

УДК: 621.771.294:539.2

Е.Г. Демина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА Ø 927 ММ

*Анотація.* Досліджено особливості течії металу та визначено ступінь деформаційного пророблення металу елементів залізничного колеса діаметром 927 мм з С-подібним диском в процесі гарячої пластичної деформації.

*Ключевые слова:* безперервнолита заготовка, суцільнокатані колеса, ступінь деформації, щільність дендритної структури

*Аннотация.* Исследованы особенности течения металла и определена степень деформационной проработки металла элементов железнодорожного колеса диаметром 927 мм с С-образным диском в процессе горячей пластической деформации.

*Ключевые слова:* непрерывнолитая заготовка, цельнокатаное колесо, степень деформации, плотность дендритной структуры

*Annotation.* In the process of hot plastic deformation features of the metal flow and degree of deformation of the metal of elements of the railway wheel diameter 927 mm with C-shaped disc have been defined and studied.

*Keywords:* continuous cast billet, all-rolled wheel, degree of deformation, density of dendritic structure

### Современное состояние вопроса

Для повышения эксплуатационной надежности железнодорожных колес существует два основных пути – совершенствование стали за счет улучшения ее качества и эффективности термической обработки и конструкции колеса. Вместе с тем освоение новых видов железнодорожных колес требует проведения детальных исследований влияния технологических параметров на качество и полуфабриката, и готовой металлопродукции.

Специфика горячей пластической деформации в технологическом процессе производства железнодорожных колес такова, что именно на данном этапе происходит наиболее интенсивное воздействие, как на форму, так и на структуру металла колесных заготовок. Поэтому для достижения все ужесточающихся требований к уровню механических и служебных свойств железнодорожных колес необходима оптимизация технологии их производства не только на стадиях выплавки, затвердевания и термической обработки стали, но и в процессе горячей пластической деформации колесной заготовки [1, 2].

### Анализ публикаций по теме исследования

Надежность и эксплуатационная долговечность железнодорожных колес определяется в основном уровнем свойств металла обода колеса – элемента, который непосредственно воспринимает все эксплуатационные воздействия от железнодорожного пути и подвергается переточкам для восстановления профиля катания после износа. Поэтому одним из

эффективных путей улучшения качества железнодорожных колес является повышение степени деформационной проработки обода железнодорожного колеса (возрастание величины накопленной деформации колесной заготовки) [3].

В работе [2] показано, что повышение степени деформационной проработки обода железнодорожного колеса (возрастание величины накопленной деформации) за счет 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 перлитное превращение проявляется тем сильнее, чем выше степень обжатия [4]. Это оказывает положительное влияние, как и на статические характеристики прочности и пластичности, так и на служебные характеристики железнодорожных колес (ударную вязкость и вязкость разрушения  $K_{Ic}$ ).

В настоящее время, наряду с традиционными методами оценки деформированного состояния, используется аналитический метод, основанный на методе конечных элементов (МКЭ) с помощью программы компьютерного моделирования «Forge3» фирмы «Transvalor» (Франция). С его помощью уже был успешно решен ряд задач, связанный с особенностями процесса осадки и штамповки образцов цилиндрической формы [5 – 8].

Изучение деформации слитков в металловедческом аспекте [9] позволило дать определение термину «прорабатываемость / проработка», под которым понимается раздробление дендритной структуры в процессе деформации исходного слитка, и по поведению неметаллических включений качественно и количественно судить о местных степенях деформации. Несмотря на комплексный подход, данный метод не является универсальным, поскольку его применение зависит от чистоты стали, распределения неметаллических включений в ее объеме, места отбора образцов по сечению слитка и позволяет получить ограниченное количество значений измерений.

#### **Формулирование цели и задач исследования**

Цель работы заключалась в том, чтобы с помощью компьютерного моделирования и металлографического анализа исследовать особенности течения металла и определить степень деформационной проработки металла элементов железнодорожного колеса диаметром 927 мм с С-образным диском в процессе горячей пластической деформации.

### Материал и методики исследования

Для компьютерного моделирования\* был выбран процесс изготовления железнодорожного колеса диаметром  $\varnothing 927$  мм с С-образным диском согласно EN 13262 «Железнодорожный транспорт. Колесные пары и тележки. Колеса. Требования к продукции».

