

УДК 620.18:669.14.018.294.3.003.12

А. И. Бабаченко, Е. Г. Дёмина, А. В. Кныш, А. Н. Хулин, Е. А. Шпак

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПРОРАБОТКИ КОЛЁСНЫХ ЗАГОТОВОК ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Исследовано влияние параметров исходной заготовки на прорабатываемость дендритной структуры в элементах цельнокатаных колёс. Определено, что основное влияние на химическую неоднородность в микроструктуре исследованных образцов колёс после деформации, обусловленную дендритной ликвацией таких элементов, как кремний и марганец, оказывают условия затвердевания исходной литой заготовки. Показано, что изготовленные из непрерывно-литой заготовки колёса характеризуются большей плотностью дендритной структуры и, как следствие, более равномерным распределением сегрегационных участков.

Ключевые слова: слиток, непрерывно-литая заготовка, дендритная структура, деформированное состояние, железнодорожные колёса.

Введение. Постановка задачи

В настоящее время для достижения всё ужесточающихся требований к уровню эксплуатационных и служебных свойств железнодорожных колёс необходима оптимизация технологии их производства и на стадии выплавки стали и ее термической обработки, и в процессе горячей пластической деформации колёсной заготовки [1, 2], который следует рассматривать не только как формоизменение, но и мощный способ воздействия на все уровни структурного состояния и структурно-чувствительные свойства металлов и сплавов, определяющие их эксплуатационные свойства [3]. Надёжность и эксплуатационная долговечность железнодорожных колёс 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 колёс является повышение степени деформационной проработки обода железнодорожного колеса (возрастание величины накопленной деформации колёсной заготовки) [1].

Изучение деформации слитков в металловедческом аспекте [4] позволило дать определение термину «*прорабатываемость*», под которым имеется в виду раздробление дендритной структуры в процессе деформации исходного слитка.

Исследование особенностей процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок на основных стадиях имеет первостепенное значение при

© Бабаченко Александр Иванович, доктор технических наук, директор, заведующий отделом проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей (ОПДТОКС) Института чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ НАНУ); р.т. (056)7900521, ф. (056)7765924, м. (050)3628289, (067)6333465; a_babachenko@mail.ru; Дёмина Екатерина Геннадиевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОПДТОКС; р.т. (056)7905785, м. (095)8908560; kadya20@ua.fm; Кныш Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОПДТОКС; р.т. (056)7905785, м. (050)4802584; andrey.knish@mail.ru; Хулин Артём Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник ОПДТОКС; р.т. (056)7905785, м. (093)4896691; okc.testcenter@mail.ru; Шпак Елена Адольфовна, ведущий инженер ОПДТОКС; р.т. (056)7905785, м. (050)7165589; okc.testcenter@mail.ru; 49050, г. Днепропетровск, пл. Акад. Стародубова, 1

выборе типа и оптимальных параметров исходной заготовки, а также обеспечения наилучшей прорабатываемости всех элементов колеса.

Исходя из вышесказанного, *цель* данного исследования заключалась в установлении влияния типа и размера исходной заготовки на степень деформационной прорабатываемости колёсных заготовок по изменению параметров дендритной структуры.

Материалы и методики экспериментов

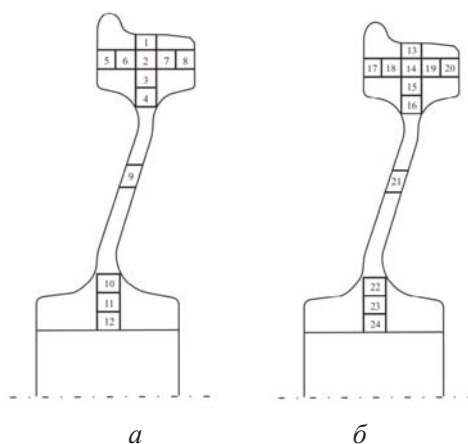
Материалами для металлографического анализа являлись изготовленные в соответствии с ГОСТ 10791-2011 «Колёса цельнокатаные. Технические условия» из стали марки 2 образцы из слитка с $\varnothing = 485$ мм, непрерывно-литой заготовки с $\varnothing = 450$ мм и цельнокатаных колёс с $\varnothing = 957$ мм (с плоскоконическим диском), исходными заготовками для производства этих колёс были слиток сифонной разливки и непрерывно-литая заготовка с вышеуказанными значениями \varnothing (химический состав плавок стали марки 2 исследованных заготовок и колёс представлен в табл. 1):

