

On the basis of the results obtained in the studies of mechanical properties of the rails the reasons of their rejection due to the undesired values of their relative contraction due to the local and structural heterogeneity and the formation of surface defects of both steelmaking and rolling origin have been determined. Recommendations for optimization of steelmaking technologies and production of rails at «Azovstal» have been worked out.

УДК 621.771.294.04:621.746.004.12

А. И. Бабаченко, А. В. Рослик\*, Е. Г. Демина, А. В. Кныш, Ж. А. Дементьева, Е. А. Шпак

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, Днепропетровск

\*ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ», Днепропетровск

## Перспективы повышения качества железнодорожных колес, изготовленных из непрерывнолитой заготовки

Показано, что использование для производства железнодорожных колес непрерывнолитой заготовки обеспечивает получение в них более плотной макроструктуры и однородной феррито-перлитной структуры, снижает загрязненность неметаллическими включениями и повышает ударную вязкость и усталостную прочность металла колес по сравнению с колесами, изготовленными из мартеновского слитка.

**Ключевые слова:** железнодорожные колеса, непрерывнолитая заготовка, микроструктура, механические свойства

Железнодорожные колеса являются одним из наиболее ответственных элементов подвижного состава железнодорожного транспорта, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействию статических, циклических и динамических нагрузок при движении состава, а в локальных областях при его торможении – циклическим воздействиям высоких температур [1, 2]. Важный этап в повышении качества отечественной металлопродукции для железнодорожного транспорта – ввод в эксплуатацию в 2012 г. электросталеплавильного комплекса «ИНТЕРПАЙП СТАЛЬ», который обеспечил производство железнодорожных колес в Украине из собственной непрерывнолитой заготовки (НЛЗ).

При освоении производства колес из НЛЗ в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные» специалисты ИЧМ НАН Украины и ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» провели комплексные сравнительные исследования макро-, микро-, дендритной структуры, загрязненности неметаллическими включениями стали для железнодорожных колес марки 2, разлитой в слитки Ø 485 мм (мартеновская сталь) и в непрерывнолитую заготовку Ø 470 мм (электросталь),

а также железнодорожных колес, изготовленных из этих заготовок.

Материалом исследования являлись темплеты слитка и НЛЗ и вырезанные из них образцы для металлографического анализа, а также образцы готовых колес, отобранных в соответствии с требованиями ГОСТ 10791-2011, для исследования микроструктуры и проведения механических испытаний (рис. 1). Химический состав исследованных плавок колесной стали марки 2 приведен в табл. 1.

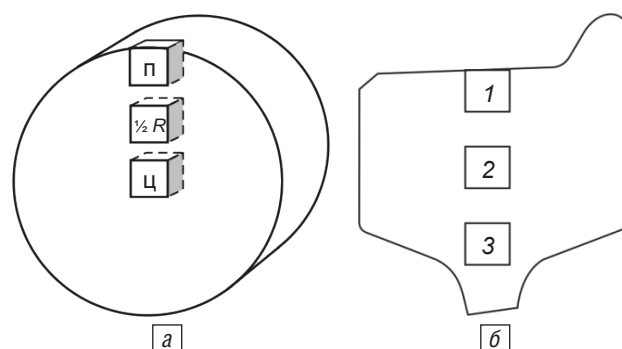


Рис. 1. Схема вырезки образцов для металлографического анализа из слитка и НЛЗ (а); из готовых колес (б)

Таблица 1

## Химический состав исследованных плавок колесной стали марки 2

Литой металл	Содержание основных элементов, %мас.				
	C	Mn	Si	P	S
Слиток Ø 485 мм	0,61	0,73	0,35	0,016	0,004
НЛЗ Ø 470 мм	0,57	0,70	0,29	0,014	0,008

Исследование темплетов слитка Ø 485 мм и непрерывнолитой заготовки Ø 470 мм показало, что макроструктура имеет плотное однородное строение за исключением центральной части, в которой наблюдаются дефекты макростроения – осевая пористость и осевая химическая неоднородность (рис. 2).

Для слитка сифонной разливки характерно наличие усадочной рыхлости протяженностью ~15 мм, а для непрерывнолитой заготовки ~8,5 мм.

Для детального исследования строения слитка и НЛЗ проанализированы изменения их структуры в интервале температур от кристаллизации стали до температуры окружающей среды. Результаты металлографического анализа показали (рис. 3, а, б; табл. 2), что по сечению как слитка, так и НЛЗ размер дендритной структуры изменяется в среднем в 3 раза, при этом ее плотность (количество дендритов на 1 мм<sup>2</sup>) в поверхностных и центральных слоях отличается на порядок. Размер дендритной структуры по сечению НЛЗ в 1,5 раза меньше, а ее плотность в 2,5 раза выше, чем по сечению слитка. Максимальное отличие размеров дендритной структуры и ее плотности между слитком и НЛЗ наблюдается на расстоянии ½ радиуса.