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

Таблица 1

Параметры исходной колесной заготовки для математического моделирования процесса горячей пластической деформации

| Диаметр (D), мм | Высота (H), мм | Масса, кг | Отношение $H/D$ | Диаметр колеса $\varnothing$ , мм | Зона распространения осевой пористости (1 балл – 10 % $D_{\text{плз}}$ )*, мм |
|-----------------|----------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 450             | 380            | 465       | 0,84            | 957                               | 45,0                                                                          |

\*\*Примечание: согласно СОУ МПП 77.040 – 191: 2007 «Заготовка непрерывнолитая для производства сортового проката и трубных заготовок. Метод контроля макроструктуры».

Образцы для металлографического анализа вырезали в поверхностных слоях, на расстоянии S радиуса и в центральных слоях непрерывнолитой заготовки и из всех элементов колеса – обода, диска и ступицы. Схема вырезки образцов из колеса показана на рис. 1. Химический состав углеродистой стали марки ER 7 (EN 13262) приведен в таблице 2.

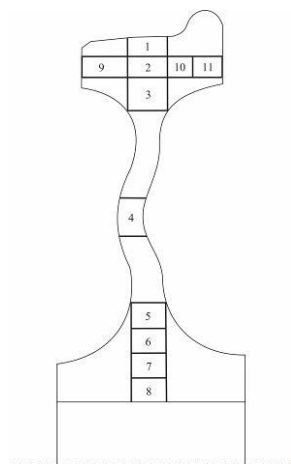


Рисунок 1 – Схема вырезки и маркировки образцов железнодорожного колеса  $\varnothing 927$  мм с С-образным диском для металлографического анализа

\* Компьютерное моделирование процесса деформации колесной заготовки выполнено доцентом кафедры обработки металлов давлением им. Академика А. П. Чекмарёва Национальной металлургической академии Украины, кандидатом техн. наук Ашкелянцем А. В.

**Таблица 2**

**Химический состав исследуемой стали**

| Диаметр<br>колеса, Ø,<br>мм | Марка<br>стали | Исходная<br>заготовка,<br>Ø, мм | Содержание основных элементов, % масс. |        |        |         |         |
|-----------------------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
|                             |                |                                 | C                                      | Mn     | Si     | P       | S       |
| 927                         | ER 7           | НЛЗ, 450                        | 0,48                                   | 0,73   | 0,29   | 0,008   | 0,005   |
| Требования EN 13262 (D)     |                |                                 | ≤ 0,52                                 | ≤ 0,80 | ≤ 0,40 | ≤ 0,020 | ≤ 0,015 |

Металлографические исследования выполнены на микроскопе «Axiovert 200 M MAT» и «Neophot 32» производства фирмы «Carl Zeiss», количественный анализ выполнен в программе «AxioVision 4.6.3» в полуавтоматическом режиме.

«Следы» дендритной структуры выявляли травлением в горячем растворе пикрата натрия [10]. Этот реактив выявляет химическую микронеоднородность кремния (дендритную ликвацию, твердофазную сегрегацию), приводя к потемнению участков с повышенным его содержанием. Для обеспечения более высокой точности результатов измерений, определение металлографических характеристик параметров «бывшей» дендритной структуры, в образцах из слитка и из непрерывнолитой заготовки, производили на шлифах, приготовленных в радиальной плоскости [11].

**Основная часть**

При разработке технологии производства железнодорожных колес одной из актуальных задач является выбор оптимального диаметра исходной заготовки с одновременным учетом особенностей ее затвердевания и последующей деформации. При этом схема деформирования колесных заготовок включает следующие операции: предварительную осадку для удаления окалина; осадку в кольце; разгонку пуансоном для требуемого распределения металла между 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 колес 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 колес.

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования процесса горячей пластической деформации колесной заготовки 450 × 380 мм (H / D = 0,84). Распределение степени накопленной деформации после осадки в кольце и разгонки центральной части пуансоном на прессе усилием 5 000 тонн и последующей формовки на прессе усилием

10 000 тонн показано на рисунке 3. Именно эти операции оказывают основное влияние на проработку структуры в срединных слоях заготовки. Прокатка, выгибка диска, калибровка обода по ширине придают колесу только окончательную форму и геометрические размеры, и не приводят к существенному накоплению деформации.

