

УДК 621.771.294.003.12(043)

А.И. Бабаченко¹, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

А.А. Кононенко¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

Р.В. Подольский², студент, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1219-348X>

Ж.А. Дементьева¹, мл. науч. сотр. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-4558>

Е.А. Шпак¹, вед. инж. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6707-0877>

О.Ф. Клиновая¹, вед. инж. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

¹Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украина

²Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

Надежность железнодорожных колес, изготовленных разными способами производства

Исследованы различные показатели надежности литых и цельнокатаных железнодорожных колес. Установлено, что литые колеса (класс С по ААР М-107/М-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 ДСТУ ГОСТ 10791:2016), при этом уровень относительно удлинения, ударной вязкости и вязкости разрушения литых колес не соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

Установлено, что наличие большого количества крупных неметаллических включений неблагоприятной (лентообразной) формы может привести к возникновению трещины, которая в сочетании с литой, направленной структурой в сечении железнодорожных колес способствует распространению возникшей трещины. С позиции механики разрушения неметаллические включения являются концентраторами напряжений, такими же, как микротрещины. При этом максимальное напряжение у вершины сульфидного включения, ленточного или эвтектики, характерных для 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 допустимый уровень коэффициента интенсивности напряжений для этих колес в 2 раза. Для цельнокатаного колеса характерна плотная однородная макроструктура; микроструктура цельнокатаного колеса равномерная, а неметаллические включения имеют округлую форму.

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. Установлено, что при пониженных температурах литое колесо имеет значение ударной вязкости в несколько раз ниже, чем цельнокатаные колеса. Определение сферы возможного применения литых колес требует дальнейших исследований.

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 являются сложными, что обусловлено сезонами с низкими и высокими температурами, сложным рельефом местности. Важной задачей является обеспечение безопасности движения подвижного состава, в том числе и за счет использования колес с вы-

сокими 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 обеспечения надежности обода колеса.

Постановка задачи. Надежность колес в эксплуатации в значительной степени обеспечивается соответствием нормативной документации, в которой отражены требования к механическим свойствам стали колес, основные методы испытаний и контроля качества колес и допустимые при этом нормы. На уровень надежности оказывает влияние множество факторов, одним из которых является и способ производства. Наибольшее распространение получили цельнокатаные и литые железнодорожные колеса. Для оценки перспективности использования на железных дорогах Украины литых железнодорожных колес необходимо оценить их основные показатели качества в сравнении с цельнокатаными колесами.

Цель работы: выполнить аналитическую оценку и сравнительные экспериментальные исследования показателей надежности железнодорожных колес (в соответствии с требованиями ДСТУ ГОСТ 10791:2016), изготовленных разными способами.

Объект и методика исследований. Материалом для исследований были колеса производства компании Griffin Wheel в Виннипеге, Канада (код производителя GT) в 2004 году из стали марки С (рис. 1). Для сравнительных исследований были выбраны железнодорожные колеса, изготовленные из сталей марок 2 и Т по ДСТУ ГОСТ 10791:2016. 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 ДСТУ ГОСТ 10791:2016, 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 С по стандарту AAR M-107/M-208 не соответствует требованиям как европейского стандарта на цельнокатаные колеса EN 13262 [1], так и отечественного стандарта ДСТУ ГОСТ 10791:2016, 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 ДСТУ ГОСТ 10791:2016 (до 0,7 % С). Такая тенденция обусловлена тем, что чем выше содержание углерода, тем ниже должна быть температура разлива, легче осуществляется операция литья, меньше влияние на графитовые

