О. І. Бабаченко /д. т. н./, Р. В. Подольський

Національна металургійна академія України,
м. Дніпро, Україна

Г. А. Кононенко /к. т. н./, Ж. А. Дементьєва

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова
Національної академії наук України, м. Дніпро,
Україна
e-mail: A_Babachenko@i.ua

Порівняльні дослідження показників якості залізничних коліс різного способу виробництва

A. I. Babachenko /Dr. Sci. (Tech.)/,
R. V. PodolskyiMetals of the National Metallurgical Academy of
Ukraine, Dnipro, UkraineA. A. Kononenko /Cand. Sci. (Tech.)/,
Zh. A. Dement'evaZ. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the
National Academy of Sciences of Ukraine,
Dnipro, Ukraine
e-mail: A_Babachenko@i.ua

Comparative researches of the quality indicators of the railway wheels of various methods of manufacture

Мета. Проведення порівняльних досліджень таких показників якості, як хімічний склад, макро-, мікро-структура і механічні властивості литих залізничних коліс і суцільнокатаних класу С за ААР М-107/М-208.

Методика. Для виявлення макроструктури металу коліс виконували глибоке гаряче травлення 50%-м водним розчином соляної кислоти за ГОСТ 10243. Оцінка забрудненості металу досліджуваних коліс виконана відповідно до ГОСТ 1778. Мікроструктуру виявляли за допомогою травлення в 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти. Випробування на розтяг металу ободів і дисків коліс проводили відповідно до ГОСТ 1497, твердість – відповідно до ГОСТ 9012, ударну в'язкість визначали за ГОСТ 9454. Результати механічних випробувань перевіряли на відповідність вимогам ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

Результати. Виконано дослідження макро- і мікроструктури литих і суцільнокатаних залізничних коліс. Встановлено, що через особливості виробництва литих залізничних коліс (кристалізується обід колеса, підпитуючись рідким металом через диск, потім кристалізуються диск і маточина) всі три зони, які спостерігаються в сталевому злитку (зона дрібнозернистої скоринки, стовпчастих кристалів і рівновісних кристалів), спостерігаються і в кожному елементі литого залізничного колеса. У металі обода литого колеса середній бал сульфідів становить 3 бали, що не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10791:2016, а сульфідні вclusions в суцільнокатаному залізничному колесі не перевищують 2 бали за шкалою С ГОСТ 1778-70. Показано, що мікроструктура литого залізничного колеса складається з перліту, має неоднорідну структуру (сильно- і слабовитравлювані смуги), формування яких пояснюється наявністю дендритної ліквіації, яка виникає в процесі кристалізації. У суцільнокатаному колесі ліквіаційна неоднорідність виражена слабо, мікроструктура феритно-перлітна, однорідна. Литі колеса класу С за властивостями міцності задовольняють вимоги ДСТУ ГОСТ 10791:2016, що ставляться до коліс зі сталі марки Т, проте не відповідають вимогам до пластичних і в'язких характеристик.

Наукова новизна. Встановлено вплив способу виробництва (лиття, гаряча пластична деформація) на показники якості залізничних коліс.

Практична значущість. Оскільки метал литого залізничного колеса класу С має низькі значення показників надійності, використання литих залізничних коліс можливе, мабуть, тільки на замкнених маршрутах зі спеціальними умовами експлуатації. (Іл. 4. Табл. 4. Бібліогр.: 8 назв.)

Ключові слова: литі залізничні колеса, суцільнокатані залізничні колеса, мікроструктура, макроструктура, кристалізація, властивості.

DOI: 10.33101/s001-120019

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Одним з головних елементів рухомого складу залізничного транспорту є залізничне колесо, яке працює в дуже складних експлуатаційних умовах. Крім статичних навантажень, колесо підлягає ударним навантаженням і термічному впливу, що виникає при гальмуванні. Тому серйозні вимоги ставляться не тільки до конструкції колеса, але і технології його виготовлення. Найбільшого поширення набули литі і суцільнокатані колеса.

Принципово у виробництві суцільнокатаних коліс існують два способи гарячої пластичної деформації колісної заготовки – штампування і прокатка, або тільки штампування.

