

УДК: 621.771.294.04.001.76

**А.И.Бабаченко, Д.Н.Тогобицкая, Е.Г.Демина, А.А.Кононенко,  
А.С.Козачок, А.Н.Хулин**

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Выполнен сравнительный анализ химического состава, макроструктуры, загрязненности неметаллическими включениями стали для железнодорожных колес, выплавленной в мартеновской печи с сифонной разливкой в слитки и электростали с непрерывной разливкой. Рассмотрен механизм затвердевания слитка при непрерывной разливке и показано формирование его структуры по технологической оси ручья МНЛЗ. Установлено, что в колесах, изготовленных из непрерывнолитой заготовки, загрязненность неметаллическими включениями ниже, а макроструктура и расположение структурных зон металла литой заготовки лучше в сравнении с колесами из слитка сифонной разливки.

**Ключевые слова:** железнодорожные колеса, непрерывнолитая заготовка, химический состав, макроструктура, неметаллические включения

**Состояние вопроса.** Железнодорожные колеса являются наиболее ответственным элементом подвижного состава железнодорожного транспорта. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию различных механических и термических нагрузок. Все более ужесточающиеся условия эксплуатации железнодорожных колес нашли свое отражение в требованиях нормативной документации на данный вид продукции. Требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные. Общие технические условия» нормируемый уровень для временного сопротивления составляет для марки Т  $\geq 1020$  МПа, в предыдущей редакции стандарта ДСТУ ГОСТ 10791-2006 для самой высокоуглеродистой стали минимальный допустимый уровень составлял 980 МПа. Также возросли и требования к твердости обода колеса – от  $\geq 285$  НВ в 2006 году до  $\geq 320$  НВ для марки Т в ГОСТ 10791-2011. Стремительное возрастание нормативных требований к прочностным характеристикам повлекло за собой повышенное внимание к вязким свойствам железнодорожного колеса. Так ДСТУ ГОСТ 10791-2006 содержал требования по ударной вязкости диска при комнатной температуре и при  $-60^\circ\text{C}$ , а для обода определение ударной вязкости являлось факультативным. Техническими требованиями ГОСТ 10791-2011 определение ударной вязкости как диска при  $+20^\circ$  и  $-60^\circ$ , так и обода является обязательным. Кроме того, ГОСТ 10791-2011 содержит технические требования по вязкости разрушения, являющейся характеристикой трещиностойкости железнодорожных колес. Кроме повышения требований по механическим свойствам, новая редакция стандарта на данный вид продукции существенно ужесточила требования

по чистоте металла: ГОСТ 10791-2011 предусматривает проведение ультразвукового контроля колес с использованием эталонных отражателей 1 мм для колес категории «А», которая соответствует наивысшим показателям Европейского стандарта EN 13262:2010, и ужесточает требования по неметаллическим включениям (в 1,5-2 раза) в сравнении с ДСТУ ГОСТ 10791-2006.

**Постановка задачи.** Улучшению качества колёсной стали в значительной мере способствовал введенный в эксплуатацию крупнейший в Украине и Восточной Европе современный электросталеплавильный комплекс «ИНТЕРПАЙП СТАЛЬ», производственные мощности которого включают электродуговую печь, двухпозиционную установку печь-ковш, установку вакуумной дегазации и две машины непрерывного литья заготовок для разливы стали различных марок. Это обеспечило производство железнодорожных колёс в Украине из собственной непрерывнолитой заготовки. В то же время коренное изменение технологии производства железнодорожных колёс, заключающееся в изменении способа производства стали и замене слитка НЛЗ, потребовало проведения комплексных исследований качества металла и железнодорожных колес, изготовленных из этой стали.

**Изложение материалов исследований.** В работе с использованием статистических методов анализа данных, были проведены исследования стабильности химического состава в сталях марок «Т» и «2» мартеновского производства ПАО ИНТЕРПАЙП НТЗ и НЛЗ производства «ИНТЕРПАЙП СТАЛЬ». В табл.1 приведен сравнительный анализ данных о химическом составе мартеновских (2010-2012 гг.) и электросталей (2013-2014гг.) марок «Т» и «2».