Результаты исследований также показали, что содержание неметаллических включений в непрерывнолитой заготовке в 4 раза меньше, чем в мартеновском слитке (рис. 3, в, г; табл. 3).

Исследования структурного состояния слитка и НЛЗ показали, что как по сечению слитка, так и НЛЗ средний размер аустенитных зерен изменяется в 2 раза (рис. 3, д, е; табл. 4). Однако средний размер аустенитных зерен в НЛЗ меньше в 2 раза по сравнению со средним размером аустенитных зерен, образовавшихся в слитке. Наиболее крупные аустенитные зерна наблюдаются на расстоянии ½ радиуса. Это характерно как для слитка, так и для НЛЗ и связано с особенностями протекания рекристаллизационных процессов в зоне направленной кристаллизации.

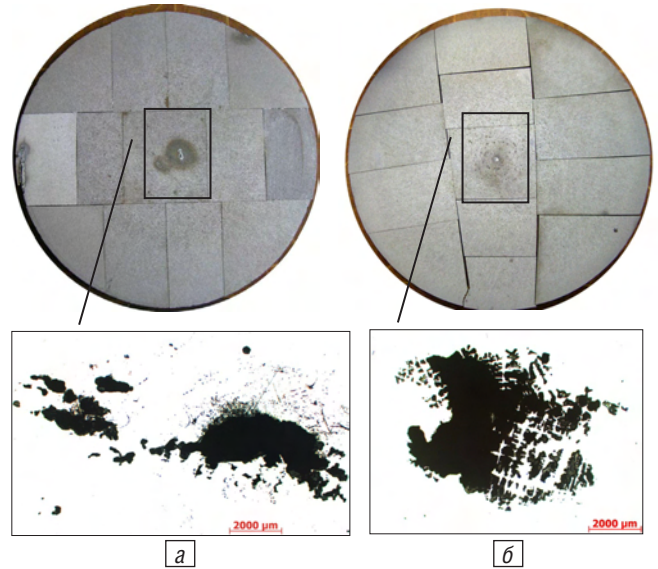


Рис. 2. Макроструктура слитка Ø 485 мм (а) и непрерывнолитой заготовки Ø 470 мм (б)

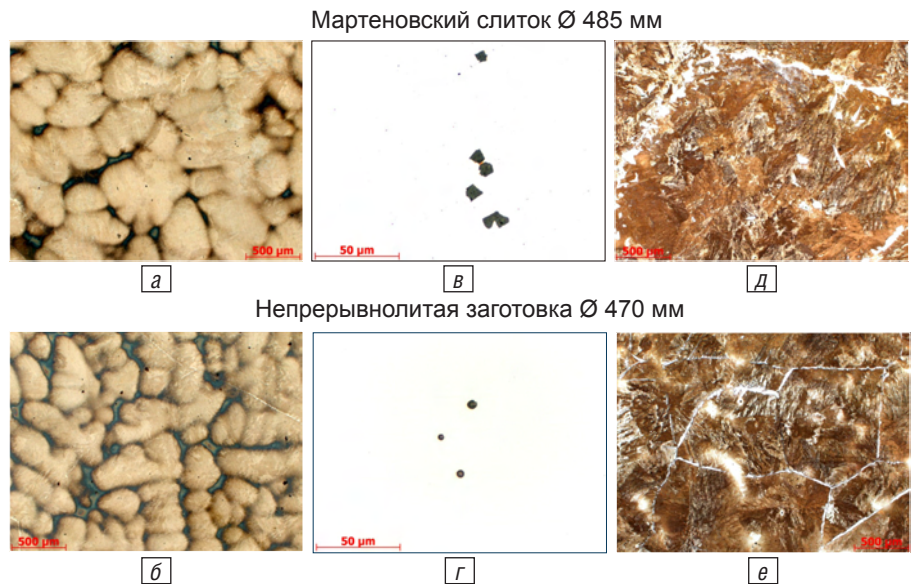


Рис. 3. Дендритная структура (а, б), неметаллические включения (в, г) и феррито-перлитная структура (д, е) в центральных слоях мартеновского слитка Ø 485 мм и непрерывнолитой заготовки Ø 470 мм