Виробництво суцільноштампованих коліс для залізничного транспорту не набуло до теперішнього часу значного поширення, що, мабуть, пов'язано з необхідністю використання для його здійснення пресів великого зусилля. Механічні властивості металу, точність геометричних розмірів і економічна ефективність процесу штампування порівняно зі штампуванням у поєднанні з прокаткою має ряд переваг: зниження витрат металу за рахунок зниження допусків і припусків на розміри коліс, можливість легко здійснювати контроль цих розмірів у процесі виготовлення виробів, істотне зниження дисбалансу коліс і дефектів на їх поверхні, спрощення технологічного процесу внаслідок скорочення кількості агрегатів і операцій, формування більш сприятливої макро- і мікроструктури в поверхневому шарі обода, в результаті чого підвищується зносостійкість коліс. Однак процес штампування коліс є малопродуктивним, що не дозволяє розширити його застосування [1].

Найбільш широкого застосування при виробництві залізничних коліс набуло використання операції штампування і прокатки. Технологічні схеми гарячого деформування при виробництві коліс, використовувані на різних підприємствах, як правило, мають загальні елементи технологічних схем: попередню осадку для видалення окалини з бічної поверхні; осадку в кільці; розгонку металу пуансоном для необхідного розподілу його між окремими елементами колеса; остаточну формовку маточини і прилеглої до неї частини диска, попередню формовку обода й іншої частини диска, прокатку обода і прилеглої до нього частини диска на прокатному стані; вигибку диска і калібрування розмірів колеса; прошивку отвору в маточині. Для здійснення цього процесу застосовують кілька гідравлічних пресів і колесопрокатний стан. Число гідравлічних пресів залежить від зусиль, що розвиваються ними, і необхідної продуктивності цеху. Більш потужні преси дозволяють поєднувати деякі з перелічених операцій.

На початку 1950-х років фірми «Griffin Wheel Co» та «Abex Co» США розпочали промислове виробництво сталевих литих коліс, причому з 1960 р. вони складають приблизно половину всіх коліс, споживаних в США. Процес відливання сталевих коліс постійно вдосконалюється, що забезпечує підвищення якості та ефективності їх виробництва.

Фірма «Abex Co» виготовляє сталеві литі колеса двома способами. За першим способом колеса відливають в піщану форму через ливникову чашу, розташовану над маточиною. Така технологія прийнятна при виробництві коліс з невеликою товщиною обода, так званих «одноразових» коліс, які не переточують. При виготовленні коліс, придатних для багаторазових переточувань, ця технологія виявилася неприйнятною. Зі збільшенням маси обода різко збільшилося відбраковування коліс через різні дефекти лиття, а також істотно знизилася стійкість чавунних кокілів. Інший спосіб передбачає використання графіту як основного матеріалу для виготовлення ливарних форм. Висока теплопровідність графіту в поєднанні з низьким коефіцієнтом теплового розширення виключає проблеми, пов'язані зі стійкістю кокілів. Стало можливим поверхню катання охолоджувати одночасно з обома торцями обода.

Фірма «Griffin Wheel Co» використовує також технологію відливання в графітові форми коліс зі сталі, виплавленої в електропечах, проте розливання проводять під тиском. Колеса, відлиті за цією технологією, мають досить точні розміри всіх елементів, відхилення від номіналу не перевищують 0,5 мм.

Сьогодні залізничні колеса у всіх країнах виготовляють в основному з вуглецевої сталі, однак є розбіжності у вимогах до їх хімічного складу та комплексу механічних властивостей залежно від призначення коліс.

Наприклад, американський стандарт AAR M-107/M-208 «Колеса з вуглецевої сталі» для вантажних вагонів передбачає використання коліс класів В, С або D (табл. 1). Литі колеса виготовляються в основному з вуглецевих марок сталі з вмістом вуглецю до 0,77 % С і вище. Така тенденція обумовлена тим, що чим вищий вміст вуглецю, тим нижче має бути температура розливання, легше здійснюється операція лиття і менший вплив на графітові форми, підвищується рідкотекучість сталі, знижується ймовірність утворення ливарних тріщин, газових раковин [2].

