в элементы колёс.

Выводы

1. С помощью компьютерного моделирования процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок $\varnothing 360 - 520$ мм и фактором формы $H/D = 0,5 - 1,6$ выполнена оценка деформированного состояния металла в объёме изделий.

2. Показано, что уменьшение диаметра заготовки (от 520 до 360 мм) для производства железнодорожных колёс приводит к повышению степени прорабатываемости металла всех элементов колеса.

3. Определено, что некачественная осевая зона в макроструктуре литых заготовок с фактором формы $0,5 < H/D < 1,0$ полностью концентрируется в выдавке и удаляется при прошивке технологического отверстия в ступице, а с фактором формы $H/D \geq 1,0$ даже при минимальном ($0,1 D_{\text{исх.}}$) диаметре этой зоны её следы попадают в тело ступицы.

4. Оптимальной исходной заготовкой для производства железнодорожных колёс $\varnothing 957$ мм является заготовка $\varnothing 450$ мм ($H/D = 0,84$), применение которой обеспечит хорошую проработку металла обода (величина накопленной деформации порядка 85 %) и диска (величина накопленной деформации порядка 92 %) и исключит попадание отдельных дефектов макроструктуры центральной зоны слитков в элементы колёс.

Библиографический список / References

1. Узлов И. Г. Исследование влияния деформационной обработки колёсной заготовки на механические свойства железнодорожных колёс / И. Г. Узлов, А. И. Бабаченко, А. В. Шрамко [и др.] // *Металл и литьё Украины*. – 2005. – № 9–10. – С. 54–57.

Uzlov I. G., Babachenko A. I., Shramko A. V. *Issledovanie vliyaniya deformatsionnoj obrabotki kolyosnoj zagotovki na mehanicheskie svojstva zheleznodorozhnyh kolyos* [The research of the deformation treatment influence of a wheel billet on mechanical properties of railway wheels]. *Metal and foundry of Ukraine*. 2005, no. 9, pp. 54–57.

2. Узлов И. Г. Влияние размеров колёсной заготовки и режимов её горячей пластической деформации на служебные свойства железнодорожных колёс / И. Г. Узлов, А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр.* – Днепропетровск: Візіон, 2016. – Вып. 13. – С. 137–142.

Uzlov I. G., Babachenko A. I., Kononenko A. A. *Vliyanie razmerezov kolyosnoj zagotovki i rezhimov goryachej plasticheskoj deformatsii na sluzhebnyye svojstva zheleznodorozhnyh kolyos* [The influence of the wheel billet dimensions and the hot plastic deformation moods on the service properties of railway wheels]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chyornoj metallurgii*. Dnepropetrovsk, Vision, 2016, issue 13, pp 137–142.

3. Бибик Г. А. Производство железнодорожных колёс / Г. А. Бибик, А. М. Иоффе, А. В. Праздников. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.

Bibik G. A., Ioffe A. M., Prazdnikova A. V. *Proizvodstvo zheleznodorozhnyh kolyos* [Manufacturing of railway wheels]. Moscow, Metallurgy, 1982, 232 p.

4. Пачурин Г. В. Повышение долговечности металлоизделий / Г. В. Пачурин, В. В. Галкин, В. А. Власов. – LAP LAMERT Academic Publishing GmbH & Co Kg, 2012. – 174 с.

Pachurin G. V., Galkin V. V., Vlasov V. A. *Povyshenie dolgovechnosti metalloizdelij* [Improving the durability of metalware]. LAP LAMERT Academic Publishing GmbH & Co Kg, 2012, 174 p.

5. Генкин В. Я. Непрерывнолитые круглые заготовки / В. Я. Генкин, А. Т. Есаулов, М. И. Староселецкий [и др.]. – М.: Металлургия, 1984. – 143 с.

Genkin V. Ya., Esaulov A. T., Staroseletskij M. I. *Nepreryvnolitye kluglye zagotovki* [The continuously cast round billet]. Moscow, Metallurgy, 1984, 143 p.

6. Большаков В. И. Термическая обработка стали и металлопроката / В. И. Большаков, И. Е. Долженков, В. И. Долженков. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2002. – 271 с.

Bol'shakov V. I., Dolzhenkov I. E., Dolzhenkov V. I. *Termicheskaya obrabotka stali i metalloprokata* [The heat treatment of steel and metal-roll]. Dnepropetrovsk: Gaudeamus, 2002, 271 p.

7. Данченко В. Н. Оптимизация технологической схемы двухпроходной горячей штамповки железнодорожных колёс / В. Н. Данченко, А. В. Шрамко, А. В. Ашкелянец // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением* – 2010. – № 4. – С. 27–30.

Danchenko V. N., Shramko A. V., Ashkelianets A. V. *Optimisatsiya technologicheskoy chemy dvuxprohodnoj goryachej shtampovki zheleznodorozhnyh kolyos* [Optimization of the technological scheme of two-pass hot forming of railway wheels]. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2010, no. 4, pp. 27–30.

8. Ашкелянец А. В. Анализ процесса внедрения «врезного кольца» с последующей осадкой в подкладном кольце при производстве диска с уступом / А. В. Ашкелянец, В. Л. Чухлеб, В. Н. Данченко [и др.] // *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. – 2010. – № 43. – С. 108–113.