Таблица 2

## Результаты металлографического анализа дендритной структуры образцов слитка и непрерывнолитой заготовки

Литой металл	Место определения	Средний размер дендритной структуры, мкм	Количество дендритов на 1 мм <sup>2</sup> шлифа, шт	Плотность дендритной структуры в объеме сплава, 1/мм <sup>2</sup>
Слиток Ø 485 мм	поверхность	210	29,0	58,0
	½ радиуса	600	3,5	7,0
	центр	680	2,8	5,6
НЛЗ Ø 470 мм	поверхность	130	75,0	150,0
	½ радиуса	325	12,0	24,0
	центр	450	6,0	12,0

После охлаждения до комнатной температуры микроструктура слитка, отлитого в изложницу, и непрерывнолитой заготовки состоит из перлита и избыточного феррита, выделившегося по границам «бывших» аустенитных зерен. Содержание доэвтектоидного феррита и перлита в среднем по сечению

**Таблица 3**  
**Результаты оценки загрязненности микроструктуры слитка и непрерывнолитой заготовки неметаллическими включениями (ГОСТ 1778)**

Литой металл	Место определения	Балл включений (метод Ш)	Объемный процент включений (метод П)	Средний объемный процент включений
Слиток Ø 485 мм	поверхность	2,0	0,0083	0,0140
	½ радиуса	4,5	0,0165	
	центр	3,0	0,0173	
НЛЗ Ø 470 мм	поверхность	0,5	0,0018	0,0036
	½ радиуса	1,0	0,0042	
	центр	1,5	0,0048	

по этому показателю перед колесами, изготовленными из слитка мартеновской стали (рис. 5, а, б). Балл неметаллических включений в анализируемых образцах колес, изготовленных из НЛЗ, не превышал 0,5. При этом анализ металла колес, изготовленных из мартеновского слитка, показал наличие сульфидов и комплексных оксисульфидов – 2,5 балла, силикатов деформируемых – 1-2 балла, оксидов точечных – 1-2 балла, что также не является браковочным признаком, но значительно уступает по чистоте стали из НЛЗ (табл. 5).

**Таблица 4**

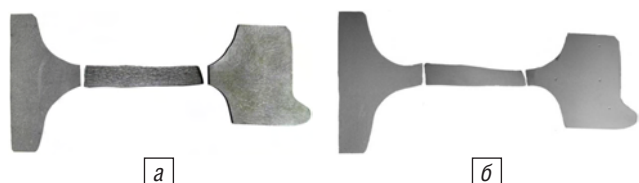
**Результаты металлографического анализа образцов, вырезанных из слитка и НЛЗ**

Литой металл	Место определения	Средний диаметр зерна, мкм	Номер зерна G (ГОСТ 5639)	Объемная доля дозв-тектоидного феррита, %	Толщина дозвтектоидного феррита, мкм
Слиток Ø 485 мм	поверхность	1776	-4,44	4,83	15,0
	½ радиуса	3683	-6,81	2,73	26,4
	центр	3220	-6,33	14,0	87,0
НЛЗ Ø 470 мм	поверхность	789	-2,38	5,40	8,3
	½ радиуса	1924	-4,94	5,45	11,8
	центр	1435	-4,11	8,61	24,0

литого металла составило 7,2 и 92,8 % для слитка и 6,5 и 93,5 % для НЛЗ.

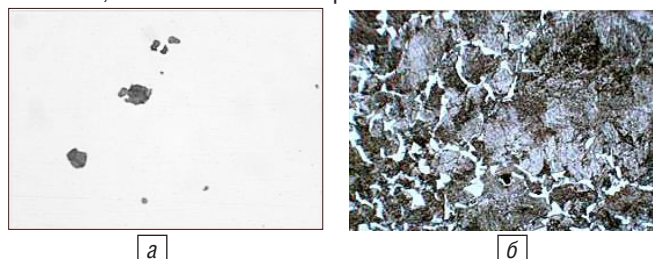
Макроструктурный анализ темплетов железнодорожных колес Ø 957 мм, изготовленных из непрерывнолитой заготовки, показал повышение плотности дендритной структуры в зоне ободьев по сравнению с колесами из мартеновского слитка (рис. 4).