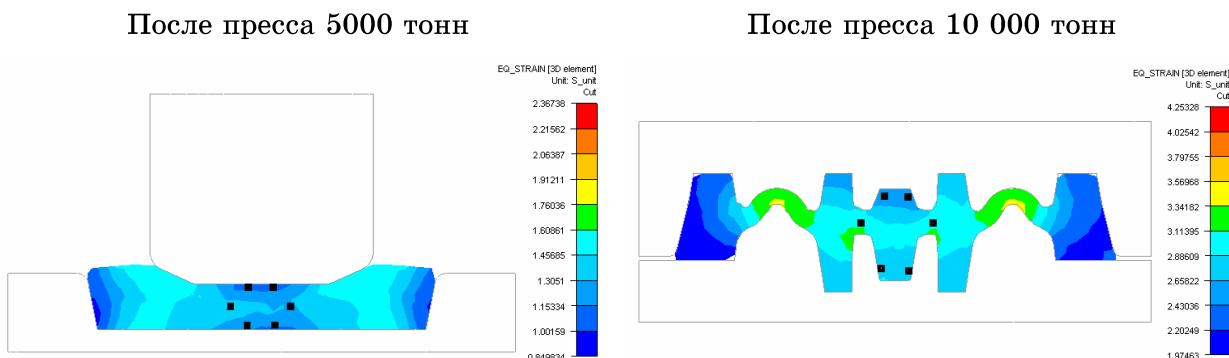


Рисунок 2 – Распределение накопленной степени деформации в колёсной заготовке  $450 \times 380$  мм ( $H / D = 0,84$ ) после осадки в кольцо и разгонки центральной части пуансоном на прессе усилием 5 000 тонн и последующей формовки на прессе усилием 10 000 тонн

Как показал анализ полученных данных, максимальная проработка периферийной зоны заготовки, из которой в последующем будет сформирован обод колеса, происходит на стадии осадки и разгонки на прессе 5 000 тонн. Накопленная степень деформации в данной зоне в относительную находится в пределах от 57 % до 77 %. Очевидно, что с уменьшением соотношения высоты заготовки к ее диаметру  $H / D < 0,84$  степень прорабатываемости металла элементов колес снижается, и, наоборот.

После формовки на прессе усилием 10 000 тонн степень деформации отдельных частей колесной заготовки различна (рис. 2). Распределение накопленной степени 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 за счет перераспределения металла в процессе заполнения штампа из области диска колеса.

Кроме обеспечения максимально возможной проработки металла всех элементов колеса, при выборе оптимального диаметра колесной заготовки существует другой важный момент, связанный с особенностями ее макроструктуры. Нужно стремиться к тому, чтобы в процессе горячей пластической деформации участки центральной некачественной зоны литой заготовки за счет течения металла не попадали в ступицу и, тем более, в диск колеса [12, 13].

В требованиях нормативно-технической документации по производству колес (ТУ У 27.1 – 23365425 – 663: 2011 «Заготовка непрерывнолитая круглая для производства колесобандажной продукции») сказано, что

осевая пористость и осевая ликвация не должна 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 колесной заготовки Ш 450 мм ( $H / D = 0,84$ ) 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 колесных заготовок оценили вероятность попадания данных дефектов в готовое изделие (рис. 3). На основании результатов компьютерного моделирования процесса деформации колесной заготовки Ø 450 мм можно сделать вывод, что некачественная осевая зона ее макроструктуры полностью концентрируется в выдавке и удаляется при прошивке технологического отверстия в ступице.

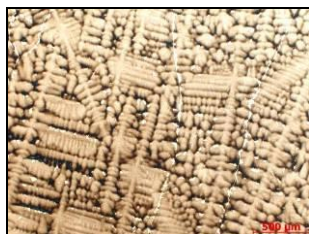
Таким образом, применение непрерывнолитой заготовки Ш 450 мм ( $H / D = 0,84$ ) для производства железнодорожных колес Ø 927 мм обеспечивает степень проработки металла обода (величина накопленной деформации порядка 87 %) и диска (величина накопленной деформации порядка 98 %) в процессе горячей пластической деформации исключит попадание отдельных дефектов макростроения в элементы колес.