Норми українського ДСТУ ГОСТ 10791 на вміст у металі С, Si і S знижені (табл. 1) порівняно з НТД США для додання вітчизняному колесу більш високих пластичних властивостей. Для виготовлення коліс вантажних вагонів оптимальною вважається сталь з 0,65–0,70 % С. При більшій масовій

Вимоги до хімічного складу сталі коліс вантажних вагонів

Нормативний документ, марка сталі	Масова частка елементів, %				
	C	Mn	Si	P	S
ДСТУ ГОСТ 10791-2016					
Марка 2	0,55-0,63	0,5-0,9	0,22-0,45	≤0,030	≤0,025
Марка Т	0,62-0,70	0,60-1,0	0,22-0,65	≤0,030	0,005-0,025
AAR M-107/M-208:2018					
Клас В	0,57-0,67	0,6-0,9	0,15-1,0	≤0,03	0,05-0,04
Клас С	0,67-0,77	0,6-0,9	0,15-1,0	≤0,03	0,05-0,04

частці вуглецю погіршується пластичність і опір крихкому руйнуванню, підвищується ймовірність розвитку на поверхні кочення коліс поперечних тріщин внаслідок теплового впливу гальмівних колодок при терті [3]. У цілому різниця в хімічному складі металу коліс за ДСТУ і ААР незначна. Основний ефект у підвищенні споживчих властивостей вітчизняних коліс порівняно з іноземними литими колесами досягається в результаті ковальсько-прокатного переділу литої заготовки в готовий виріб [4].

Мета роботи – проведення порівняльних досліджень таких показників якості, як хімічний склад, макро-, мікроструктура та механічні властивості литих та суцільнокатаних залізничних коліс класу С.

Матеріалом для досліджень були литі колеса класу С і в ролі порівняльних – суцільнокатані колеса класу С, виготовлені за М-107/М-208. Хімічний склад досліджуваних коліс наведено в табл. 2.

Визначення механічних властивостей виконували в рамках вимог ДСТУ ГОСТ 10791:2016, оскільки стандарт М-107/М-208 передбачає лише контроль твердості на бічній поверхні обода колеса.

Результати досліджень. Хімічний склад досліджуваних залізничних коліс був дуже близьким, тому порівняння за іншими показниками якості коректно відображає вплив саме технології виробництва.

Порівняльні дослідження макроструктури проводили на протравлених поперечних темплеттах всіх елементів коліс. Для виявлення дефектів, що порушують суцільність металу (тріщин, пор, раковин), виконували глибоке гаряче травлення відшліфованого зразка водним розчином соляної кислоти за ГОСТ 10243. Зважаючи на особливості виробництва литих залізничних коліс (кристалізується обід колеса, підживлюючись рідким

металом через диск, потім кристалізуються диск і маточина), всі три зони, які спостерігаються в сталевому злитку (зона дрібнозернистої кірочки, стовпчастих кристалів і рівновісних кристалів), спостерігаються і в кожному елементі литого колеса (рис. 1а). Крім того, в макроструктурі кожного елемента литого колеса спостерігається осьова пористість (рихлість), яка містить порожечі (пори).

При виробництві суцільнокатаних залізничних коліс застосовують операцію гарячої пластичної деформації, яка виправляє більшість дефектів литої структури, підвищує якість металу шляхом перетворення литої структури в деформовану, тим самим прибирає анізотропію властивостей обода і маточини колеса і формує сприятливо спрямовану структуру в диску (рис. 1б). [5] Це обумовлене тим, що при гарячій пластичній деформації колісної заготовки відбуваються суттєві якісні зміни литої структури: руйнуються дендрити, подрібнюються первинні зерна, деформуються неметалеві включення в об'ємі зерен, а також може усуватися міжкристалітна пористість і суттєво зменшується хімічна (ліквіаційна) неоднорідність.

У цей час доведено, що одними з факторів, що знижують довговічність сталевих виробів, у тому числі й залізничних коліс, є неметалеві включення. Забрудненість ними готової металопродукції традиційно регламентують за допомогою обмеження вмісту сірки і кисню в металі, і характеризують максимально допустимим розміром включень. Неметалеві включення в сталі є чужорідними тілами, що порушують однорідність її структури, тому їх вплив на механічні та інші властивості може бути значним. Неметалеві включення, особливо неправильної форми з гострими кінцями і кутами, відіграють роль концентраторів

Таблиця 2

Хімічний склад досліджуваних коліс класу С

Спосіб виробництва	Вміст елементів, мас. %							
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	V
Гаряча пластична деформація	0,73	0,76	0,28	0,008	0,013	0,14	0,10	-
Стальне литво у форми	0,72	0,76	0,46	0,021	0,013	0,08	0,04	-

Рис. 1. Макроструктура литого (а) (1 – зона дрібних рівновісних дендритів (дрібнозерниста скоринка), 2 – зона стовпчастих дендритів (зона транскристалізації), 3 – зона рівновісних різноорієнтованих дендритів) та суцільнокатаного (б) колеса класу С

напружень і можуть викликати утворення тріщини, що є осередком подальшого втомного руйнування. Вирішальне значення при вивченні впливу неметалевих включень на якість сталі мають їх властивості: розмір, форма, хімічні і фізичні характеристики, а також характер розташування у відношенні до зерен литого металу [6].

