

А.И. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор

А.А. Кононенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

А.Н. Хулин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ahulin81@ukr.net

Ж.А. Дементьева, науч. сотрудник

Е.А. Шпак, вед. инженер

О.Ф. Клиновья, вед. инженер

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украина

Надежность железнодорожных колес, изготовленных разными способами производства

Исследованы различные показатели надежности литых и цельнокатаных железнодорожных колес. Установлено, что литые колеса (марка С по ААР М 107/208), имея высокие значения прочностных свойств (временное сопротивление и твердость), по таким важным показателям надежности как относительное сужение, относительное удлинение, ударная вязкость и вязкость разрушения значительно уступают цельнокатаным колесам (марка Т и 2 по ГОСТ 10791-2011), при этом уровень относительного удлинения, ударной вязкости и вязкости разрушения литых колес не соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011.

Ключевые слова: Железнодорожное колесо, неметаллические включения, интенсивность напряжений, механические свойства, микроструктура.

Введение. От железнодорожных колес требуется очень высокая надежность, важной характеристикой которой является прочность. Однако на надежность железнодорожного колеса влияют и такие его характеристики трещиностойкости как ударная вязкость, в том числе при пониженных температурах, вязкость разрушения.

Условия эксплуатации железнодорожного транспорта в странах СНГ являются сложными, что обусловлено сезонами с низкими и высокими температурами, сложным рельефом местности. Важной задачей является обеспечение безопасности движения подвижного состава, что достигается за счет использования колес с качественными показателями, которые обеспечивают безотказную эксплуатацию.

Так как обод колеса работает в паре трения с рельсом, то он, в первую очередь, должен иметь высокую износостойкость, что определяется его твердостью. С другой стороны, для обеспечения эксплуатационной надежности колеса необходимо, чтобы его обод имел достаточный запас вязкости, что в некоторых случаях может быть связано с необходимостью снижения прочности (твердости). Эти в какой-то степени противоречивые требования по механическим свойствам и определяют сложность проблемы повышения надежности обода колеса.

Цель работы: выполнить аналитическую оценку и сравнительные экспериментальные исследования показателей надежности железнодорожных колес, изготовленных разными способами.

Материал исследований. Материалом для исследований были колеса производства компании *Griffin Wheel в Winnipeg*, Канада (код производителя *GT*) в 2004 г. из стали марки *С* (рис. 1). Для сравнительных исследований были выбраны железнодорожные колеса, изготовленные из сталей марок *2* и *Т* по ГОСТ 10791-2011, из слитков мартеновской вакуумированной стали. Химический состав исследуемых железнодорожных колес приведен в табл. 1.

Из отобранных колес были вырезаны пробы для изготовления образцов для проведения сравнительных исследований макроструктуры, микроструктуры и механических свойств в рамках требований ГОСТ 10791-2011, а также для сравнительной оценки показателей надежности и долговечности железнодорожных колес, которые не регламентируются указанным стандартом.

Результаты исследований. Сравнительный анализ требований нормативных документов показал, что химический состав литых колес класса по стандарту *AAR M107/M208* не соответствует требованиям как европейского стандарта на цельнокатаные

Таблица 1

Химический состав исследуемых колес

Номер плавки, марка стали	Содержание элементов, %мас.							
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	V
марка 2	0,61	0,74	0,35	0,007	0,005	0,09	0,04	–
марка Т	0,66	0,79	0,33	0,018	0,009	0,20	0,12	0,094
марка С	0,72	0,76	0,46	0,010	0,013	0,08	0,04	–



Рис. 1. Исследуемые колесные пары

колеса EN 13262 [1], так и межгосударственного стандарта ГОСТ 10791-2011, в которых предусмотрено использование сталей с более низким содержанием углерода, чем в литых колесах.

Литые колеса производятся в основном из углеродистых марок стали с высоким содержанием углерода (до 0,77 % С и выше), по сравнению с колесами повышенной твердости по ГОСТ 10791-2011 (до 0,7 %С). Такая тенденция обусловлена тем, что чем выше содержание углерода, тем ниже должна быть температура разливки, легче осуществляется операция литья, меньше влияние на графитовые формы, лучше жидкотекучесть стали, ниже вероятность образования литейных трещин, газовых раковин и пригара. Кроме того, углерод проявляет большую склонность к ликвации. Но в стали с высоким содержанием углерода, при охлаждении кристаллы, которые образуются в разные моменты времени процесса затвердевания, имеют разный состав по легирующим и примесным элементам. В результате ликвации различные области стальной отливки могут иметь разную температуру плавления, разную усадку, различную структуру и т. п. Отсюда возникает опасность появления в стальных отливках неоднородности механических свойств.