Таблица 1

Химический состав исследуемых колёс

Диаметр колеса \varnothing , мм	Марка стали	Исходная заготовка \varnothing , мм	Содержание основных элементов, масс.%				
			C	Mn	Si	P	S
957	2	НЛЗ, 450	0,57	0,73	0,29	0,011	0,005
		Слиток, 485	0,61	0,73	0,35	0,016	0,004
Требования ГОСТ 10791-2011			0,55–0,63	0,50–0,90	0,22–0,45	≤0,030	≤0,025

Образцы для металлографического анализа вырезали в поверхностных слоях (на расстояниях $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{4}$ радиусов), в центральных слоях слитка и непрерывно-литой заготовки, а также из всех элементов колёс – обода, диска и ступицы (схема вырезки образцов из колёс показана на рис.1). Дальнейшие же металлографические исследования выполняли на микроскопах «AxioVert 200 M MAT» и «Neophot 32» производства фирмы «Carl Zeiss», а количественный анализ – в программе «AxioVision 4.6.3» в полуавтоматическом режиме.



а – исходная заготовка-слиток с $\varnothing = 485$ мм; б – исходная заготовка-НЛЗ с $\varnothing = 450$ мм

Рис. 1. Схема вырезки и маркировка образцов из железнодорожных колёс

«Следы»* дендритной структуры выявляли путём травления в горячем растворе пикрата натрия. Этот реактив выявляет химическую микронеоднородность кремния (дендритную ликвацию и твердофазную сегрегацию), приводя к потемнению участков с повышенным содержанием Si. С целью же обеспечения более высокой точности результатов измерений определение металлографических характеристик параметров «бывшей» дендритной структуры в образцах из слитка и непрерывно-литой заготовки осуществляли на приготовленных в радиальной плоскости шлифах. А для улучшения качества травления образцов в горячем растворе пикрата натрия элементы колёс с $\varnothing = 957$ мм из обода, диска и ступицы отжигали один час в лабораторной печи «СНОЛ-15/1300» при температуре 850 °С.

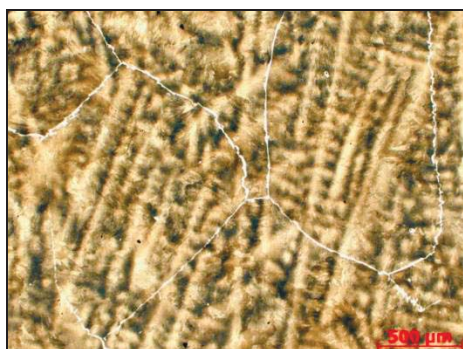
Результаты исследований

На рис. 2 показано, как изменяется дендритная структура* исходных заготовок в производстве железнодорожных колёс, а именно слитка сифонной разливки и непрерывно-литой заготовки (результаты соответствующей количественной металлографии представлены в табл. 2).

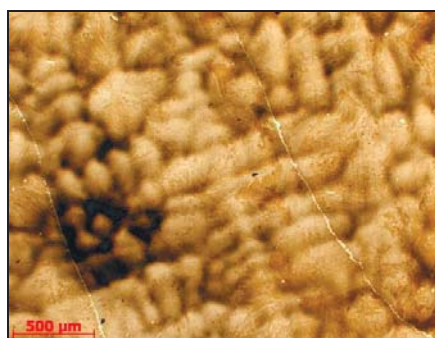
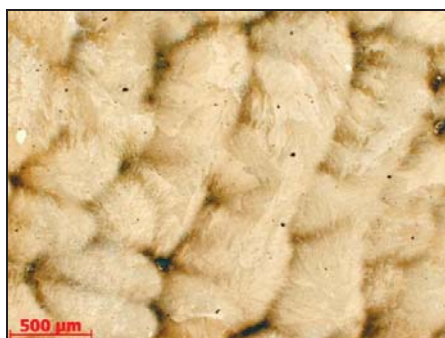
Слиток ($\varnothing = 485$ мм)

НЛЗ ($\varnothing = 450$ мм)

Поверхностные слои



На расстоянии 1/2 радиуса



* Металлографический анализ образцов литых заготовок выполняли после их охлаждения до температуры окружающей среды, поэтому далее в статье речь идёт не о самой дендритной структуре, образующейся в интервале кристаллизации, а о фоне химической неоднородности, образовавшейся в результате дендритной ликвации химических элементов