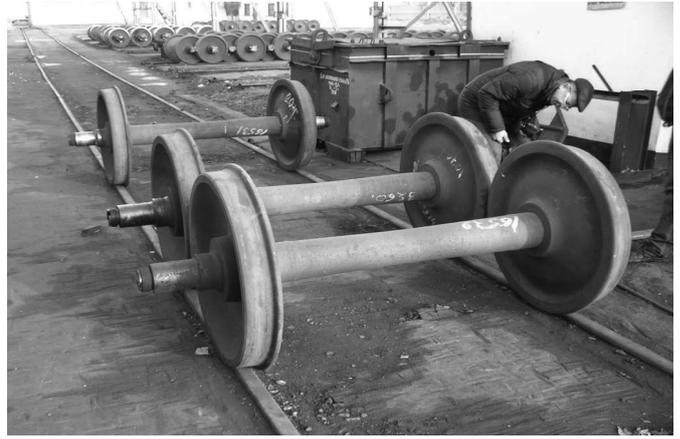


Рис. 1. Колесные пары с исследуемыми колесами

формы, лучше жидкотекучесть стали, ниже вероятность образования литых 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 котором наблюдаются также несплошности, такие как микро- и макропоры, пузырьки.

Контроль макроструктуры в работе проводили по ГОСТ 10243 на поперечных темплетях. В требованиях к макроструктуре железнодорожных колес в ДСТУ ГОСТ 10791:2016 отмечено, что колеса должны быть без флокенов, расслоений, трещин, корочек, остатков усадочных раковин и недопустимых ликваций. Анализ макротемплетов исследуемых железнодорожных колес показал отсутствие вышеперечисленных дефектов. При этом в макроструктуре каждого элемента литого колеса наблюдается осевая пористость (рыхлость), которая содержит пустоты (поры).

Таблица 1

Химический состав исследуемых колес

Марка/класс 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	0,008	0,009	0,20	0,12	0,094
класс С	0,72	0,76	0,46	0,210	0,013	0,08	0,04	–

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 отличаются от свойств в продольном направлении. 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: дробятся 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: слабостравящиеся и сильноостравящиеся полосы (участки). Формирование такой неоднородной микроструктуры объясняется наличием дендритной ликвации. По форме и направлению данных участков четко видны столбчатые и равноосные дендриты литой структуры, такие же, как были обнаружены при исследовании макроструктуры.

Микроструктура цельнокатаных железнодорожных колес ферритно-перлитная и более однородная, чем литого. Количество феррита в структуре больше, чем в литом колесе, это обусловлено 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, являющейся 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 лишь на колесе из стали марки 2.

Во всех исследованных образцах, вырезанных из обода литого колеса, средний размер сульфидов соответствует 3 баллу, что превышает требования ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Размер неметаллических включений в других элементах колеса (диске и ступице) ДСТУ ГОСТ 10791:2016 не регламентирует, но проведенные исследования показали, что средний размер неметаллических включений (сульфидов) в диске и ступице литого колеса составляет 3,5 балла (рис. 3).

Сульфидные включения в цельнокатаном колесе (рис. 4), не превышают 1,5 балла по шкале ГОСТ 1778-70, что соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Эти сульфиды имеют более округлую форму, чем в литом колесе, что делает менее негативным их влияние на показатели надежности, чем сульфидная эвтектика, которая имеет ленточную форму. Остальные неметаллические включения очень мелкие, поэтому их балл не определялся.

С точки зрения надежности железнодорожных колес, наибольшую опасность представляют включения 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.

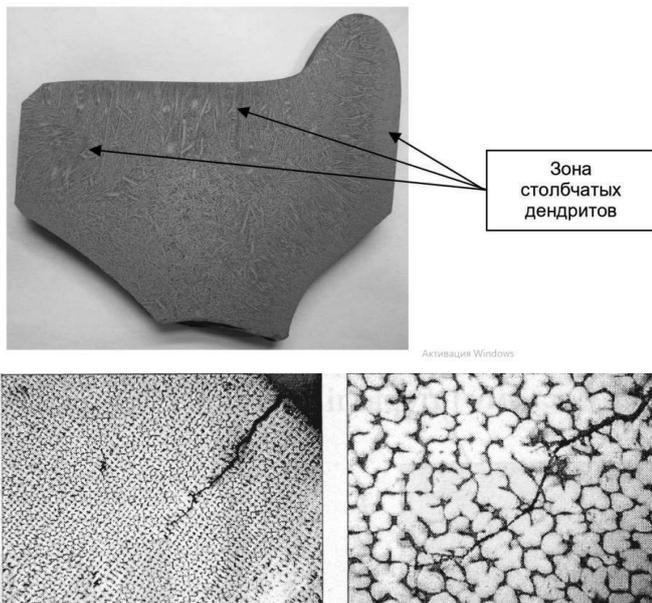


Рис. 2. Макротемплет обода литого колеса и распространение трещины в отливке по зоне столбчатых дендритов [3]