Кроме того, для литой структуры кроме химической неоднородности, характерны дефекты усадочного происхождения. Жидкий металл имеет больший удельный объем, чем твердый, поэтому металл, залитый в форму, уменьшается в объеме при кристаллизации, что приводит к образованию пустот, которые называются дефектами усадочного происхождения, которые концентрируются в основном в осевой зоне слитка [2]. После завершения затвердевания в макроструктуре заготовок усадочные раковины обычно окружены наиболее загрязненной частью металла, в которой наблюдаются такие несплошности строения как микро- и макропоры, пузыри.

Контроль макроструктуры в работе проводили по ГОСТ 10243 на поперечных темплетях. В требованиях к макроструктуре железнодорожных колес в ГОСТ 10791-2011 отмечено, что колеса должны быть без флокенов, расслоений, трещин, корочек, остатков усадочных раковин и недопустимых ликваций. Анализ макротемплетов анализируемых железнодорожных колес показал отсутствие вышеперечисленных дефектов. При этом в макроструктуре каждого эле-

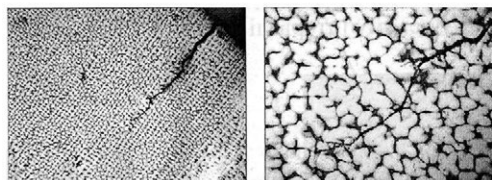
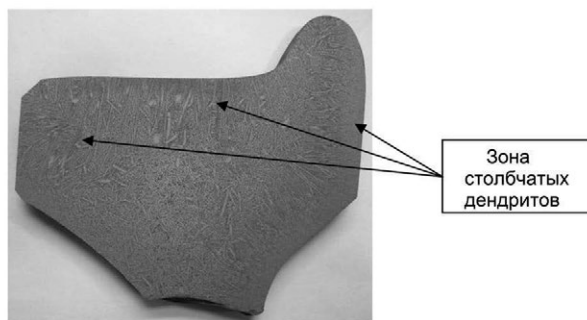


Рис. 2. Макротемплет обода литого колеса и распространение трещины в отливке по зоне столбчатых дендритов [3]

мента литого колеса наблюдается осевая пористость (рыхлость), которая может содержать пустоты (поры).

Направленная структура, связанная с наличием зоны столбчатых кристаллов, растущих от поверхности изделия до его центра, приводит к анизотропии механических свойств: прочностные и пластические свойства в перпендикулярном направлении дендритов намного ниже, чем в продольном. Возникшая трещина будет беспрепятственно развиваться в направлении роста дендритов. Появление трещин в литой стали может быть обусловлено направленностью литой структуры, дендритной ликвацией (рис. 2).

При горячей пластической деформации колесной заготовки при производстве цельнокатаных колес происходят существенные качественные изменения литой структуры: разрушаются дендриты, измельчаются первичные зерна, деформируются или измельчаются неметаллические включения, устраняется межкристаллитная пористость и существенно уменьшается химическая (ликвационная) неоднородность.

Микроструктура всех исследуемых образцов из литого колеса состоит из перлита, имеет неоднородное строение: полосы (участки), которые сильно и слабо травятся. Формирование такой неоднородной микроструктуры объясняется наличием дендритной ликвации. По форме и направлению данных участков четко видны столбчатые и равноосные дендриты литой структуры, такие же, какие были обнаружены при исследовании макроструктуры.

Микроструктура цельнокатаных железнодорожных колес ферритно-перлитная и более однородная, чем микроструктура литых. Количество феррита в структуре больше, чем в литом колесе, что определяется различным содержанием углерода. Равномерность структуры достигается благодаря воздействию горячей пластической деформации и термической обработки, которые выравнивают негативные последствия неоднородности, возникающей при дендритной кристаллизации металла.

Одним из факторов, снижающих долговечность стальных изделий, в том числе и железнодорожных колес, являются неметаллические включения.

Допустимую загрязненность ими готовой металлопродукции строго нормируют.

Неметаллические включения в стали являются инородными телами, нарушающими однородность ее структуры, поэтому их влияние на механические и другие свойства может быть значительным. При деформации стали неметаллические включения, особенно неправильной формы с острыми краями и углами, играют роль концентраторов напряжений и могут вызвать образование трещины, которая является центром дальнейшего усталостного разрушения.