Как следует из результатов оценки достоверности разности средних по  $t$ - критерию Стьюдента для марки «Т» и марки «2» произошли следующие изменения в составе (в таблице выделены курсивом). Для марки «Т»: увеличилось содержание углерода, марганца и меди. Снизилось содержание серы, алюминия, титана и ванадия. Содержание кремния, хрома и фосфора не изменилось. При этом стоит отметить, что по многим элементам сузился интервал их межплавочного разброса. Так для углерода диапазон значений сузился в 2,4 раза, а для серы и хрома он уменьшился практически в 6 раз. Существенное уменьшение диапазона значений для меди в НЛЗ по сравнению со сталью мартеновского производства связано с тем, что минимальное содержание этого элемента в стали НЛЗ значительно выше, т.к. он вносится вместе с ломом. Разброс значений по содержанию кремния, марганца, фосфора и алюминия уменьшился в 1,5-2 раза. Межплавочный разброс по содержанию ванадия практически остался на том же уровне, а по содержанию титана он стал равен нулю.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки данных по химическому составу сталей для железнодорожных колес

Хим. эл-нт	Марка Т мартен	Марка Т НЛЗ	Марка 2 мартен	Марка 2 НЛЗ	
C	Мин.	0,57	0,65	0,57	0,58
	Макс.	0,69	0,7	0,63	0,63
	Ср.	0,664	0,667	0,598	0,602
	t-критерий	3,499		2,43	
Si	Мин.	0,26	0,27	0,26	0,26
	Макс.	0,4	0,37	0,37	0,37
	Ср.	0,33	0,312	0,309	0,323
	t-критерий	1,657		3,618	
Mn	Мин.	0,7	0,74	0,65	0,66
	Макс.	0,9	0,86	0,82	0,79
	Ср.	0,77	0,81	0,723	0,724
	t-критерий	5,42		0,025	
P	Мин.	0,002	0,005	0,004	0,006
	Макс.	0,017	0,013	0,1	0,09
	Ср.	0,0078	0,009	0,0122	0,0108
	t-критерий	1,827		0,99	
S	Мин.	0,005	0,005	0,003	0,002
	Макс.	0,07	0,016	0,09	0,006
	Ср.	0,012	0,009	0,068	0,029
	t-критерий	3,04		8,46	
Cr	Мин.	0,07	0,17	0,05	0,05
	Макс.	0,24	0,2	0,19	0,2
	Ср.	0,193	0,189	0,1	0,78
	t-критерий	1,56		6,05	
Al	Мин.	0,013	0,005	0,01	0,005
	Макс.	0,03	0,031	0,03	0,011
	Ср.	0,021	0,012	0,019	0,008
	t-критерий	4,28		41,53	
Cu	Мин.	0,003	0,14	0,008	0,13
	Макс.	0,1	0,19	0,14	0,24
	Ср.	0,025	0,167	0,0759	0,16
	t-критерий	31,21		33,69	
Ti	Мин.	0,005	0,0045	0,002	0,0045
	Макс.	0,009	0,0045	0,009	0,0045
	Ср.	0,0059	0,0045	0,006	0,0045
	t-критерий	57,11		25,88	
V	Мин.	0,08	0,006	0,0002	0,004
	Макс.	0,15	0,079	0,019	0,078
	Ср.	0,092	0,084	0,0009	0,062
	t-критерий	6,29		4,69	

Таким образом, при электросталеплавильном способе производства стали достигается повышение качества стали марки «Т» за счет снижения

среднего количества серы и уменьшения интервала изменения содержания этой вредной примеси в 6 раз; за счет более глубокого усвоения расплавом алюминия, вводимого для раскисления стали, о чем свидетельствует его более низкое содержание в стали непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) при сужении его интервала значений на 53%, а так же за счет уменьшения интервала содержания фосфора ~ в 2 раза.