В механике разрушения обычно рассматривается растяжение изотропной бесконечной пластины конечной 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 в вершине 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 способствуют развитию возникшей трещины в литом колесе.

Глобулярные неметаллические включения, наблюдаемые в цельнокатаных колесах, у которых длина примерно равна толщине, более благоприятные по форме с точки зрения концентрации (увеличение) напряжений в его окрестностях. 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 ленточных сульфидных включений, и не превышает коэффициента интенсивности напряжения 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.

ДСТУ ГОСТ 10791:2016 регламентирует проведение целого ряда сдаточных механических испытаний на образцах как металла 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_g) металла обода колеса, относительного удлинения (δ) и сужения (ψ), твердости обода колеса на глубине 30 мм от поверхности катания и ударной вязкости (КСУ) 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 K_{1c} , 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 K_{1c} 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 K_{1c} этих сталей, является величина действительного зерна, дисперсность продуктов распада аустенита, количество и характер распределения структурно-свободного феррита и неметаллических включений. Важное преимущество K_{1c} 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 в своей критической длине, и поэтому характеристика предельной способности к торможению разрушения должна включать не только напряжение, но и длину трещины. Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} 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.

ДСТУ ГОСТ 10791:2016 регламентирует значения вязкости разрушения ≥ 50 МПа·м^{1/2} для железнодорожного подвижного состава с конструкционной скоростью до 200 км/ч и ≥ 70 МПа·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) и не соответствуют требованиям украинского стандарта.