Решающее значение при изучении влияния неметаллических включений на качество стали имеют их свойства: размер, форма, химические и физические характеристики, а также характер расположения по отношению к границам зерен литого металла.

В соответствии с требованиями ГОСТ 10791-2011, оценивается загрязненность стали обода колеса неметаллическими включениями. Для комплексной оценки качества стали, изучение микроструктуры проводили во всех элементах литых железнодорожных колес – в ободе, диске и ступице.

Оценка загрязненности металла исследуемых колес выполнена в соответствии с ГОСТ 1778 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений». Учитывая отсутствие принципиальной разницы в способе производства металла и деформационной обработки для цельнокатаных колес из стали марок 2 и Т, исследования выполнены только на колесе из стали марки 2.

Во всех исследованных образцах, вырезанных из обода литого колеса, средний размер сульфидов соответствует 3 баллу, что превышает требования ГОСТ 10791-2011. Размер неметаллических включений в других элементах колеса (диске и ступице) ГОСТ 10791-2011 не регламентирует, но проведенные исследования показали, что средний размер неметаллических включений (сульфидов) в диске и ступице колеса составляет 3,5 балла (рис. 3).

Сульфидные включения в цельнокатаном колесе, изготовленном из слитка мартеновской стали (рис. 4), не превышают 2 балла по шкале С ГОСТ 1778-70, что соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011. Эти сульфиды имеют более округлую форму, чем в литом колесе, что оказывает менее негативное влияние на показатели надежности, чем сульфидная эвтектика, которая имеет строчечную форму. Остальные неметаллические включения очень мелкие, поэтому их балл не определялся.

С точки зрения надежности железнодорожных колес, наибольшую опасность представляют поры с малым радиусом вершины. Изменение механических свойств в зависимости от пористости при прочих неизменных параметрах обусловлено не только уменьшением эффективного сечения нагруженного образца, но и возникновением локальной концентрации напряжений вблизи пор [4]. Современная механика разрушения исходит из того, что в материале всегда есть уже готовые дефекты, которые при определенных условиях могут хрупко развиваться.

В механике разрушения обычно рассматривается растяжение изотропной бесконечной пластины ко-

нечной толщины, в которой есть эллиптическая трещина с радиусом закругления r , который стремится к нулю [5]. Если длина трещины $2c$ значительно меньше ширины a , любая трещина действует как концентратор напряжений. У вершины трещины возникает максимальное напряжение:

$$S_m = 2S (c/r)^{1/2}, \quad (1)$$

где S – приложенное извне напряжение.

Из уравнения (1) следует, что при одной и той же внешней нагрузке у вершины трещины будут возникать напряжения тем больше, чем она длиннее и острее. При определенных значениях S , c и r напряжение S_m превзойдет теоретическое сопротивление отрыва $S_{отр}$, межатомные связи у вершины трещины разорвутся, и трещина начнет развиваться.

Если принять, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений, такими же, как микротрещины, то максимальное напряжение, рассчитанное по уравнению (1), у вершины сульфидных включений, наблюдаемых в металле литого колеса, длина которых составляет около 0,05 мм при толщине 0,005 мм, при напряжении в ободе колеса 500 МПа может достигать величины порядка 3200 Н/мм^{3/2}, что превышает коэффициент интенсивности напряжений для этих колес в 2 раза. Это может привести к самопроизвольному нестабильному распространению трещины, зародившейся в вершине неметаллического включения и, впоследствии, к разрушению колеса. Кроме того, располагаясь вдоль дендритных ветвей в междендритном пространстве, неметаллические включения ориентированы, что еще в большей степени способствует развитию возникшей трещины в литом колесе.

Глобулярные неметаллические включения, наблюдаемые в цельнокатаных колесах, более благоприятные по форме, с точки зрения концентрации (увеличения) напряжений в его окружении. Так, при напряжении в ободе 500 МПа, для которого была рассчитана величина напряжения в вершине включения в литом колесе, интенсивность напряжения вокруг глобулярного включения в цельнокатаном колесе составит 1000 Н/мм^{3/2}, что более чем в 3 раза меньше, чем для строчечных сульфидных включений и не превышает коэффициент интенсивности напряжений для металла катаных железнодорожных колес.

Надежность колес в эксплуатации в значительной степени определяется нормативной документацией, в которой отражены требования к механическим свойствам стали колес, основные методы испытаний и контроля качества колес и допустимые при этом нормы.