Для электростали марки «2» увеличилось содержание углерода, кремния, хрома, меди и ванадия по сравнению со слитковым металлом той же марки. Снизилась концентрация серы, алюминия и титана. Остались на уровне содержание марганца и фосфора. Необходимо также отметить для этой стали значительно уменьшился интервал межплавочного разброса содержания таких элементов как сера и алюминий: более чем в 20 и 30 раз соответственно. Для углерода, марганца, фосфора и меди эта характеристика уменьшилась на 15-30%. Диапазон содержания ванадия уменьшился в 2,5 раза.

В целом, при электросталеплавильном способе производства достигается высокая стабильность содержания химических элементов в стали (кроме тех, что привносятся с шихтовым ломом), и значительно снижается количество вредных примесей.

Изменение способа производства стали приводит к изменению и условий ее кристаллизации. Накопленный мировой опыт показывает, что замена слитка, отлитого в изложницу, непрерывнолитой заготовкой приводит к существенным изменениям в технологии её производства на стадиях раскисления, разливки, затвердевания, а также вносит определённые коррективы в существующие технологические режимы производства металлопродукции. При этом качество исходного металла можно существенно повысить путём применения внепечных методов обработки стали, прежде всего, вакуумирования и продувки в ковше инертными газами.

Важным этапом в получении качественных непрерывнолитых заготовок является процесс перехода стали из жидкого состояния в твёрдое, называемый затвердеванием [1]. Затвердевание заготовки происходит в течение 10 – 20 минут и сопровождается сложными физико-химическими процессами, включающими явление массопереноса, уменьшение её объема и пр.

Процессы тепло- и массопереноса, а также упругопластической деформации, происходящие при затвердевании непрерывнолитой заготовки, сопровождаются конвективным движением потоков металла, формированием кристаллической структуры, развитием усадочных и ликвационных явлений, которые существенным образом определяют формирование конечной структуры непрерывнолитой заготовки.

Затвердевание слитка при непрерывной разливке протекает в условиях, отличающихся от условий затвердевания металла в изложницах. При разливке в изложницы различают два периода. В

первый, кратковременный, период происходит наполнение изложниц жидким металлом и формируется наружная корка слитка в условиях интенсивного теплоотвода и нарастающего ферростатического давления за счёт подъёма уровня металла в изложнице, во второй – прекращается поступление жидкого металла, происходит отход тонкой корочки слитка от стенок изложницы и затвердевание промежуточной и центральной зон слитка в условиях постоянного ферростатического давления и понижающегося теплоотвода.

При непрерывной разливке можно отметить четыре периода, в течение которых меняются условия затвердевания слитка.

За первый период, очень кратковременный (обычно не более одной минуты), кристаллизатор наполняется жидким металлом и происходит затвердевание наружной корки без скольжения её относительно медных стенок в условиях интенсивного теплоотвода (рис. 1, а). Во время второго периода в кристаллизатор продолжает поступать жидкий металл и происходит непрерывное затвердевание наружной корки при движении её относительно медных стенок в условиях интенсивного теплоотвода в верхней части кристаллизатора, пониженного теплоотвода в нижней части, где происходит отход корки от медных стенок, и вновь повышенного теплоотвода в зоне вторичного охлаждения под кристаллизатором (рис. 1, б). В этот период начинается кристаллизация промежуточных зон слитка в условиях ферростатического давления при неизменном уровне металла в кристаллизаторе. Продолжительность второго периода определяется весом плавки, сечением отливаемого слитка, скоростью разливки, и может колебаться в значительных пределах (до 50 % от общей продолжительности разливки).

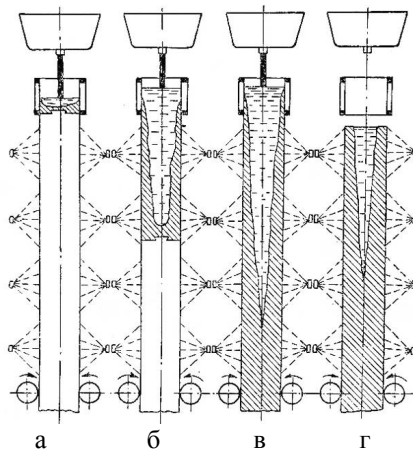


Рис. 1. Условия затвердевания слитка при непрерывной разливке.