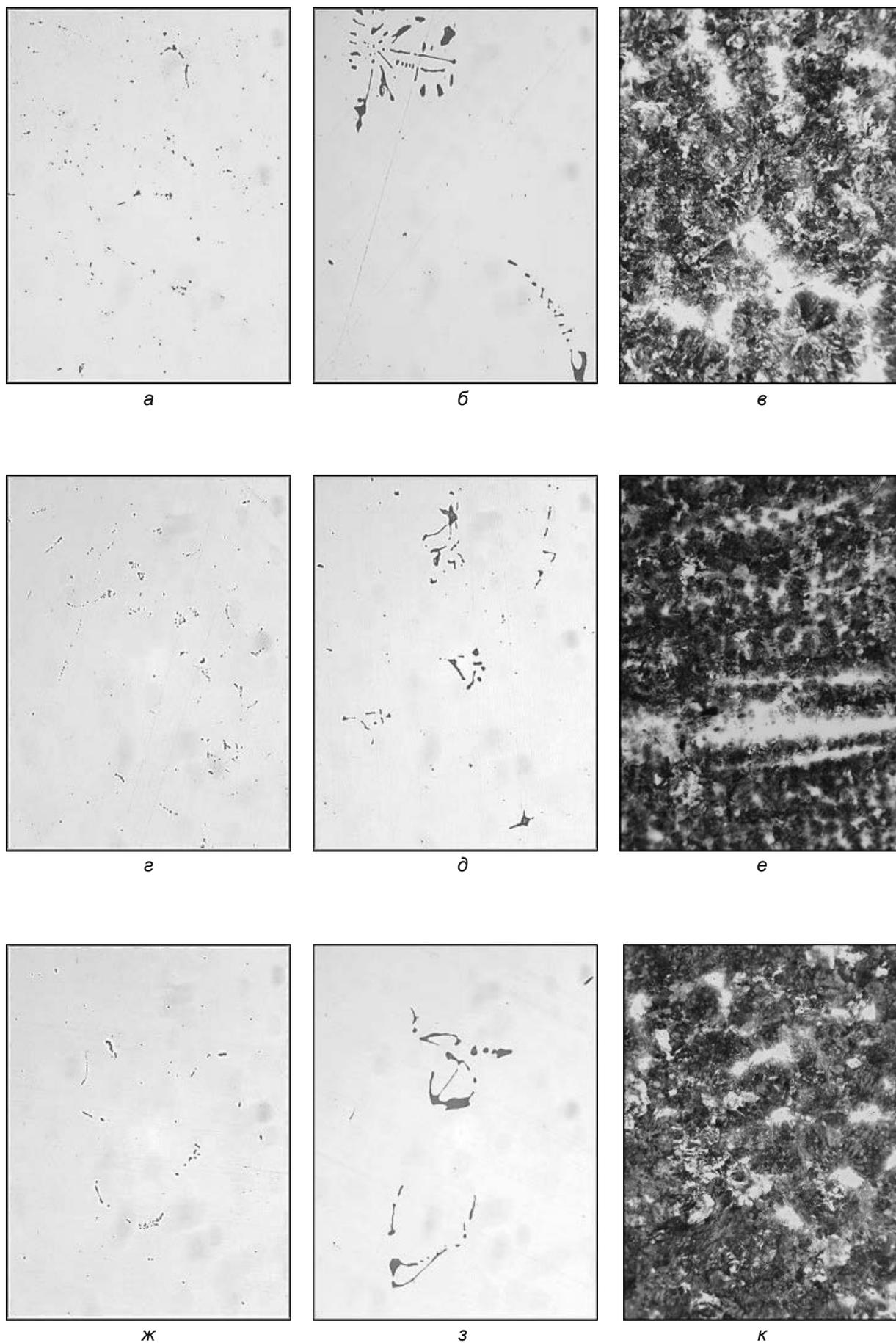


Рис. 3. Неметаллические включения в элементах литого колеса: а, б, в – обод; г, д, е – диск; ж, з, к – ступица; а, г, ж – ×100; б, д, з – ×400; в, е, к – ×50