Рассмотрим, как согласуются результаты определения степени деформации в элементах колес, полученные с помощью компьютерного моделирования, с фактической деформацией структуры колеса в определенном месте его радиального сечения.

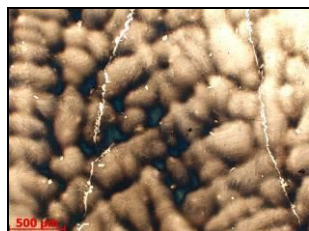
Оценка степени деформационной проработки элементов исследуемого колеса выполнена по изменению параметров дендритной структуры. Установлено, что химическую неоднородность кремния и марганца в углеродистой стали, образовавшуюся при кристаллизации в результате дендритной ликвации этих элементов и представляющую собой в микроструктуре проката так называемые «следы» дендритной структуры, не устраняют даже многочасовые выдержки при высоких температурах [14]. Поскольку форма, ориентация, размеры дендритных ветвей и междендритных пространств, их объемные доли при затвердевании и деформировании изменяются по сечению заготовок и готового изделия, плотность дендритной структуры является наиболее информативным показателем, который одновременно учитывает изменения перечисленных параметров и определяется как количество линейных элементов в объеме металла [15]. В работе [16] показано, что данный метод позволяет достаточно точно оценить прорабатываемость дендритной структуры в любом месте сечения проката. Погрешность определения коэффициента вытяжки по изменению данного показателя не превышает 5 %.

На рисунке 3 показано как изменяется дендритная структура по сечению исходной заготовок (в поверхностных слоях, на расстоянии  $S$  радиуса и в центральных слоях) и, соответственно, в ободе, диске и ступице исследуемого колеса после горячей пластической деформации.

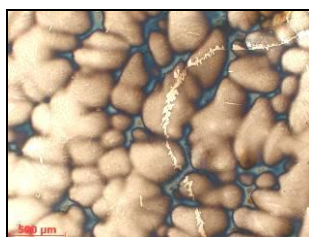
Непрерывнолитая заготовка  
Ø 450 мм



Поверхность

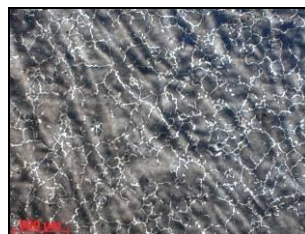


$S$  радиуса



Центр

После горячей пластической деформации



Обод, образец № 1



Диск, образец № 4



Ступица, образец № 8

Рисунок 3 – «Следы» бывшей дендритной структуры в микроструктуре образцов стали марки ER 7, Ч 50

В литой структуре ее плотность имеет максимальные значения в поверхностных слоях. Это влияние интенсивности охлаждения на повышение количества центров образования зародышей кристаллов (дендритов). По мере продвижения от поверхности к центральным слоям величина плотности дендритной структуры резко понижается и достигает минимальных значений в центральных слоях. Изменение плотности дендритной структуры по сечению непрерывнолитой заготовки Ø 450 мм из стали ER 7 описывается полиномиальной зависимостью во 2-ой степени. Это позволило определить величину плотности дендритной структуры на расстоянии  $j$  и  $s$  радиуса исходной заготовки графическим методом (рис. 4).



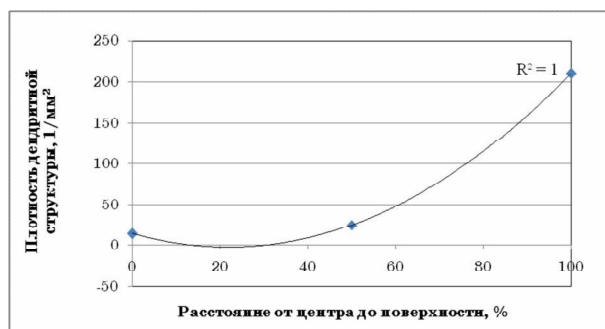


Рисунок 4 – Изменение плотности дендритной структуры по сечению непрерывнолитой заготовки Ø 450 мм из стали ER 7

Проанализировав результаты моделирования формоизменения металла при горячей пластической деформации колесной заготовки, определили, каким слоям исходной литой заготовки соответствуют образцы исследуемого элементов колеса (табл. 3). Результаты количественной металлографии и расчета степени деформации дендритной структуры по изменению ее плотности в элементах колес представлены в таблице 4.