Результаты оценки загрязненности неметаллическими включениями металла колес, изготовленных из НЛЗ, проведенной в соответствии с ГОСТ 1778 по методу Ш, показали полное соответствие требованиям НТД по их количеству (табл. 5) и преимущество



**Рис. 4.** Макроструктура железнодорожных колес Ø 957 мм, изготовленных из мартеновского слитка (а) и непрерывнолитой заготовки (б); ×0,15

Колесо, изготовленное из мартеновского слитка Ø 485 мм



Колесо, изготовленное из непрерывнолитой заготовки Ø 470 мм



**Рис. 5.** Неметаллические включения (а, б) и микроструктура (в, е) образцов, вырезанных из колес Ø 957, ×400

**Таблица 5**

**Результаты оценки загрязненности образцов колес Ø 957 мм из стали марки 2 неметаллическими включениями (ГОСТ 1778)**

Продукция	Сульфиды	Оксиды точечные	Оксиды строчечные	Силикаты пластичные	Силикаты хрупкие	Силикаты н/д
Колеса из слитка	2,0	2,0	0	2,0	2,0	0
Колеса из НЛЗ	0,5	0,5	0	0	0	0,5
ГОСТ 10791-2011	Не более					
	2,0	2,5	1,0	2,0	2,0	2,5

Исследования микроструктуры колес, изготовленных из НЛЗ, показали, что структура металла однородная феррито-перлитная, размер зерна соответствует 8,5 номеру (ГОСТ 5639) и на 1,5-2 номера выше, чем в колесах, изготовленных из мартеновского слитка (рис. 5, в, е).

Результаты механических испытаний свидетельствуют о том, что железнодорожные колеса, изготовленные из НЛЗ, по всем показателям соответствуют требованиям ГОСТ 10791-2011, однако за счет более плотной и однородной дендритной структуры исходной заготовки имеют значения ударной вязкости гораздо выше по сравнению с колесами, изготовленными из мартеновского слитка (табл. 6).

Многие авторы в работах [3-8] показали, что одна из характеристик надежности железнодорожных ко-

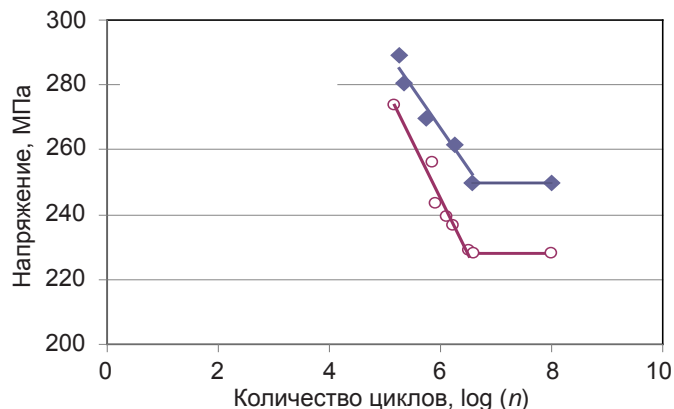


Рис. 6. Кривые усталости металла диска колес, изготовленных из мартеновского слитка и НЛЗ:  $\blacklozenge$  – непрерывнолитая заготовка;  $\circ$  – слиток сифонной разливки

Таблица 6

### Механические свойства железнодорожных колес $\varnothing$ 957 мм из стали марки 2

Продукция	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость на глубине 30 мм, НВ	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
					диск	обод
Колеса из слитка	1008	13	31	296	33,2	35,1
Колеса из НЛЗ	1009	13	33	288	35,3	40,8
ГОСТ 10791-2011	910-1110	$\geq 8,0$	$\geq 14,0$	$\geq 255$	$\geq 20$	$\geq 20$

лес – усталостная прочность. В связи с этим в данной работе провели сравнительные исследования усталостной прочности образцов, вырезанных из дисков колес, изготовленных из мартеновского слитка и НЛЗ. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 25.502 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» на цилиндрических образцах с рабочей частью диаметром 7,5 мм (тип I по ГОСТ 25.502-79) с использованием испытательной машины типа УБМ при консольном изгибе с вращением (коэффициент асимметрии равен -1).

Результаты исследований (рис. 6), показывают, что пределы выносливости дисков колес, изготовленных из НЛЗ и мартеновского слитка, равны 250 и 225 МПа соответственно, то есть в колесах, изготовленных из непрерывнолитой заготовки предел выносливости на 25 МПа выше.

Сравнительные исследования микроструктуры образцов, вырезанных из дисков колес, показали наличие в структуре ферритной полосчатости (рис. 7). При этом в образцах, вырезанных из колес, изготовленных из НЛЗ, полосчатость меньше и равна 0-1 баллу (шкала В ГОСТ 5640) по сравнению с образцами, изготовленными из мартеновского слитка с полосчатостью феррита 3-4 балла. Это, по-видимому, и является причиной более высоких значений усталостной прочности колес, изготовленных из НЛЗ.