ГОСТ 10791-2011 регламентирует проведение целого ряда сдаточных механических испытаний на образцах, как с обода, так и диска железнодорожного колеса, что дает полную картину о качестве и надежности изделия. В работе были выполнены испытания исследуемых колес (литых колес класса С и цельнокатаных из стали марок 2 и Т) с определением величин временного сопротивления (σ_B) металла обода колеса, относительного удлинения (δ) и сужения (ψ),

твердости обода колеса на глубине 30 мм от поверхности катания и ударной вязкости (KCU) обода и диска.

Как показали результаты механических испытаний (табл. 2), литые железнодорожные колеса имеют высокие значения твердости и временного сопротивления, что позволяет использовать данный вид продукции под вагонами с большой нагрузкой на ось. Эти характеристики также определяют высокие значения долговечности по износу. Однако литые колеса не соответствуют требованиям по пластичным и вязким характеристикам.

В настоящее время характеристики механики разрушения, среди которых особое место занимает критический коэффициент интенсивности напряжений $K1с$, становятся одними из наиболее важных характеристик надежности для многих стальных изделий и конструкций повышенной прочности, в том числе и для железнодорожных колес. Знание этого параметра позволяет оценить сопротивляемость материала хрупкому разрушению.

Ранее проведенные исследования показали [6, 7], что вязкость разрушения $K1с$ является структурно чувствительной характеристикой, а ее величина может изменяться в широких пределах в зависимости от структурного состояния колесной стали. Основными структурными параметрами, определяющими уровень значений $K1с$ этих сталей, является величина действительного зерна, дисперсность продуктов распада аустенита, количество и характер распределения структурно-свободного феррита и неметаллических включений. Важное преимущество $K1с$ по сравнению с другими характеристиками предельной прочности является то, что вязкость разрушения учитывает и длину трещины. Любой критерий разрушения, выраженный через напряжение, предусматривает, что разрушение происходит мгновенно после достижения этого напряжения. Однако, как доказано в настоящее время, любое разрушение – это результат развития трещины до своей критической длины, и поэтому характеристика предельной способности к торможению разрушения должна включать не только напряжение, но и длину трещины. Критический коэффициент интенсивности напряжений $K1с$ характеризует трещиностойкость материалов в линейно-упругой области деформации и используется при оценке качества металлопроката из конструкционных сталей, а также эксплуатационных свойств изделий из этих сталей (железнодорожных колес, бандажей и т. д.) и является силовой характеристикой трещиностойкости.

ГОСТ 10791-2011 регламентирует значения вязко-

сти разрушения $\geq 50 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для железнодорожного подвижного состава с конструкционной скоростью до 200 км/ч и $\geq 70 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для железнодорожного подвижного состава с конструкционной скоростью более 200 км/ч. Результаты испытаний показали, что литые железнодорожные колеса класса С имеют наименьшее значение вязкости разрушения по сравнению с цельнокатаными колесами из стали марок 2 и Т (табл. 2).

Практически во всех зарубежных и международных стандартах на железнодорожные колеса предусмотрено проведение испытаний на ударный изгиб образцов, вырезанных из обода колеса. Но, как показывают исследования различных авторов [8, 9], для конструкционных материалов и изделий из них, которые работают в условиях не только нормальных, но и при низких температурах, знание работы удара, определенное при температуре 20 °С, не может предоставить полную информацию об их эксплуатационной надежности. Для этого необходимо проведение испытаний при низких температурах. Известно, что снижение температуры является одним из наиболее активных факторов, который оказывает влияние на переход металла из вязкого состояния в хрупкое [10, 11], и тем самым повышает опасность хрупкого разрушения.

В работе были проведены сравнительные исследования влияния температуры испытаний в интервале от плюс 20 °С до минус 60 °С на ударную вязкость образцов, вырезанных из ободов литых и цельнокатаных железнодорожных колес (табл. 3). Отбор проб проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 10791-2011.