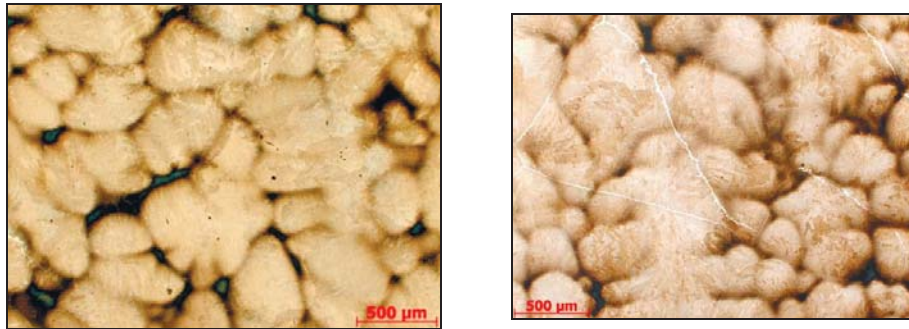
Центральные слои

Рис. 2. Дендритные структуры слитка сифонной разливки ($\varnothing = 485$ мм) и непрерывно-литой заготовки ($\varnothing = 450$ мм) из стали марки 2; $\times 25$

Строения дендритной структуры по сечениям как слитка, так и непрерывно-литой заготовки характеризуются общими тенденциями, которые полностью отражают известные представления о формировании структуры стального слитка [5]. Так, в поверхностных слоях при затвердевании образуются самые мелкие кристаллы, а в направлении от поверхности к центральным слоям размер дендритов увеличивается и чётко прослеживается переход от зоны столбчатых кристаллов к центральной зоне равноосных кристаллов.

Результаты металлографического анализа [6] показали, что объёмные доли междендритных пространств (ликвационных участков) и дендритных ветвей не зависят от способа производства и разливки углеродистой стали марки 2, имея практически одинаковые значения – соответственно, 15–20 и 85–80 % для слитка с $\varnothing = 485$ мм и непрерывно-литых заготовок с $\varnothing = 470$ и 450 мм.

В среднем по сечениям как слитка, так и НЛЗ (\varnothing у них практически одинаковый – 485 и 470 мм соответственно) размер дендритной структуры изменяется в 3 раза и при этом её плотности (количество дендритов на 1 мм^2) в поверхностных и центральных слоях различаются на порядок. В частности, более интенсивный режим охлаждения НЛЗ в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе приводит к тому, что размер дендритной структуры по сечению НЛЗ в среднем в 1,5 раза меньше, а её плотность – в 2,5 раза выше, чем по сечению слитка. А поскольку поверхностные слои при контакте и со стенками изложницы, и медного кристаллизатора охлаждаются быстро, а центральные слои, напротив, медленно, то именно ускоренное охлаждение НЛЗ в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), в которой происходит затвердевание зоны столбчатых кристаллов, и обуславливает наибольшую разницу между значениями размеров дендритной структуры и её плотности, наблюдаемую на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса (табл. 2). Эти особенности характерны для дендритных структур НЛЗ как при $\varnothing = 470$ мм, так и $\varnothing = 450$ мм.

Таким образом, при практически одинаковых диаметре и химическом составе металл непрерывно-литой заготовки отличается более плотной дендритной структурой, чем у слитка, и, как следствие, более равномерным распределением химических элементов, образовавшимся в результате дендритной ликвации.

И, кроме того, на сегодняшний день нами уже доказано, что химическую неоднородность кремния и марганца в углеродистой стали, образовавшуюся при кристаллизации в результате дендритной ликвации этих элементов и представляющую собой в микроструктуре проката упоминаемые выше «следы»

дендритної структури, не усувають даже многочасові выдержки при високих температурах [7].