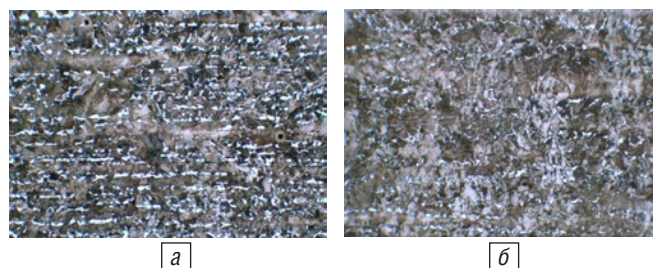
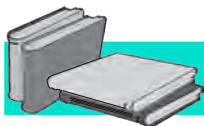


Рис. 7. Микроструктура образцов, вырезанных из дисков колес,  $\times 100$ : мартеновского слитка (а); непрерывнолитой заготовки (б)

### Выводы

Установлено, что при практически одинаковом диаметре и химическом составе металл непрерывнолитой заготовки отличается более однородным макростроением и распределением химических элементов, образовавшихся в результате дендритной ликвации, более мелким аустенитным зерном и меньшим содержанием неметаллических включений в сравнении с металлом мартеновского слитка колесной стали.

Показано, что использование для производства железнодорожных колес непрерывнолитой заготовки обеспечивает получение в них более плотной макроструктуры и однородной феррито-перлитной структуры, снижает загрязненность неметаллическими включениями по сравнению с колесами, изготовленными из мартеновского слитка. Это оказывает положительное влияние на ударную вязкость и усталостную прочность колес.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Колесная сталь / И. Г. Узлов, М. И. Гасик, А. Т. Есаулов и др. – К.: Техника, 1985. – 168 с.
2. Diener M., Ghidini A. Reliability and Safety in Railway Products // Mechanics on Railway solid Wheels. – Lucchini RS, 2008. – 118 p.
3. Эдель К. О., Шапер М. Механика разрушения цельнокатаных колес // Железные дороги мира. – 1994. – № 2. – С. 22-28.
4. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
5. Ларин Т. В. Перспективы улучшения качества железнодорожных цельнокатаных колес // Вестник ВНИИЖТа. – 1985. – № 3. – С. 31-35.
6. Цюренко В. Н. Эксплуатационная надежность колесных пар грузовых вагонов // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 3. – С. 24-28.
7. Митарин А. С. Основные направления развития научно-технического прогресса отрасли // Там же. – 2000. – № 3. – С. 2-11.
8. Барбарич С. С., Цюренко В. Н. Требования к грузовым вагонам нового поколения // Там же. – 2001. – № 8. – С. 26-31.

### Анотація

*Бабаченко О. І., Рослік О. В., Дьоміна К. Г., Книш А. В., Дементьєва Ж. А., Шпак О. А.*

Перспективи підвищення якості залізничних коліс, які виготовлено з безперервнолитої заготовки

*Показано, що використання для виробництва залізничних коліс безперервнолитої заготовки забезпечує отримання більш щільної макроструктури та однорідної ферито-перлітної структури, знижує забрудненість неметалевими включеннями та підвищує ударну в'язкість і утомну міцність металу коліс у порівнянні з колесами, які виготовлено з мартенівського зливка.*

### Ключові слова

*залізничні колеса, безперервнолита заготовка, мікроструктура, механічні властивості*

### Summary

*Babachenko A. I., Roslik A. V., D'omina K. G., Knysh A. V., Dement'eva Zh. A., Shpak E. A*

Prospects for improving the quality of railway wheels made of a continuous casted billet

*It has been shown that the use of a continuous casted billet for manufacture of the railway wheels provides more dense macrostructure and uniform ferrite-pearlite structure, reduces content of nonmetallic inclusions and improves the impact toughness and fatigue strength of the wheels compared with the wheels made of an open-hearth ingot.*

### Keywords

*railway wheels, continuous casted billet, microstructure, mechanical properties*

Поступила 22.05.13

**Продолжается подписка  
на журнал «Металл и литье Украины»  
на 2013 год**

Для того, чтобы подписаться на журнал через редакцию,  
необходимо направить письмо-запрос по адресу:  
**03680, г. Киев-142, ГСП, бул. Вернадского, 34/1, ФТИМС**  
или по факсу: (044) 424-35-15.

Счет-фактуру согласно запросу редакция высылает письмом или по факсу.

Стоимость одного журнала – 30 грн.  
Годовая подписка – 360 грн. (для Украины).  
Годовая подписка для зарубежных стран – 90 \$.