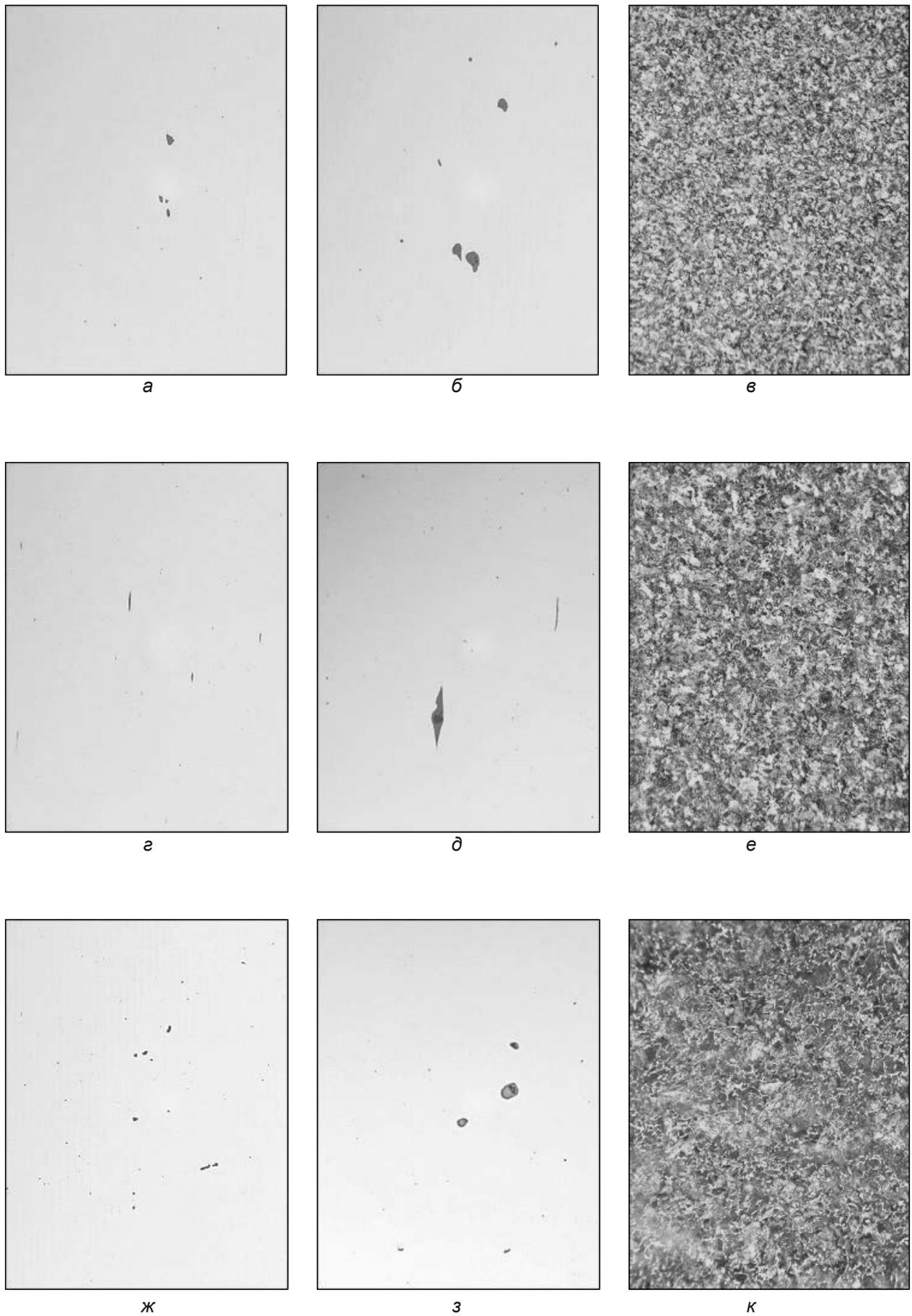


Рис. 4. Неметаллические включения в элементах цельнокатаных колес: а, б, в – обод; г, д, е – диск; ж, з, к – ступица; а, г, ж – $\times 100$; б, д, з – $\times 400$; в, е, к – $\times 50$

Механические свойства исследуемых железнодорожных колес, нормируемые ДСТУ ГОСТ 10791:2016

Марка/класс стали	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Твердость на гл. 30 мм, НВ	Ударная вязкость КСУ $^{+20^\circ\text{C}}$, Дж/см ²		Вязкость разрушения K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
					обод	диск	
класс 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

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, знания работы удара, определенное при температуре 20 °С, не может дать полной информации 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 до минус 60 °С на ударную вязкость образцов, вырезанных из ободьев литых и цельнокатаных железнодорожных колес (табл. 3). Отбор проб проводился в соответствии с требованиями ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

Установлено, что при пониженных температурах литое колесо имеет значение 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 ударной вязкости даже при комнатной температуре ниже, чем у высокопрочных колес из стали марки Т (ДСТУ ГОСТ 10791:2016) при температуре минус 60 °С. То есть требования к контролируемым характеристикам колес в соответствии со стандартом AAR M-107/M-208 не позволяют гарантировать безопасную эксплуатацию колес в различных климатических условиях.

Обсуждение результатов. Аналитическая оценка и сравнительные экспериментальные исследования основных показателей надежности желез-

нодорожных колес, изготовленных 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. Определение сферы возможного применения литых колес требует дальнейших исследований.