Ashkelianets A. V., Chuhleb V. L., Danchenko V. N. *Analiz protsessy vnedreniya "vreznogo ko`ltsa" s posleduyushchej osadkoj v prokladnom ko`tse pri proizvodstve diska s ustupom* [Analysis of the process of «incision ring» penetration with the subsequent upsetting in the backing ring in the production of disc ledge]. *Vestnik national'nogo tehničeskogo universiteta "KhPI"*. 2010, no. 43, pp. 108–113.

9. Данченко В. Н. Исследование влияния режимов деформирования при свободной осадке цилиндрического образца на степень его оваль-

ности / В. Н. Данченко В. Н., А. В. Ашкелянец, А. В. Шрамко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 6. – С. 47–49.

Danchenko V. N., Ashkelianets A. V., Shramko A. V. *Issledovanie vliyaniya rezhimov deformirovaniya pri svobodnoj osadke tsilindricheskogo obraztsa na stepen` ego oval`nosti* [Research of the modes deformation influence at «free forming» of cylindrical sample on the degree of ovality]. *Metallurgical and Mining Industry*. 2010, no. 6, pp. 47-49.

10. Ashkelianets A. Analyses of theoretic research of the ring tapered tool penetration with subsequent upsetting in the lining ring while manufacturing a disc with shoulder / A. Ashkelianets // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – № 4. – P. 70 – 75.

Ashkelianets A. *Analyses of theoretic research of the ring tapered tool penetration with subsequent upsetting in the lining ring while manufacturing a disc with shoulder*. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014, no. 4, pp. 70-75.

11. Отчёт о НИР ГР № (ЦНИИЧермет) 73018824. Разработка технологии непрерывной отливки заготовок для производства цельнокатаных колёс и отработка основных технологических узлов УНРС. – Рук-ль В. Я. Генкин. – Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И. П. Бардина (ЦНИИЧермет), Нижнетагильский металлургический комбинат (НТМК), Нижнеднепровский трубопрокатный завод им. К. Либкнехта (ЗКЛ), Научно-производственное объединение «Тулачермет» (НПО «Тулачермет»). – Москва – Тула – Днепропетровск – Нижний Тагил, 1975. – 102 с.

Genkin V. Ya. (head). *Otchyot o NIR GR № (TsNIIChermet) 73018824. Razrabotka tehnologii nepreryvnoj otlivki zagotovok dlya proizvodstva tsel`nokatanykh kolyos i otrabotka osnovnykh tehnologicheskikh uzlov UNRC* [Development of the continuous casting technology of billets for the solid-rolled wheels production and tryout of the basic technological components of the continuous casting machine of steel]. *Tsentral`nyj ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel`skij institut chyornoj metallurgii im. I. P. Bandina (TsNIIChermet), Nizhnetagil`skij metallurgicheskij kombinat (NTMK), Nizhnedneprovskij truboprokatnyj zavod im. K. Liebknehta (ZKL), Nauchno-proizvodstvennoe ob`edinie "Tulachermet"*. Moscow, Tula, Dnepropetrovsk, Nizhnij Tagil, 1975, 102 p.

12. Кузовков А. Я. Опыт производства железнодорожных колёс из непрерывнолитой заго-

товки / А. Я. Кузовков, Л. К. Фёдоров, А. А. Фетисов [и др.] // *Сталь*. – 1998. – № 6. – С. 12–13.

Kuzovkov A. Ya., Fyodorov L. K., Fetisov A. A. *Opyt proizvodstva zheleznodorozhnykh kolyos iz nepreryvnolitoj zagotovki* [Experience in the production of railway wheels of a continuous casting billet]. *Stal*. 1998, no. 6, pp. 12-13.

Purpose. *By the instrumentality of the computer simulation technique of the hot plastic deformation process to determine the effect of shape factor H / D of the incoming billets on distribution of cumulative degree of deformation and the unsound core zone location in volume of the wheel billets.*

Methodology. *The computer simulation technique of the process of flow of metal at the main stages of the hot plastic deformation process of wheel billets – upsetting, spread of billet and forming – has been performed with the software «Forge 3».*

Findings. *By the instrumentality of the computer simulation technique of the hot plastic deformation process of wheel billets $\varnothing 360 - 520$ mm with shape factor $H / D = 0,5 - 1,6$ the strained state estimate of metal in the volume of products has been performed. It has been defined that the optimal incoming billet for the railway wheels $\varnothing 957$ mm manufacturing is the billet $\varnothing 450$ mm ($H / D = 0,84$). Its use will provide good deformation of central layers of the wheel rim (the value of cumulative degree of deformation is about 85 %) and the disc (the value of cumulative degree of deformation is about 92 %) and exclude of ingress of some defects of macrostructure in elements of wheels.*

Originality. *For the first time the effect of geometrical parameters of the incoming billet on the distribution of cumulative degree of deformation and location of the unsound core zone of its macrostructure in the wheel billets after the hot plastic deformation process has been shown. It has been established that when the form factor of wheel billets (H / D) equals to 0.73, 0.84 and 1.11 the degree of cumulative deformation of wheel rims changes slightly and is about 85 %.*

Practical value. *It has been shown optimal incoming billet for the railway wheels $\varnothing 957$ mm manufacturing is the billet $\varnothing 450$ mm ($H / D = 0,84$). Its use will provide good deformation of central layers of the wheel rim (the value of cumulative degree of deformation is about 85 %) and the disc (the value of cumulative degree of deformation is about 92 %) and exclude of ingress of some defects of macrostructure in elements of wheels.*

Key words: *wheel billet, form factor, computer simulation technique, hot plastic deformation, macrostructure.*

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. З. Куцовой

Поступила 27.09.2016