Таблиця 2

Результати кількісної металлографії досліджуваних зразків

Заготовка/ коесо	Место определения	№ образца	Средний размер дендритной структуры, мкм	Плотность дендритной структуры в объёме стали, 1/мм ²	Относительное изменение плотности дендритной структуры, %	Накопленная степень де- формации в элементах коеса ε, %*
Слиток с Ø = 485 мм	Поверхность	–	210	57,74	–	–
	¼ радиуса	–	405	32,40	–	–
	½ радиуса	–	600	7,07	–	–
	¾ радиуса	–	640	6,29	–	–
	Центр	–	680	5,51	–	–
Косо с Ø = 957 мм	Обод	1	180,16	11,10	80,77	82,08–85,72
		2	241,32	8,29	74,42	
		3	95,57	20,93	31,34	
		4	76,13	26,27	18,92	85,72–90,33
		5	232,00	8,62	73,39	85,72–88,62
		6	232,19	8,61	73,41	82,08–88,62
		7	241,37	8,29	74,42	82,08–85,72
		8	228,86	8,73	73,03	
	Диск	9	96,63	20,69	65,84	88,62–92,77
	Ступица	10	164,65	12,15	30,56	88,62–90,93
		11	249,20	8,02	31,34	88,62
		12	206,12	9,70	43,21	90,93–92,77
НЛЗ с Ø = 450 мм	Поверхность	–	115	192,55	–	–
	¼ радиуса	–	215	109,10	–	–
	½ радиуса	–	315	25,66	–	–
	¾ радиуса	–	375	19,56	–	–
	Центр	–	435	13,46	–	–
Косо с Ø = 957 мм	Обод	13	131,28	15,23	92,08	83,31–86,19
		14	187,72	10,65	90,23	
		15	72,63	27,53	74,76	
		16	56,84	35,19	67,75	88,57–90,54
		17	190,39	10,50	90,37	86,19–88,57
		18	182,12	11,00	89,93	83,31–86,19
		19	187,63	10,65	90,22	83,31–86,19
		20	187,90	10,64	90,24	83,31–86,19
	Диск	21	23,08	86,66	70,39	90,54–93,52
	Ступица	22	71,00	28,17	34,94	90,54–92,17
		23	108,07	18,51	27,27	92,17–93,52
		24	80,75	24,77	45,65	93,52–94,64

Примечание: Величина накопленной степени деформации определена с помощью математического моделирования течения металла на основных стадиях процесса горячей пластической деформации колёсных заготовок в программе «Forge3»

В свою очередь, оценивание уровня деформационной проработки колёс было нами осуществлено, исходя из динамики изменения параметров дендритной структуры – с учетом того, что поскольку форма, ориентация, размеры дендритных ветвей и междендритных пространств, а также их объёмные доли при затвердевании и деформировании изменяются по сечениям как заготовок, так и готовых изделий, то наиболее информативным показателем, который

одновременно учитывает все изменения перечисленных параметров дендритной структуры, является её *плотность*, определяемая как количество линейных элементов в объёме металла [8].

Исходя из этого, в нашей работе [9] был разработан метод оценивания деформированного состояния металла по критерию изменения плотности дендритной структуры. Нами показано, что этот метод позволяет достаточно точно оценить степень отработки дендритной структуры в любом месте сечения проката (погрешность определения коэффициента вытяжки по критерию изменения данного показателя не превышает 5 %).

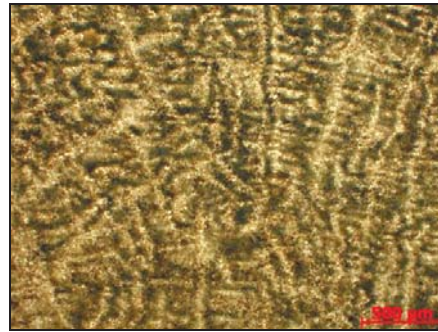
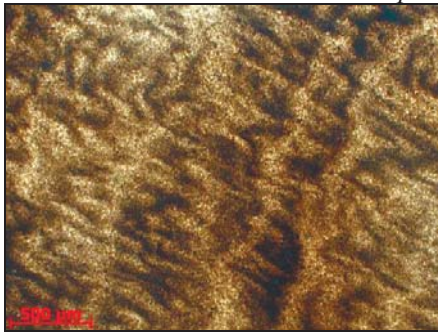
Использование относительного изменения плотности дендритной структуры в качестве показателя степени её деформации дало нам возможность сравнить степень отработки металла колёс при использовании разных типов исходных заготовок со значениями фактора формы H/D 0,84 и 0,66.