Установлено, что при пониженных температу-

Таблица 3

Ударная вязкость исследуемых железнодорожных колес при пониженной температуре (°С)

Марка стали	Ударная вязкость при пониженной температуре, Дж/см ²			
	0	-20	-40	-60
марка С	5,2	4,5	3,5	3,0
марка 2	39,3	35,3	32,7	30,1
марка Т	18,6	14,1	11,5	10,1

рах литое колесо имеет значения ударной вязкости в несколько раз ниже, чем цельнокатаные колеса. Как показали исследования, выполненные в данной работе, несмотря на то, что компания *Griffin Wheel* и гарантирует использование своих литых колес в климатических условиях Канады, но величина их

Таблица 2

Механические свойства исследуемых железнодорожных колес, нормируемые ГОСТ 10791-2011

Марка стали	Временное сопротивление $\sigma_{в}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Твердость на гл. 30 мм, НВ	Ударная вязкость $KCU^{+20^{\circ}C}$, Дж/см ²		Вязкость разрушения $K_{1с}$, МПа·м ^{1/2}
					обод	диск	
марка С	1206,3	9,2	14,4	349,3	8,5	5,11	44,3
марка 2	975,0	14,4	45,0	296,3	51,6	33,2	65,1
марка Т	1152,5	15,3	34,7	338,6	24,5	24,0	53,4

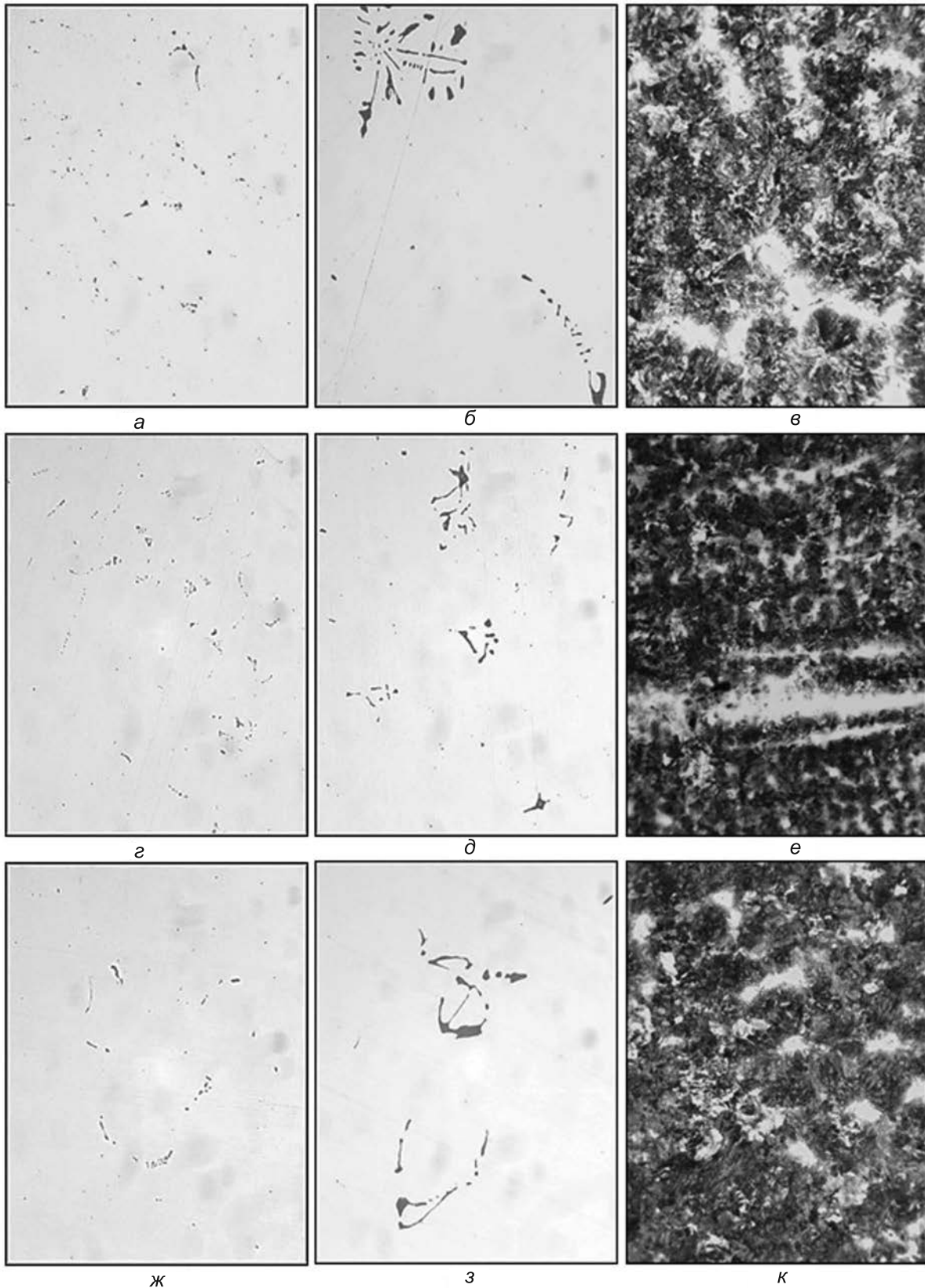


Рис. 3. Неметаллические включения в элементах литого колеса: а, б, в – обод; г, д, е – диск; ж, з, к – ступица; а, г, ж – $\times 100$; б, ж, з – $\times 400$; в, е, к – $\times 50$