Третий период отличается от второго тем, что процессы кристаллизации промежуточной и центральной зон протекают при постоянном ферростатическом давлении, которое определяется глубиной лунки жидкого металла (рисунок 1, в). Продолжительность этого периода также может колебаться и она тем больше, чем больше длина слитка.

Во время четвёртого периода прекращается поступление жидкого металла в кристаллизатор, и процессы затвердевания промежуточной и центральной зон протекают при понижающемся ферростатическом давлении (рисунок 1, г). По продолжительности четвёртый период обычно равен второму.

Рассмотрим, как формируется структура непрерывнолитой заготовки по технологической оси ручья МНЛЗ (рис. 2). В начале затвердевания мелкозернистая корочка (приблизительно 5...10 мм), которая состоит из мелких и равноосных кристаллов, образующихся в результате быстрого охлаждения (скорость охлаждения  $\sim 100$  °C/c), формируется в кристаллизаторе и в верхней части зоны охлаждения (ЗВО). Затем образуется смежная зона, в которой дендриты расположены почти перпендикулярно поверхности; этот рост является однонаправленным по отношению к центру заготовки и выражен столбчатой структурой (рис. 2).

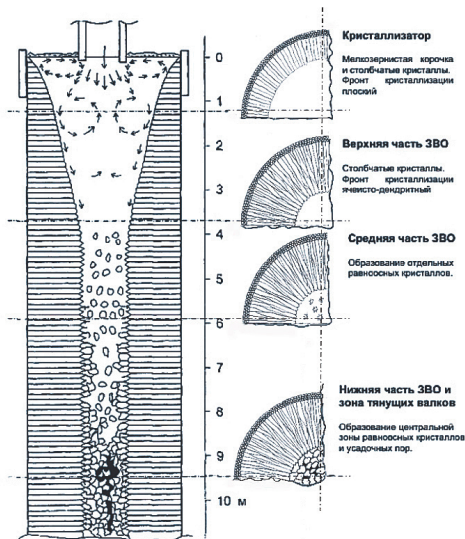


Рис. 2. Схема кристаллизации непрерывнолитой заготовки по технологической оси МНЛЗ [2]

В средней части ЗВО жидкая сталь становится переохлаждённой: её температура падает ниже ликвидуса и столбчатые дендриты продолжают расти. Перегрев постепенно уменьшается и также снижается рост

однонаправленных дендритов: следовательно, образование равноосных (или глобулярных) дендритов более вероятно, чем образование столбчатых дендритов. В нижней части ЗВО образуется центральная зона, состоящая из равноосных дендритов; жидкая ванна густеет, но при этом ведёт себя как жидкость. Текучесть рыхлой зоны постепенно уменьшается, и порции жидкости начинают просачиваться через рыхлую зону. Затвердевание НЛЗ завершается в зоне перед и после тянущее-правильного аппарата (ТПА). Последние порции жидкой стали растекаются вдоль маленьких каналов и концентрируются на литой оси. Происходит окончательное затвердевание заготовки. В конечном итоге, как результат уменьшения объёма, может наблюдаться центральная пористость и V-образная ликвация.

При сравнительном анализе качества исходной заготовки для производства железнодорожных колёс определено, что непрерывнолитые заготовки Ø 360 мм имели однородную и плотную макроструктуру, только осевая зона состояла из участков качественного и пористого металла (рис. 3, а). Поры располагались по тепловой оси, смещённой в сторону малого радиуса на 4,5 мм на участках протяжённостью около 100 мм приблизительно через 1000 мм, что было измерено на продольном осевом темплете протяжённостью 3000 мм. Поры диаметром 1,0 – 1,5 мм соответствовали баллам 0,5 – 2,5 осевой пористости (согласно ТУ 14 – 1 – 4992 – 91 Заготовка непрерывнолитая круглого сечения для изготовления горячекатаных бесшовных труб). Поры заготовки более мелкие, чем в слитке (диаметр пор 3 – 5 мм и протяжённость 5 – 20 мм), и неопасны, так как при производстве колёс они удаляются при прошивке отверстия в ступице. Кроме усадочных пор, в заготовке наблюдалась осевая V-образная ликвация типа мини-слитков с участками положительной и отрицательной ликвации. В среднем ширина составляла ~ 10 мм, отдельные её участки имели ширину раскрытия до 40 мм и даже до 70 мм, что соответствует баллам 0,5; 2 и 2,5 осевой ликвации (по ТУ 14 – 1 – 4992 – 91).