А благодаря использованию металлографического метода анализа нами было показано, как в процессе деформации исходных колёсных заготовок на пресс-прокатной линии изменяются «следы» дендритной структуры в ободе, диске и ступице исследуемых колёс. По этим изменениям и можно судить о характере течения металла в элементах железнодорожных колёс при горячей пластической деформации (рис. 3):

Исходная заготовка-слиток с $\varnothing = 485$ мм

Исходная заготовка-НЛЗ с $\varnothing = 450$ мм

Образцы ободьев



Образцы дисков



Образцы ступиц

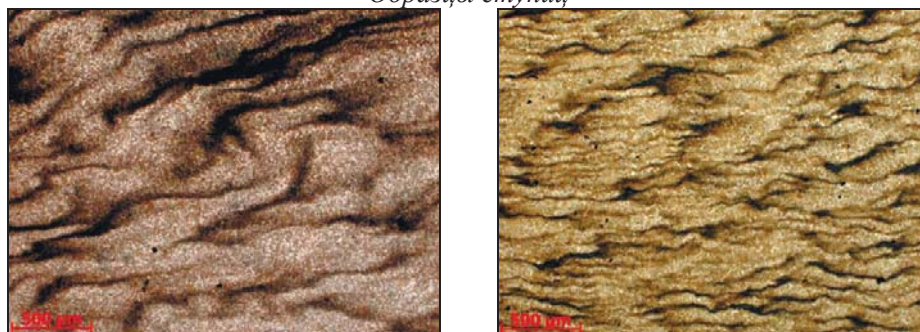


Рис. 3. Изменение дендритной структуры в элементах колёс с $\varnothing = 957$ мм после горячей пластической деформации колёсных заготовок; $\times 25$

Отметим также, что в исходном литом состоянии образцы анализируемых колёс различаются только феррито-перлитной структурой [10] и ни прокатка с последующим выгибанием диска, ни термическая обработка существенным образом не влияют на параметры «бывшей» дендритной структуры, и особенно в срединных слоях колёс (см. также схему вырезки образцов на рис. 1) – поскольку в процессе прокатки происходят, преимущественно, только небольшие обжатия внутренней и боковой поверхностей обода и поверхности катания колеса, а также выкатка гребня, при термической же обработке наблюдается лишь незначительное размытие контуров сегрегационных участков.

С учетом вышеизложенного, на основе анализа результатов моделирования формоизменения металла при горячей пластической деформации колёсных заготовок [11–13] было определено, каким слоям исходной литой заготовки соответствуют образцы исследуемых элементов колёс (табл. 3):

Таблица 3

Соответствие образцов элементов исследуемых колёс местонахождению слоев в исходной литой заготовке

Исходная заготовка	Местонахождение слоя	Колесо	Местонахождение слоя	№№ образцов
Слиток с $\varnothing = 485$ мм	Поверхность	$\varnothing = 957$ мм	Обод	1
	$\frac{3}{4}$ радиуса			2–8
	$\frac{1}{2}$ радиуса		Диск	9
	$\frac{1}{4}$ радиуса			10
	Центр			11, 12
НЛЗ с $\varnothing = 450$ мм	Поверхность	$\varnothing = 957$ мм	Обод	13
	$\frac{3}{4}$ радиуса			14–20
	$\frac{1}{2}$ радиуса		Диск	21
	$\frac{1}{4}$ радиуса			22
	Центр			23, 24

При этом линейными элементами в слитке, непрерывно-литой и колёсных заготовках являются *элементы* дендритной структуры, а именно дендритные ветви и междендритные пространства, дендритная же структура в целом и в литом, и в деформированном металлах не имеет полной линейной ориентации в пространстве и поэтому её плотность определяется по формуле работы [8]:

$$\Sigma L = 2 \cdot M_L (1/\text{мм}^2), \quad (1)$$

где: ΣL – плотность линейных элементов в единице объёма металла; M_L – среднее число следов этих элементов на единице площади секущей плоскости.

Кроме того, исследовали динамику изменения-прорабатываемости дендритной структуры в процессе деформации колёсных заготовок (результаты расчётов степени деформации дендритной структуры, исходя из изменения её плотности в элементах колёс, представлены в табл. 2; при этом следует отметить, что степени деформации дендритных структур отдельных частей колёсных заготовок различны, ведь образующий обод металл – в отличие от ступицы и, особенно, диска – претерпевает наименьшую деформацию) [3].

В частности, проанализировали степень прорабатываемости дендритной структуры в ободьях колёс с $\varnothing = 957$ мм, изготовленных из исходных заготовок с разными факторами формы и способами получения, а именно из слитка сифонной разливки и непрерывно-литой заготовки. В частности, на рис. 3 на примере образцов ободьев показано, как под действием растягивающих и сжимающих напряжений изменяются форма и размеры дендритной структуры, приводя к уменьшению количества приходящихся на единицу секущей плоскости дендритов. Исходя из этих особенностей течения металла в ободе, относительное изменение плотности дендритной структуры рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma L} = \frac{\Sigma L_0 - \Sigma L_e}{\Sigma L_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: ΣL_0 – плотность дендритной структуры в исходной заготовке, $1/\text{мм}^2$; ΣL_k – плотность этой структуры в колёсной заготовке после деформации, $1/\text{мм}^2$.