ударной вязкости даже при комнатной температуре ниже, чем у высокопрочных колес из стали марки Т (ГОСТ 10791-2011) при температуре минус 60 °С. То есть требования к контролируемым характеристикам колес в соответствии со стандартом AAR M-107/M-208 не позволяют гарантировать безопас-

ную эксплуатацию колес в различных климатических условиях.

Аналитическая оценка и сравнительные экспериментальные исследования основных показателей надежности железнодорожных колес, эксплуатируемых в климатических зонах стран СНГ, изготовленных

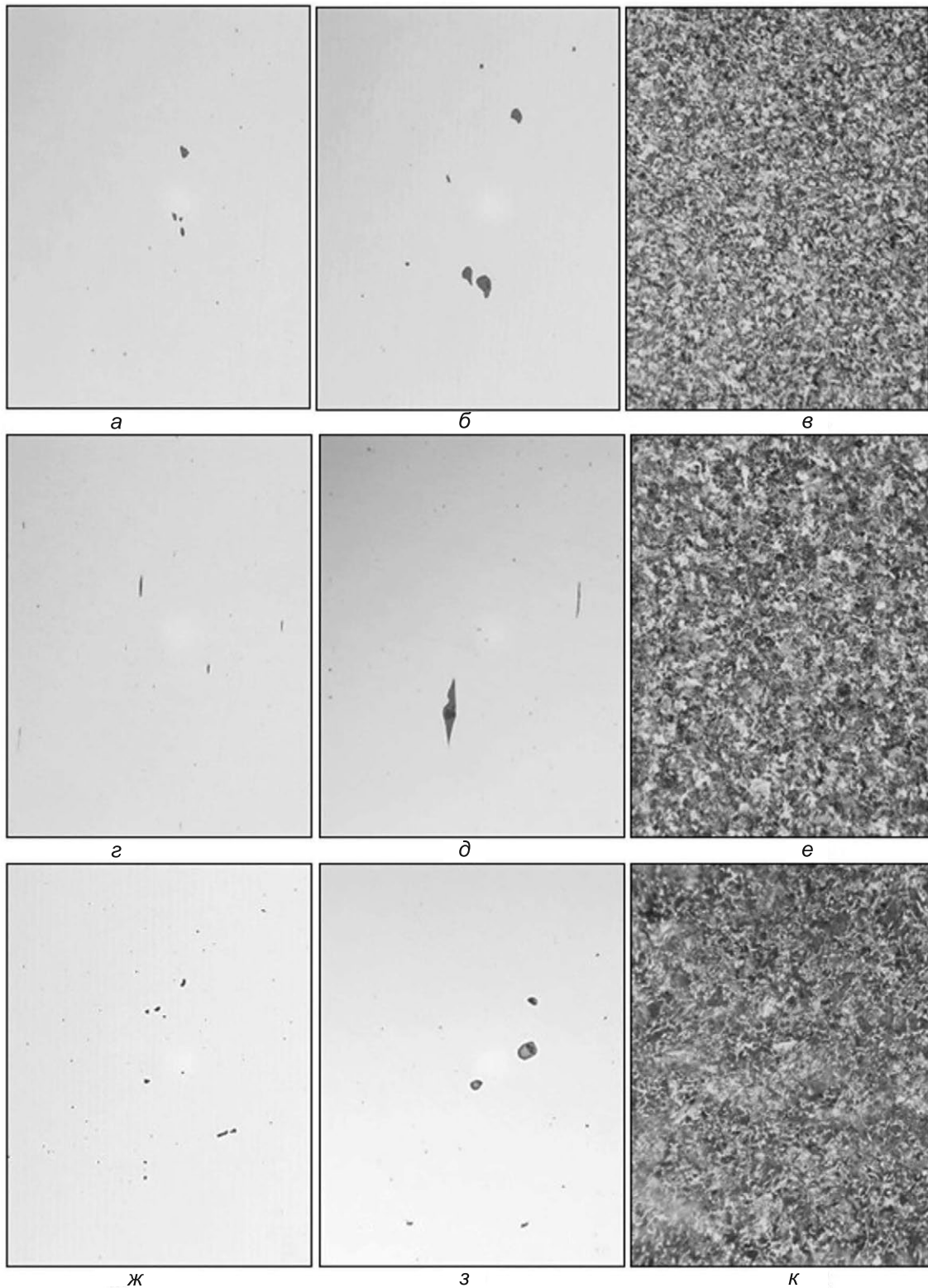


Рис. 4. Неметаллические включения в элементах цельнокатаного колеса: а, б, в – обод; г, д, е – диск; ж, з, к – ступица; а, г, ж – $\times 100$; б, ж, з – $\times 400$; в, е, к – $\times 50$