Выводы

Выполненные в работе сравнительные исследования литых железнодорожных колес класса С, изготовленных по стандарту AAR M-107/M-208, и цельнокатаных колес с сталей марки 2 и Т, изготовленных по ДСТУ ГОСТ 1071:2016, показали следующие результаты:

– макроструктура литого колеса имеет выраженную структуру литого металла с присущей ей наличием трех зон (зона мелкозернистой корочки, столбчатых кристаллов и равноосных кристаллов) кристаллизации. Для цельнокатаного колеса 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, лентообразные включения, в то время как микроструктура цельнокатаного железнодорожного колеса однородная, а неметаллические включения имеют округлую форму;

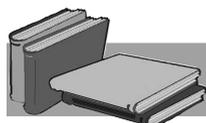
– установлено, что литые колеса (класс С по AAR M-107/M-208), имея высокие значения характеристик прочности, (временное сопротивление и твердость), а по таким важным показателям надежности как относительное сужение, относительное удлинение, ударная вязкость и вязкость разрушения значительно уступают цельнокатаным колесам (марка Т и 2 по ДСТУ ГОСТ 10791:2016), при этом уровень относительного удлинения, ударной вязкости и вязкости разрушения литых колес не соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

Литые железнодорожные колеса на железных дорогах Украины, 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.

Таблица 3

Ударная вязкость исследуемых железнодорожных колес при пониженной температуре

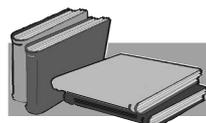
Марка/класс стали	Ударная вязкость при пониженной температуре, Дж/см ²			
	0	-20	-40	-60
марка С	5,2	4,5	3,5	3,0
марка 2	39,3	35,3	32,7	30,1
марка Т	18,6	14,1	11,5	10,1



ЛИТЕРАТУРА

1. Diener, M., Ghidini, A. Reliability and safety in railway products. Fracture mechanics on railway solid wheels. A challenge for appliers and producers. *LRS-techno: series*. 2008. Vol. 1. 118 p.
2. Явойский В.И., Левин С.Л., Баптизманский В.И. и др. *Металлургия стали*. М.: Metallurgiya, 1973. 816 с.
3. Борисенко А.Ю. Формирование структурных зон в стальных оливах. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 2. С. 39–50.
4. Золотаревский В.С. *Механические свойства металлов*. М: Metallurgiya, 1983. 351 с.
5. Мишин В.М. Структурно-механические основы локального разрушения конструкционных сталей: монография. Пятигорск: Спецпечать, 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.: Metallurgiya, 1973. 224 с.
10. Фридман Я.Б. *Механические свойства металлов*. М.: Машиностроение, 1974. 368 с.
11. Витцель В.И., Эдсит Н.Р. Влияние температуры на разрушение. *Разрушение*. М.: Машиностроение. 1977. Т. 4. С. 68–105.

Поступила 29.05.2019



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. *LRS-techno: series*. Vol. 1, 118 p. [in English].
2. Yavoiskiy, V.I., Levin, S.L., Baptizmskiy, V.I. et al. (1973). Steel metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 816 p. [in Russian].
3. Borisenko, A.Yu. (2014). Formation of structural zones in steel castings. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv. Metallurgy and heat treatment of metals*, no. 2, pp. 39–50 [in Russian].
4. Zolotarevskiy, V.S. (1983). Mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 351 p. [in Russian].
5. Mishin, V.M. (2006). Structural-mechanical bases of local destruction of structural steels: monograph. Pyatigorsk: Spetspechat', 226 p. [in Russian].
6. Uzlov, I.G., Moiseeva, L.A., Miroshnichenko, N.G., Umerenkova, N.A., Babachenko, A.I. (1996). Fracture toughness 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). The study of the influence of the structural state of medium carbon steels on the indicators of fracture toughness. *Steel*, no. 5, pp. 57–60 [in Russian].
8. Pustovoy, V.N. (1992). Metal lifting machines. Destruction and prediction of 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. Moscow: Mashinostroenie, 368 p. [in Russian].
11. Vitsel, V.I., Edsit, N.R. (1977). The effect of temperature on destruction. *Destruction*. Moscow: Mashinostroenie, Vol. 4, pp.68–105 [in Russian].