Следует также отметить, что относительное изменение плотности дендритной структуры в ободе изготовленного из непрерывно-литой заготовки колеса хорошо согласуется с полученной расчётным путём величиной накопленной деформации (см. табл. 2), причём максимальное относительное изменение наблюдается в образцах №№ 1 и 13, вырезанных вблизи поверхности катания (см. схему вырезки образцов на рис. 1), тогда как в следующих за ними образцах №№ 3 и 15 значение этого изменения несколько уменьшается (и особенно в образце № 3 из колеса с $\varnothing = 957$ мм, изготовленного из слитка; см. табл. 2) – что связано с размерами исходной дендритной структуры, которая, в виду меньшей интенсивности теплоотвода, крупнее в слитке сифонной разливки, чем в непрерывно-литой заготовке.

В свою очередь, в образцах №№ 3, 4, 15 и 16, вырезанных в месте перехода обода в диск (согласно ГОСТ 10791-2011 – вблизи точки А), величины накопленной деформации и относительного изменения плотности дендритной структуры имеют всё большее расхождение: так, между образцами №№ 3 и 15 и №№ 4 и 16 относительное изменение плотности дендритной структуры отличается в 2,4 и 3,5 раза соответственно, а это свидетельствует о формировании более плотного и однородного фона химической неоднородности в ободе колеса, исходной заготовкой для изготовления которого являлась НЛЗ с $\varnothing = 450$ мм, по сравнению с микроструктурой обода колеса, изготовленного из слитка сифонной разливки с $\varnothing = 485$ мм.

В образцах же №№ 5–8 и 17–20, вырезанных по вертикальной плоскости ободьев исследуемых колёс (см. схему вырезки образцов на рис. 1), соответствующие значения хорошо согласуются с расчётной относительной деформацией, однако в образцах №№ 5–8 изготовленного из слитка обода колеса наблюдается наименьшая прорабатываемость дендритной структуры. При этом

связанные с трудностями течения металла и заполнением им верхней и нижней периферийных полостей штампов особенности формирования ободов колёсных заготовок не отразились на параметрах дендритных структур и относительном изменении их плотностей.

А поскольку, в свою очередь, для дисков характерны сжатие в осевом направлении и удлинение в радиальном и тангенциальном, то при большом осаживании на формовочном прессе выходит тонкий диск и, естественно, каждый элемент дендритной структуры испытывает максимальное растяжение в радиальном направлении. Именно такой характер течения металла полностью отображает изменение формы дендритной структуры (см. образцы дисков на рис. 3), относительное изменение плотности которой рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma L} = \frac{\Sigma L_k - \Sigma L_0}{\Sigma L_k} \cdot 100 \% \quad (3)$$

где: ΣL_0 – плотность дендритной структуры в исходной заготовке, $1/\text{мм}^2$; ΣL_k – плотность этой структуры в колёсной заготовке после деформации, $1/\text{мм}^2$.

Размер же дендритной структуры в исходных заготовках достигает, на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса, 600 и 315 мкм в слитке и НЛЗ соответственно (табл. 2), и именно такие слои этих заготовок в результате течения металла в процессе горячей пластической деформации формируют диски колёс (табл. 3), а «следы» дендритной структуры после окончания осаживания и выгибания приобретают, для колёс из слитка и НЛЗ размеры, соответственно, 96,63 и 23,08 мкм.

Как результат, плотность распределения «следов» дендритной структуры в 4,2 раза выше в диске колеса, изготовленного из непрерывно-литой заготовки, чем из слитка сифонной разливки: так, для колёс с $\varnothing = 957$ мм (с плоскоконическим диском шириной ~ 20 мм) относительное изменение плотности дендритной структуры $\varepsilon_{\Sigma L}$ составило 65,84 и 70,39 % соответственно – причем при различных размерах и плотности дендритных структур в исходных слитке и НЛЗ и последующих деформированных заготовках.