Таблица 3

Соответствие образцов элементов исследуемого колеса месту определения в исходной литой заготовке

| Исходная заготовка | Место определения | Колесо   | Место определения | № образца       |
|--------------------|-------------------|----------|-------------------|-----------------|
| НЛЗ<br>Ø 450 мм    | Поверхность       | Ø 927 мм | Обод              | 1               |
|                    | s радиуса         |          |                   | 2, 3, 9, 10, 11 |
|                    | S радиуса         |          | Диск              | 4               |
|                    | j радиуса         |          | Ступица           | 5,              |
|                    | Центр             |          |                   | 6, 7, 8         |

На рисунке 3 (образец поверхности НЛЗ и обода) показано как под действием растягивающих и сжимающих напряжений изменилась форма и размеры дендритной структуры. Это привело к уменьшению количества дендритов, приходящихся на единицу секущей плоскости. С учетом данных особенностей течения металла в ободе относительное изменение плотности дендритной структуры рассчитывали по формуле:

$$\epsilon_{\Sigma L} = \frac{\Sigma L_0 - \Sigma L_k}{\Sigma L_0} \cdot 100\% \quad (1),$$

где  $\Sigma L_0$  – плотность дендритной структуры в исходной заготовке,  $1/\text{мм}^2$ ;

$\Sigma L_k$  – плотность дендритной структуры в колесе после деформации,  $1/\text{мм}^2$ .

Максимальное относительное изменение дендритной структуры наблюдается в образце № 1, вырезанном вблизи поверхности катания (см. рис. 1). В следующем за ним образце № 2 относительное изменение плотности дендритной структуры уменьшается. Это связано с особенностями формирования дендритной структуры по сечению НЛЗ. В образце № 3, вырезанном в месте перехода обод в диск колеса, величина накопленной деформации и относительное изменения плотности «следов» дендритной структуры имеют все большее расхождение. В образцах



№ 9 – 11, вырезанных по вертикальной плоскости обода исследуемого колеса, значения определяемого параметра хорошо согласуются с расчетной относительной деформацией.

Таблица 4

Результаты расчета степени деформации дендритной структуры по изменению ее плотности в элементах колеса Ø 927 мм

| Заготовка / колесо | Место определения | № образца | Средний размер дендритной структуры, мкм | Плотность «следов» дендритной структуры в объеме стали, 1/мм <sup>2</sup> | Относительное изменение плотности «следов» дендритной структуры, % | Накопленная деформация в элементах колеса $\epsilon$ , % * |
|--------------------|-------------------|-----------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| НЛЗ Ø 450 мм       | Поверхность       | –         | 110,00                                   | 210,45                                                                    | –                                                                  | –                                                          |
|                    | s радиуса         | –         | 270,00                                   | 117,66                                                                    | –                                                                  | –                                                          |
|                    | S радиуса         | –         | 320,00                                   | 24,87                                                                     | –                                                                  | –                                                          |
|                    | j радиуса         | –         | 372,00                                   | 19,50                                                                     | –                                                                  | –                                                          |
|                    | Центр             | –         | 425,00                                   | 14,10                                                                     | –                                                                  | –                                                          |
| Колесо Ø 957 мм    | Обод              | 1         | 131,30                                   | 15,23                                                                     | 92,76                                                              | 86,12 – 88,95                                              |
|                    |                   | 2         | 148,02                                   | 13,51                                                                     | 88,51                                                              | 88,95 – 91,20                                              |
|                    |                   | 3         | 83,12                                    | 24,06                                                                     | 66,27                                                              | 91,20 – 92,99                                              |
|                    |                   | 9         | 143,11                                   | 13,97                                                                     | 88,12                                                              | 88,95 – 91,20                                              |
|                    |                   | 10        | 143,51                                   | 13,94                                                                     | 88,15                                                              |                                                            |
|                    |                   | 11        | 149,88                                   | 13,34                                                                     | 88,66                                                              | 88,95 – 86,19                                              |
|                    | Диск              | 4         | 38,28                                    | 52,24                                                                     | 52,40                                                              | 96,46 – 97,18                                              |
|                    | Ступица           | 5         | 67,06                                    | 29,82                                                                     | 34,62                                                              | 95,56                                                      |
|                    |                   | 6         | 102,36                                   | 19,54                                                                     | 27,84                                                              |                                                            |
|                    |                   | 7         | 107,1                                    | 18,67                                                                     | 24,49                                                              |                                                            |
|                    |                   | 8         | 78,34                                    | 25,53                                                                     | 44,77                                                              | 95,56 – 96,46                                              |