различными способами производства, показали, что литые колеса, имея меньшую стоимость и более высокие прочностные свойства, по сравнению с цельнокатаными, уступают им по другим показателям надежности. Установлено, что наличие большого количества крупных неметаллических включений неблагоприятной (строчечной) формы может привести к возникновению трещины, и в сочетании с литой, направленной структурой в сечении железнодорожных колес способствует распространению возникшей

трещины. Также низкие значения ударной вязкости, которая характеризует способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки, особенно при минусовых температурах, способствуют повышению вероятности неконтролируемого разрушения изделий в процессе эксплуатации. Определение сферы возможного применения литых колес требует дальнейших исследований.

Выводы

Выполненные в работе сравнительные исследования литых железнодорожных колес марки С, изготовленных по стандарту AAR M-107/M-208, и цельнокатаных колес из сталей марки 2 и Т, изготовленных по ГОСТ 10791-2011, показали следующие результаты:

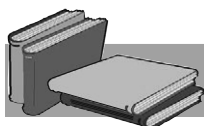
– макроструктура литого колеса имеет выраженную структуру литого металла с присущим ей наличием трех зон (зона мелкозернистой корки, столбчатых кристаллов и равноосных кристаллов) кристаллизации. Для цельнокатаных колес характерна плотная однородная макроструктура;

– микроструктура металла колеса марки С неоднородна, имеет явно выраженную дендритную ликвацию химических элементов. Кроме того, в междендритном пространстве наблюдается большое число неметаллических включений (сульфидов, 3,5 балла). Неметаллические включения в металле литого колеса представляют собой вытянутые, строчечные включения, в то время как микроструктура цельнока-

таного железнодорожного колеса однородная, а неметаллические включения имеют округлую форму;

– установлено, что литые колеса (марка С по AAR M 107/208), имея высокие значения характеристик прочности, (временное сопротивление и твердость), по таким важным показателям надежности как относительное сужение, относительное удлинение, ударная вязкость и вязкость разрушения значительно уступают цельнокатаным колесам (марка Т и 2 по ГОСТ 10791-2011), при этом уровень относительного удлинения, ударной вязкости и вязкости разрушения литых колес не соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011.

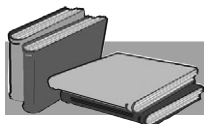
Литые железнодорожные колеса на железных дорогах стран СНГ, очевидно, могут использоваться только на замкнутых маршрутах со специальными условиями эксплуатации. Однако, для более достоверной оценки надежности и долговечности этих изделий необходимо проведение комплекса исследований литых колес с разным уровнем прочности и содержанием углерода.



ЛИТЕРАТУРА

1. Diener M., Ghidini A. Reliability and safety in railway products. Fracture mechanics on railway solid wheels. A challenge for appliers and producers. – 2008, 118 p.
2. Явойский В.И., Левин С.Л., Баптизманский В.И. и др. Металлургия стали. – М.: Металлургия, 1973. – 816 с.
3. Борисенко А.Ю. Формирование структурных зон в стальных отливках // *Металознавство та термічна обробка металів*. – № 2. – 2014. – С. 39–50.
4. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 351 с.
5. Мишин В.М. Структурно-механические основы локального разрушения конструкционных сталей: монография. – Пятигорск: Спецпечат, 2006. – 226 с.
6. Узлов И.Г., Моисеева Л.А., Мирошниченко Н.Г., Умеренкова Н.А., Бабаченко А.И. Вязкость разрушения среднеуглеродистой колесной стали в различных структурных состояниях // *Сталь*. – 1996. – № 4. – С. 51–54.
7. Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Умеренкова Н.А., Моисеева Л.А. Исследование влияния структурного состояния среднеуглеродистых сталей на показатели вязкости разрушения // *Сталь*. – 1997. – № 5. – С. 57–60.
8. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.
9. Георгиев М.Н. Вязкость малоуглеродистых сталей. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
10. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть вторая. Механические свойства. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
11. Витцель В.И., Эдсит Н.Р. Влияние температуры на разрушение. – В сб.: *Разрушение*, Т. 4. – М.: Мир, 1977. – С. 68–105.