В колёсном слитке осевая V-образная ликвация была развита сильнее (рис. 3, б), ширина её в среднем составляла 50 – 70 мм, а отдельных участков – около 100 мм. Кроме этой зоны, в слитке в отличие от заготовки внеосевая обратная V-образная ликвация, что ещё более ухудшает его макроструктуру. Исследование темплетов слитка сифонной разливки Ø 485 мм и НЛЗ 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. Осевая пористость в слитке сифонной разливки развита сильнее, чем в НЛЗ. Её ширина составляет порядка 15 и 8,5 мм для слитка и НЛЗ соответственно (рис. 4).

б

Рис. 3. Макроструктура темплетов колёсной стали в продольном направлении ( $\times 0,12 \times 0,5$ ): а – НЛЗ  $\varnothing 360$  мм, б – слиток типа «фомашка»  $515 \times 575 \times 2160$  мм [3]

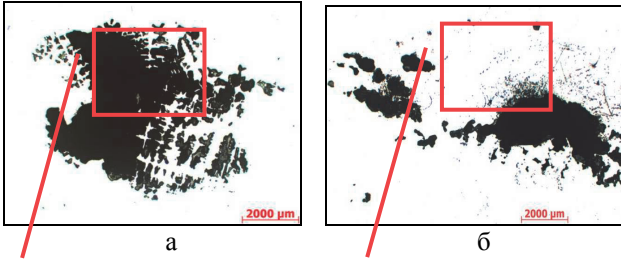


Рис. 4. Макроструктура непрерывнолитой заготовки  $\varnothing 470$  мм (а) и слитка  $\varnothing 485$  мм (а) колёсной стали марки 2,  $\times 0,15$

Сравнительные исследования показали меньшую загрязнённость неметаллическими включениями колёс, изготовленных из непрерывнолитых заготовок по сравнению с колёсами из слитка сифонной разливки. При оценке загрязнённости по ГОСТ 1778 средний балл общей загрязнённости обода, диска и ступицы колеса из металла непрерывнолитой заготовки составил соответственно 2,15; 2,65 и 3,5, а из металла мартеновского слитка, соответственно 3,0; 4,0 и 4,8. Колёса, изготовленные из НЛЗ, характеризуются не только общим снижением загрязнённости, но и существенным уменьшением количества крупных включений. Следует заметить, что все исследованные колёса по загрязнённости с большим запасом удовлетворяют требованиям ГОСТ 10791-2011.

Также в работе был выполнен статистический анализ механических свойств железнодорожных колёс, изготовленных из НЛЗ и мартеновского слитка (табл.2).

Таблица 2. Статистические характеристики выборки данных по механическим свойствам железнодорожных колёс

Механические свойства		Марка Т мартен	Марка Т НЛЗ	Марка 2 мартен	Марка 2 НЛЗ
$\sigma_b, \text{Н/мм}^2$	Мин.	1038	1069	949	945
	Макс.	1215	1214	1050	1110
	Ср.	1152	1147	1002	1023
	t-критерий	0,514		5,759	
$\delta, \%$	Мин.	7,5	10	10	10
	Макс.	14	14,5	14,5	17
	Ср.	10,52	12,11	12,2	13



	t-критерий	4,283		4,97	
НВ	Мин.	307	297	269	266
	Макс.	363	341	307	317
	Ср.	338	328	290	296
	t-критерий	4,65		4,34	

Исследования механических свойств термически упрочнённых колёс, полученных из НЛЗ, показали, что уровень их предела прочности и твёрдости на глубине 30 мм соответствуют требованиям ГОСТ 10791-2011, а изменения этих показателей по толщине обода являются такими же, как и для колёс из слитка сифонной разливки, имеющих аналогичный химический состав и термическую обработку. Различие заключается в том, что высокие прочностные характеристики колёс из непрерывнолитого металла сочетаются с повышенными пластическими характеристиками. Такого запаса пластических свойств при производстве колёс из стали, выплавленной в мартеновских печах, достичь не удавалось.