Для диска характерно сжатие в осевом направлении и удлинение в радиальном и тангенциальном. Такой характер течения металла полностью отображает изменение формы «следов» дендритной структуры (см. рис. 4 образец S радиуса НЛЗ и диска). При этом относительное изменение ее плотности рассчитывали по формуле:

$$\epsilon_{\Sigma L} = \frac{\Sigma L_k - \Sigma L_0}{\Sigma L_k} \cdot 100\% \quad (2).$$

Для колеса Ø 927 мм с S-образным диском шириной ~ 40 мм относительное изменение дендритной структуры составило 52,4 %.

При большом осаживании на формовочном прессе получается тонкий диск и, естественно, каждый элемент дендритной структуры испытывает

максимальное растяжение в радиальном направлении. Соответственно, бо́льшая толщина диска определяет меньшее удлинение его центральных слоев и, следовательно, бо́льшее расхождение результатов определения величины накопленной степени деформации и относительного изменения плотности «следов» дендритной структуры диска колеса.

Металл ступицы, как и обода, испытывает осевое удлинение при радиальном и тангенциальном сжатии (см. рис. 4 *образец центра НЛЗ и ступицы*). При такой схеме деформаций «следы» бывших дендритов одновременно растягиваются в одном направлении, а в других сжимаются.

Образцы ступицы исследуемого колеса в исходной заготовке соответствовали центральным слоям и слоям, расположенным на расстоянии  $j$  радиуса от центра (табл. 3). Относительное изменение ее плотности рассчитывали по формуле (2). Поскольку исходная дендритная структура являлась достаточно крупной (табл. 4), после деформации она уплотнилась незначительно. Этим и объясняется достаточное расхождение в результатах определения относительного изменения плотности дендритной структуры и величины накопленной деформации.

Однако относительное изменение плотности дендритной структуры в срединных слоях ступиц исследуемых колёс имеет общую тенденцию с распределением накопленной деформацией, определённой с помощью компьютерного моделирования. В образе № 8, вырезанном вблизи поверхности ступицы, на которую напрессовывается железнодорожная ось (рис. 1), относительное изменение плотности дендритной структуры достигает ~ 45 %. Далее следует зона, где металл не испытывает особой деформации сжатия, а лишь истекает, заполняя центральную полость штампа. Относительное изменение плотности дендритной структуры в этой уменьшается до ~ 25 %. В зоне, расположенной на границе перехода ступицы в диск «следы» дендритов вытягиваются в радиальном направлении, а под действием сжимающих напряжений они уплотняются до ~ 35 %.

Данные результаты подтверждают вывод, сделанный в работе [3], что в диске колесной заготовки существует нейтральный слой, в обе стороны от которого происходит истечение металла к ободу и в ступицу. Происходит это вследствие того, что осаженная заготовка, диаметр которой несколько меньше внутреннего диаметра формовочного кольца, легко вначале уширяется к периферии, в то время как при истечении в ступицу металл встречает значительное сопротивление со стороны, как оправки, так и стенок штампов, наклоненных к вертикали. При этом слой, от которого происходит истечение металла в обод, расположен непосредственно у ступицы. После соприкосновения заготовки с боковой поверхностью формовочного кольца начинается истечение металла в периферийную полость. Сопротивление истечению к периферии сильно возрастает, и слой, разделяющий области истечения в обод и ступицу, смещается в сторону обода.