В свою очередь, металл ступицы, как и вышеупомянутого обода, испытывает осевое удлинение при радиальном и тангенциальном сжатиях, а, следовательно, при такой схеме деформаций дендриты одновременно растягиваются в одних направлениях, а в других – сжимаются (см. образцы ступиц на рис. 3). При этом исследованные образцы ступиц колёс в исходных заготовках соответствуют образцам центральных слоёв и слоям, расположенным на расстоянии $\frac{1}{4}$ радиуса от центра (табл. 3). Относительное изменение плотности их дендритных структур рассчитывали по формуле (2), и следует отметить, что поскольку исходная дендритная структура является достаточно крупной ($D = 435$ и 680 мкм для НЛЗ и слитка соответственно), то и после деформации она уплотняется незначительно – чем и объясняется достаточно ошутимое расхождение в результатах определения как относительного изменения плотности этой структуры, так и накопленной деформационной величины (см. табл. 2).

Вместе с тем, динамика относительного изменения плотности дендритной структуры в срединных слоях ступиц исследованных колёс имеет определённую при помощи компьютерного моделирования общую тенденцию с процессом распределением накопленной деформации. Так: в образцах №№ 12 и 24, вырезанных вблизи поверхности ступицы, на которую напрессовывается железнодорожная ось (см. схему вырезки образцов на рис. 1), относительное изменение плотности дендритной структуры достигает ~ 45 %; далее следует зона, где металл не испытывает особой деформации сжатия, лишь проистекая и заполняя центральную полость штампа, и где относительное изменение плотности денд-

ритной структуры уменьшается до ~30 %; а в зоне, расположенной на границе перехода ступицы в диск, дендриты вытягиваются в радиальном направлении и под действием сжимающих напряжений уплотняются на 30–35 %.

Данные авторские результаты подтверждают сделанный в работе [3] вывод о том, что в диске колёсной заготовки существует нейтральный слой, в обе стороны от которого металл проистекает к ободу и в ступицу, причем положение этого слоя меняется в процессе деформации вследствие того, что осаженная заготовка, диаметр которой несколько меньше внутреннего диаметра формовочного кольца, вначале легко уширяется в направлении к периферии – тогда как при проистечении в ступицу металл встречает значительное сопротивление со стороны оправки, и наклонённых к вертикали стенок штампов.

При этом слой, от которого происходит проистечение металла в обод, расположен непосредственно у ступицы, и когда, после соприкосновения заготовки с боковой поверхностью формовочного кольца, начинается проистечение в периферийную полость и сопротивление ему по направлению к периферии сильно возрастает, то разделяющий области истечения в обод и ступицу слой, напротив, смещается в сторону обода.

Следовательно, установлено, что ни параметры ступиц колёс с $\varnothing = 957$ мм, ни разница размеров дендритных структур в непрерывно-литых заготовках и слитках не влияют – от поверхности напрессовки железнодорожной оси и до перехода в диск – на величину относительного изменения плотности этих структур в срединных слоях ступиц.

Подводя итоги, необходимо отметить тот установленный факт, что относительное изменение плотности дендритных структур в цельнокатаных колёсах происходит – независимо от типа исходной заготовки – следующим образом: в образцах ободьев (до точки А в зоне перехода обода в диск) изменение достигает максимальных значений, хорошо согласуясь с полученной расчётным путём величиной накопленной деформации, тогда как в образцах дисков и ступиц оно снижается. В связи с этим следует предположить, что в месте перехода обода в диск колеса (в точке А) металл не испытывает особой деформации сжатия, а лишь проистекает, заполняя периферийную полость штампа. И необходимо также отметить, что наблюдаемое аналогичное снижение изменения плотности дендритной структуры наблюдается и в образцах ступиц – что и подтверждает сделанный нами ранее вывод о наличии в колёсных заготовках нейтральных слоев.

Выводы

В ходе выполнения данной работы нами было исследовано влияние параметров исходной заготовки на прорабатываемость дендритной структуры в элементах цельнокатаных колёс и установлено, что относительное изменение плотности этой структуры в таких колёсах происходит, независимо от типа исходной заготовки, следующим образом: в образцах ободьев (до точки А) изменение достигает максимальных значений, хорошо согласуясь с полученной расчётным путём величиной накопленной деформации, тогда как в образцах дисков и ступиц оно снижается.

Кроме того, нашими результатами определения относительного изменения плотности дендритной структуры в элементах колёс подтверждён сделанный ранее вывод о наличии нейтрального слоя в колёсных заготовках, а также определено, что основное влияние на химическую неоднородность в микроструктуре исследованных образцов колёс после деформации, обусловленную

дендритної ликвацией таких элементов, как кремний и марганец, оказывают условия затвердевания исходной литой заготовки.