**Закключение.** С использованием статистического анализа установлено, что независимо от марки колесной стали (марка «2» и «Т» по ГОСТ 10791-2011) электросталь производства «ИНТЕРПАЙП СТАЛЬ» содержит значительно меньшее количество вредных примесей и имеет более стабильные показатели химического состава практически по всем химическим элементам в сравнении с мартеновскими сталями для железнодорожных колес производства ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ».

Выполнен сравнительный анализ макроструктуры исходных заготовок для производства железнодорожных колёс, вырезанных из мартеновского слитка и НЛЗ. Показано, что внутренние дефекты макроструктуры – осевая пористость и ликвация – более развиты в металле слитка, чем в металле непрерывнолитой заготовки.

Установлено, что в колесах, изготовленных из НЛЗ, загрязненность неметаллическими включениями ниже, а макроструктура и расположение структурных зон металла литой заготовки лучше в сравнении с колесами из слитка сифонной разливки.

Установлено, что благодаря высокой чистоте по неметаллическим включениям, плотности и дисперсности дендритной структуры стали, железнодорожные колеса из НЛЗ обладают высокими прочностными свойствами, которые сочетаются с повышенными пластическими характеристиками. Повышение комплекса механических свойств при изменении способа производства колесной стали и условий ее кристаллизации подтверждено статистическим анализом.

Применение инновационных технологий в производстве железнодорожных колес обеспечивает значительный запас по уровню показателей качества этих изделий относительно новых требований ГОСТ 10791-2011.

1. *Сладкоштитев В. Т., Ахтырский В. И., Потанин Р. В.* Качество стали при непрерывной разливке. – М.: Металлургиздат, 1963. – 174 с.
2. *Ботников С. В.* Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующийся корочки металла. – Волгоград, -, 2011. – 98 с.
3. *Качество колёс из непрерывнолитых заготовок.* / И.Г.Узлов, Л.А.Моисеева, Н.Г.Мирошниченко, Г.П.Баранова, В.А.Тарасова. // Сталь. – 1993. – № 10. – С.71–73.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко*

***О.І.Бабаченко, Д.М.Тогобицька, Є.Г.Дьоміна, Г.А.Кононенко,  
О.С.Козачок, А.М.Хулін***

#### **Інноваційні технології у виробництві залізничних колес**

Виконано порівняльний аналіз хімічного складу, макроструктури, забрудненості неметалевими включеннями сталі для залізничних коліс, виплавленої в мартенівській печі з сифонним розливанням у злитки і електросталі з безперервним розливанням. Розглянуто механізм твердіння злитка при безперервному розливанні, показано формування структури безперервно литої заготовки по технологічній осі струмка МБЛЗ. Проаналізовано зміну механічних властивостей залізничних коліс в залежності від способу виробництва сталі вихідної заготовки.

**Ключові слова:** залізничні колеса, безперервнолита заготовка, хімічний склад, макроструктура, неметалічні включення

***A.I.Babachenko, D.N.Togobitskaya, K.G. D'omina, A.A.Kononenko,  
A.S.Kozachok, A.N.Khulin***

#### **Innovative technologies in the production of railway wheels**

A comparative analysis of the chemical composition, macrostructure, contamination by nonmetallic inclusions steel railway wheels, smelted in open-hearth furnaces with bottom casting into ingots and electric steel casting with NLZ. The mechanism of solidification of the ingot during continuous casting, forming the structure shown in the technological axis NLZ creek caster. The change of mechanical properties of railway wheels, depending on the method of production of the initial billet of steel.

**Keywords:** railway wheels, billets, chemical composition, macrostructure, non-metallic inclusions