Поступила 05.10.2018



REFERENCES

1. Diener, M., Ghidini, A. (2008). Reliability and safety in railway products. Fracture mechanics on railway solid wheels. A challenge for appliers and producers, 118 p. [in English].
2. Yavoyskiy, V.I., Levin, S.L., Baptizmskiy, V.I. et al. (1973). Metallurgy of steel. Moscow: Metallurgiya, 816 p. [in Russian].
3. Borisenko, A. Yu. (2014). Formation of structural zones in steel castings. *Metallurgy and thermal processing of metals*, no. 2, pp. 39–50 [in Russian].
4. Zolotarevsky, V.S. (1983). Mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 351 p. [in Russian].
5. Mishin, V.M. (2006). Structural-mechanical foundations of local destruction of structural steels: monograph. Piatigorsk: Spetspechat', 226 p. [in Russian].
6. Uzlov, I.G., Moiseeva, L.A., Miroshnichenko, N.G., Umerenkova, N.A., Babachenko, A.I. (1996). The viscosity of the destruction of medium carbon steel in various structural states. *Steel*, no. 4, pp. 51–54 [in Russian].

7. Uzlov, I.G., Babachenko, A.I., Umerenkova, N.A., Moiseeva, L.A. (1997). Investigation of the influence of the structural state of medium carbon steels on the indicators of the viscosity of destruction. *Steel*, no. 5, pp. 57–60 [in Russian].
8. Pustovoi, V.N. (1992). Metal structures of lifting machines. Destruction and forecasting of the residual resource. Moscow: Transport, 256 p. [in Russian].
9. Georgiev, M.N. (1973). Viscosity of low-carbon steels. Moscow: Metallurgiya, 224 p. [in Russian].
10. Fridman, Ya.B. (1974). Mechanical properties of metals. The second part. Mechanical properties. Structural strength. Moscow: Mashinostroenie, 368 p. [in Russian].
11. Witsel', V.I., Edsit, N.R. (1977). Influence of temperature on destruction. *Destruction*, Vol. 4, Moscow: Mir, pp. 68–105 [in Russian].

Received 05.10.2018

Анотація

О.І. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор;
Г.А. Кононенко, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник; **А.М. Хулін**,
канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ahulin81@ukr.net;
Ж.А. Дементьєва, наук. співробітник; **О.А. Шпак**, пров. інженер;
О.П. Клинова, пров. інженер

*Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро,
Україна*

Надійність залізничних коліс, виготовлених різними способами виробництва

Досліджено різні показники надійності литих і суцільнокатаних залізничних коліс. Встановлено, що литі колеса (марка С по ААР М 107/208), маючи високі значення міцностних властивостей (тимчасовий опір і твердість), за такими важливими показниками надійності як відносне звуження, відносне подовження, ударна в'язкість і в'язкість руйнування значно поступаються суцільнокатаним колесам (марка Т і 2 по ГОСТ 10791-2011), при цьому рівень відносного подовження, ударної в'язкості і в'язкості руйнування литих коліс не відповідає вимогам ГОСТ 10791-2011.

Ключові слова

Залізничне колесо, неметалеві включення, інтенсивність напружень, механічні властивості, мікроструктура.

Summary

O.I. Babachenko, Doctor of Engineering Sciences, Senior Research Scientist, Director; **A.A. Kononenko**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Scientist; **A.N. Khulin**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Scientist, e-mail: ahulin81@ukr.net; **Zh.A. Dement'eva**, Research Scientist; **E.A. Shpak**, Lead Engineer; **O.F. Klinova**, Lead Engineer

*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro,
Ukraine*

Reliability of railway wheels, manufactured by different production ways

Various indicators of reliability of cast and solid-rolled railway wheels are investigated. It has been found that the cast wheels (grade C on AAR M 107/208), having high values of strength properties (tensile strength and hardness), in such important indicators of reliability as the reduction of area, elongation, impact strength and fracture toughness are much inferior to solid wheels (grades T and 2 according to GOST 10791-2011), while the level of relative elongation, impact strength and fracture toughness of cast wheels does not meet the requirements of GOST 10791-2011.

Keywords

Railway wheel, non-metallic inclusions, stress intensity, mechanical properties, microstructure.