Также нами показано, что именно изготовленные из непрерывно-литых заготовок колёса характеризуются большей плотностью дендритной структуры и, как следствие, более равномерным распределением сегрегационных участков, причём в образцах, вырезанных из ступиц колёс, плотность дендритной структуры больше в 2,5, а в образцах дисков – в 4,2 раза, тогда как в ободьях это различие проявляется в месте перехода обода в диск вблизи точки А и в образцах колеса, изготовленного из непрерывно-литой заготовки, плотность дендритной структуры в 1,3 раза выше по сравнению с образцами колеса, изготовленного из слитка. Все вышеприведённые нами факты свидетельствуют о наличии положительного влияния на показатели сопротивления колёсной стали хрупкому разрушению и повышают рабочие характеристики цельнокатанных колёс в целом.

Досліджено вплив параметрів вихідної заготовки на пророблення дендритної структури в елементах суцільнокатані коліс. Визначено, що основний вплив у мікроструктурі досліджених зразків коліс після деформації на хімічну неоднорідність, зумовлену дендритною ліквідацією таких елементів, як кремній і марганець, чинять умови затвердіння вихідної литої заготовки. Показано, що виготовлені з безперервно-литой заготовки колеса характеризуються більшою щільністю дендритної структури і, як наслідок, рівномірнішим розподілом сегрегаційних ділянок.

Ключові слова: злиток, безперервно-лита заготовка, дендритна структура, деформований стан, залізничні колеса.

The effect of the incoming cast ingot parameters on deformation of a dendritic structure in elements of solid-rolled wheels has been investigated. It has been defined that the conditions of solidification of the incoming cast ingot have a major effect on the chemical heterogeneity due to dendritic segregation of elements such as silicon and manganese in the microstructure of the wheels tested samples after deformation. It has been shown that wheels manufactured from continuous cast billet characterized by a more dense dendritic structure, and as a result more uniform distribution of segregation areas.

Keywords: ingot, continuous cast billets, dendritic structure, strained state, railway wheels.

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.
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 чёрной металлургии*. – 2006. – Вып. 13. – С. 137–142.
3. Бибик Г. А. Производство железнодорожных колёс / Г. А. Бибик, А. М. Иоффе, А. В. Праздников и др. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
4. Лебедев В. Н. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании / В. Н. Лебедев, В. П. Троицкий, Ю. М. Антощенко и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 1977. – № 3. – С. 109–111.
5. Колосов М. И. Качество слитка спокойной стали // М. И. Колосов, А. И. Строганов, Ю. Д. Смирнов и др. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
6. Бабаченко О. І. Вплив режиму охолодження та хімічного складу на формування дендритної структури злитка та безперервно-литих заготовок / О. І. Бабаченко, К. Г. Дьоміна, А. В. Книш и др. // *Металознавство та обробка металів*. – 2015. – № 2. – С. 16–24.
7. Левченко Г. В. Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, Е. Г. Дёмина и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 2. – С. 74–76.
8. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.

9. *Левченко Г. В.* Оценка деформированного состояния металла по изменению плотности дендритной структуры / Г. В. Левченко, Е. Г. Дёмина, С. А. Воробей и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 5. – С. 71–75.
10. *Бабаченко А. И.* Особенности структурообразования углеродистых и низколегированных сталей в процессе охлаждения слитка и непрерывно-литых заготовок / А. И. Бабаченко, Е. Г. Дёмина, А. В. Кныш и др. // *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры (ПДАСА)*. – 2015. – Вып. 81. – С. 37–43.
11. *Отчёт о НИР № ГР 0103U002286.* Разработка и внедрение модели формоизменения металла при горячей деформации для повышения механических свойств железнодорожных колёс / руковод-ль А. А. Миленин. – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2005. – 85 с.
12. *Данченко В. Н.* Примеры использования программы QFORM 2D для решения прикладных задач колёсопрокатного производства ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» / В. Н. Данченко, А. В. Шрамко, А. А. Миленин и др. // *Наукові праці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Металургія*. – 2008. – Вип. 10 (141). – С. 53–58.
13. *Шрамко А. В.* Исследование течения металла при формовке железнодорожных колёс / А. В. Шрамко, В. А. Афанасьев, А. Г. Ступка и др. // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: тематич. сборник научных трудов Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА)*. – Краматорск: ДГМА, 2006. – С. 307–311.