Подводя итог вышесказанного необходимо отметить, что относительное изменение плотности дендритной структуры в исследованном

цельнокатаном колесе с С-образным диском изменяется следующим образом: в образцах обода (до места его перехода в диск) данный параметр достигает максимальных значений, и его величина хорошо согласуется с величиной наколенной деформацией, полученной расчетным путем. В образцах диска и ступицы относительное изменение плотности дендритной структуры снижается. Вероятно в месте перехода обода в диск колеса металл не испытывает особой деформации сжатия, а лишь истекает, заполняя периферийную полость штампа. Аналогичное изменение относительной плотности «следов» дендритной структуры наблюдается и образцах ступиц, что подтверждает сделанный ранее вывод о наличии в колесных заготовках нейтрального слоя.

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

Исследованы особенности течения металла и определена степень деформационной проработки металла элементов железнодорожного колеса диаметром 927 мм с С-образным диском в процессе горячей пластической деформации.

Результаты компьютерного моделирования показали, что применение непрерывнолитой заготовки диаметром 450 мм ( $H / D = 0,84$ ) для производства железнодорожных колес диаметром 927 мм обеспечивает степень проработки металла обода (величина накопленной деформации порядка 87 %) и диска (величина накопленной деформации порядка 98 %) в процессе горячей пластической деформации исключит попадание отдельных дефектов макростроения в их элементы.

Установлено, что относительное изменение плотности «следов» дендритной структуры в цельнокатаном колесе диаметром 927 мм с С-образным диском изменяется следующим образом: в образцах обода (до места его перехода в диск) данный параметр достигает максимальных значений и хорошо согласуется с величиной наколенной деформацией, полученной расчетным путем. В образцах диска и ступицы относительное изменение плотности дендритной структуры снижается. Характер изменения плотности «следов» дендритной структуры в элементах исследованного колеса подтвердил сделанный ранее вывод о наличии нейтрального слоя в срединных слоях цельнокатаных колес.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка рациональных технологических параметров производства цельнокатаных колес с помощью оценки степени накопленной деформации в их элементах при изменении, как фактора формы исходной заготовки, так и способа ее получения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Узлов И. Г. Исследование влияния деформационной обработки колесной заготовки на механические свойства железнодорожных колес / И. Г. Узлов, А. И. Бабаченко, А. В. Шрамко [и др.] // Металл и литье Украины. – 2005. – № 9. – 10. – С. 54 – 57.
2. Узлов И. Г. Влияние размеров колесной заготовки и режимов ее горячей пластической деформации на служебные свойства железнодорожных колес / И. Г. Узлов, А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко [и др.] // Фундаментальные и

прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: Визион, 2016. – Вып. 13. – С. 137 – 142.

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

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

5. Оптимизация технологической схемы двухпроходной горячей штамповки железнодорожных колес / В. Н. Данченко, А. В. Шрамко, А. В. Ашкелянец // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – № 4. – С. 27 – 30.

6. 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.

7. Исследование влияния режимов деформирования при свободной осадке цилиндрического образца на степень его овальности / В. Н. Данченко В. Н., А. В. Ашкелянец, А. В. Шрамко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 47 – 49.

8. 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 / Anton Ashkelianets // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 4. – P. 70 – 75.

9. Лебедев В. Н. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании / В. Н. Лебедев, В. П. Троицкий, Ю. М. Антощенков и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1977. – № 3. – С. 109 – 111.

10. Коваленко В. С. Металлографические реактивы / Справ. под. ред. В. С. Коваленко – М.: Металлургия, 1981. – 102 с.

11. Рутес В. С. Метод определения скорости кристаллизации непрерывнолитой заготовки по дендритной структуре / В. С. Рутес, Е. И. Акимова, Е. В. Филимонова // Бюллетень ЦНИИТЭИЧМ. – 1969. – № 16. – С. 51 – 53.

12. Отчет 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 черной 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.

13. Кузовков А. Я. Опыт производства железнодорожных колес из непрерывнолитой заготовки / А. Я. Кузовков, Л. К. Федоров, А. А. Фетисов и др. // Сталь. – 1998. – № 6. – С. 12 – 13.

14. Левченко Г. В. Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, Е. Г. Демина и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 2. – С. 74 – 76.

15. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.

16. Левченко Г. В. Оценка деформированного состояния металла по изменению плотности дендритной структуры / Г. В. Левченко, Е. Г. Демина, С. А. Воробей и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 5. – С. 71 – 75.