У всіх елементах литого колеса (обід, диск, маточина) оцінку неметалевих включень виконували відповідно до ГОСТ 1778 за сульфідами марганцю, тому що вони займають максимальну площу шліфа (рис. 2). У всіх досліджених зразках, вирізаних з обох литего колеса, середній бал сульфідів становить 3 бали, оксиди точкові – до 3 балів, оксиди рядкові – до 3,5 балів, що перевищує вимоги ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Розмір неметалевих включень в інших елементах колеса (диску і маточині) ДСТУ ГОСТ 10791:2016 не регламентує, але проведені дослідження показали, що середній розмір неметалевих включень (сульфідів) у диску і маточині колеса становить 3,5 бали. Крім сульфідів, присутні складні неметалеві включення – оксисульфонітриди. У всіх елементах колеса присутні дрібні несучільності (пори).

Сульфідні включення в суцільнокатаному колесі класу С (рис. 2) не перевищують 2 балів за шкалою С ГОСТ 1778-70, що відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Ці сульфідні мають більш округлу форму, ніж у литому колесі, що чинить менш негативний вплив на показники надійності, ніж сульфідна евтектика, що має стрічкову форму. Решта неметалевих включень дуже дрібні, тому бал їх не визначався.

Рис. 2. Неметалеві включення в елементах литого та суцільнокатаного коліс класу С:
а, б – обід; в, г – диск; д, е – маточина; а, в, д – $\times 100$; б, г, е – $\times 400$

Мікроструктура всіх досліджуваних зразків з литого колеса складається з перліту, має неоднорідну будову – сильно- і слабовитравлювані смуги (ділянки) (рис. 3). Формування такої неоднорідної мікроструктури пояснюється наявністю дендритної ліквідації, що виникає в процесі кристалізації. За формою і напрямом цих ділянок чітко видно стовпчасті і рівновісні дендрити литої структури, які були виявлені при дослідженні макроструктури. В ободі біля поверхні катання спостерігаються стовпчасті дендрити, в центрі і ближче до диска – рівновісні дендрити. У диску колеса спостерігаються стовпчасті дендрити, що ростуть від поверхні диска вглиб, а в зразках з маточини – суміш рівновісних і стовпчастих дендритів.

Згідно з даними [7] в ліквідаційних мікрооб'ємах вуглецевої сталі (0,42–0,50 % С) вміст марганцю на 50 % вищий, ніж в мікрооб'ємах без видимої ліквідації. В цих мікрооб'ємах підвищений вміст марганцю сприяє зниженню коефіцієнта термодинамічної активності вуглецю і збільшенню його концентрації [8], і в них практично завжди спостерігаються неметалеві включення (пластичні сульфіди, силікати глобулярні, складні комплексні включення і т. д.) як поодинокі, так і їх скупчення.

Чітко видно, що неметалеві включення розташовуються в основному в міждендритному про-

сторі. В ободі велику площу займає сфероїдизований перліт. Кількість пластинчастого перліту і відстань між пластинками в самому перліті збільшується від ободу до маточини. Кількість структурно-вільного фериту настільки мала, що його можна побачити тільки при великому збільшенні. Виділяється він у вигляді дуже тонких прошарків по межі зерен.

Мікроструктура суцільнокатаного залізничного колеса класу С більш однорідна, ніж литого (рис. 3). Ліквідаційна неоднорідність виражена слабо. Мікроструктура феритно-перлітна, однорідна. Рівномірність структури досягається завдяки впливу гарячої пластичної деформації і термічної обробки, які вирівнюють негативні наслідки дендритної кристалізації литого металу.