Received 29.05.2019

Анотація

О.І. Бабаченко¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>
Г.А. Кононенко¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>
Р.В. Подольський², студент, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1219-348X>; **Ж.А. Дементьєва**¹, мол. наук. співр. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-4558>; **О.А. Шпак**¹, пров. інж. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6707-0877>; **О.П. Клинова**¹, пров. інж. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

²Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна

Надійність залізничних коліс, виготовлених різними способами виробництва

Досліджено різні показники надійності литих і суцільнокатаних залізничних коліс. Встановлено, що литі колеса (клас С по ААР М-107/М-208), маючи високі значення характеристик міцності (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 ДСТУ ГОСТ 10791:2016), при цьому рівень відносного подовження, ударної в'язкості і в'язкості руйнування литих коліс не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10791: 2016.

Встановлено, що наявність великої кількості великих неметалевих включень несприятливої (стрічкоподібної) форми може призвести до виникнення тріщини, яка в поєднанні з литою, спрямованою структурою в перетині залізничних коліс сприяє поширенню виниклої тріщини. З позиції механіки руйнування неметалеві включення є концентраторами напружень, такими ж, як мікротріщини. При цьому максимальне напруження у вершини сульфідного включення, стрічкового або евтектики, характерних для литого колеса, довжина яких становить близько 0,05 мм, при товщині 0,005 мм, при напруженні в ободі колеса 500 МПа, може досягати величини порядку 3200 Н/мм^{3/2}, що перевищує допустимий рівень коефіцієнта інтенсивності напружень для цих коліс в 2 рази. Для суцільнокатаного колеса характерна щільна однорідна макроструктура; мікроструктура суцільнокатаного колеса рівномірна, а неметалеві включення мають округлу форму.

Також низькі значення ударної в'язкості, яка характеризує здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації і руйнування під дією ударного навантаження, особливо при мінусових температурах, сприяють підвищенню ймовірності неконтрольованого руйнування виробів в процесі експлуатації. Встановлено, що при знижених температурах лите колесо має значення ударної в'язкості в кілька разів нижче, ніж суцільнокатані колеса. Визначення сфери можливого застосування литих коліс вимагає подальших досліджень.

Ключові слова

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

Summary

A.I. Babachenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Director, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>; **A.A. Kononenko**¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>; **R.V. Podolskyi**², student, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1219-348X>; **Zh.A. Dementieva**¹, Junior Researcher at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-4558>; **E.A. Shpak**¹, Lead Engineer at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6707-0877>; **O.F. Klinovaya**¹, Lead Engineer at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

¹*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

²*National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

Reliability of railway wheels manufactured by various manufacturing methods

Different indicators of reliability of cast and solid rolled railway wheels are investigated. It has been found that cast wheels (class C by AAR M-107/M-208), having high values of strength characteristics (temporary resistance and hardness), on such important reliability indicators as relative reduction, relative elongation, impact strength and fracture toughness considerably inferior to solid rolled railway wheels (mark T and 2 according to DSTU GOST 10791: 2016), while the level of relative elongation, impact strength and viscosity of casting wheels do not meet the requirements of DSTU GOST 10791: 2016.

It has been established, that the presence of a large number of large nonmetallic inclusions of an unfavorable (tapeworm) shape can lead to a crack, which, in combination with cast, directed structure at the intersection of railway wheels, contributes to the spread of the resulting cracks. From the position of fracture mechanics, nonmetallic inclusions are stress concentrators, such as microcracks. The maximum tension at the top of the tape or eutectic sulfide inclusion which is characteristic of a cast wheel, whose length is about 0.05 mm, at a thickness of 0.005 mm at a tension in the wheel rim of 500 MPa can reach values of about 3200 N/mm^{3/2}, which exceeds the allowable level of stress intensity factor for these wheels by 2 times. Solid rolled wheel is characterized by a dense homogeneous macrostructure; the microstructure of the whole wheel is uniform, and non-metallic inclusions have a rounded shape.

Also low values of impact strength, which characterizes the ability of the material to absorb mechanical energy in the process of deformation and fracture under the action of shock load, especially at minus temperatures, increase the likelihood of uncontrolled destruction of products during operation. It has been established that at lower temperatures the cast wheel has a value of impact strength a few times lower than the solid rolled wheels. Determining the scope of the possible use of cast wheels requires further research.

Keywords

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