Надійність коліс в експлуатації значною мірою визначається вимогами нормативної документації, в якій відображені механічні властивості сталі коліс, основні методи випробувань і контролю якості коліс і допустимі при цьому норми. Основні вимоги до механічних властивостей колісної сталі наведені в табл. 3. ДСТУ ГОСТ 10791:2016 регламентує проведення цілого ряду здавальних механічних випробувань на зразках як з ободів, так і дисків залізничних коліс, що дає повну картину якості і надійності виробу. Стандарт М-107/М-208 регламентує тільки величину значення твердості,

Рис. 3. Мікроструктура елементів литого та суцільнокатаного коліс класу С:

а, б – обід; в, г – диск; д, е – маточина; а, в, д – $\times 100$; б, г, е – $\times 400$

визначену на бічній (зовнішній) поверхні обода залізничного колеса.

У роботі були виконані випробування досліджуваних коліс (литих і суцільнокатаних коліс класу С) з визначенням величин тимчасового опору (σ_b) металу обода колеса, відносного видовження (δ) і звуження (ψ), твердості обода колеса на глибині 30 мм від поверхні катання і ударної в'язкості (КСУ) обода і диска.

Результати механічних випробувань відповідно до ДСТУ ГОСТ 10791:2016 литих і суцільнокатаних коліс класу С наведені в табл. 4.

Аналіз отриманих даних механічних випробувань показав, що метал литого колеса має порівняно із суцільнокатаним колесом класу С близькі значення міцнісних властивостей (тимчасового опору і твердості) з низькими пластичними характеристиками і ударною в'язкістю. Литі колеса класу С за міцнісними властивостями задовольняють вимоги ДСТУ ГОСТ 10791:2016, що ставляться до коліс зі сталі марки Т, проте не відповідають вимогам до пластичних і в'язких характеристик.

При використанні стандартних зразків при випробуваннях на розтяг внесок зосередженої деформації в загальне відносне видовження для більшості металів і сплавів порівняно невеликий. Тому для них величина δ характеризує в основному здатність до рівномірної деформації, а не граничну пластичність матеріалу. Для характеристики граничної здатності матеріалу до пластичного розтягування до розриву більш правильно оцінювати відносне звуження ψ , яке є характеристикою в основному зосередженої деформації.

Низькі значення відносного звуження і значень ударної в'язкості металу, як обода, так і диска пояснюються наявністю спрямованої макроструктури в цих елементах колеса і наявністю велико-

го числа крупних сульфідів і несучільностей у вигляді пор, що в комплексі може призвести до крихкого руйнування металовиробу (рис. 4).

Рис. 4. Крихке руйнування (тріщина) литого колеса класу «С» [2]

Висновки

1. Показано, що макроструктура литого колеса має типово виражену структуру литого металу з властивою їй наявністю трьох зон (зона дрібнозернистої корки, стовпчастих кристалів і рівновісних кристалів) кристалізації. Для суцільнокатаного колеса характерна щільна однорідна макроструктура.

2. Встановлено високу забрудненість неметалевими включеннями всіх елементів литих коліс (диск, обід, маточина). Середній розмір сульфідних включень в ободі литого колеса дорівнює 3 балам, що перевищує вимоги ДСТУ ГОСТ 10791:2016, в диску і маточині – 3,5 бали. Середній розмір сульфідних включень в ободі суцільнокатаного колеса – не більше 2 балів. У всіх елементах литого колеса (в т.ч. і в ободі) виявлені пори, що є неприпустимим дефектом за ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

3. Показано, що мікроструктура литого залізничного колеса складається з перліту, має нео-

Таблиця 3

Вимоги до механічних властивостей колісної сталі за ДСТУ ГОСТ 10791:2016

Марка сталі	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	Твердість НВ	Ударна в'язкість КСУ при температурі +20 °С, Дж/см ²	
					Обід	Диск
ГОСТ 10791-2011						
Марка 2	910–1110	≥8	≥14	На глибині 30 мм ≥255	≥20	≥20
Марка Т	≥1020	≥9	≥16	≥320	≥18	≥18
М-107/М-208	–	–	–	На бічній поверхні 321–363	–	–
Клас С						

Таблиця 4

Результати механічних випробувань досліджуваних коліс класу С

Спосіб виробництва	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	НВ на глибині 30 мм	Ударна в'язкість КСУ при температурі +20 °С, Дж/см ²	
					Обід	Диск
Гаряча пластична деформація	1167,0	12,0	31,0	332,5	23,7	16,3
Стальне литво у форми	1206,3	9,2	14,4	349,3	8,5	5,11

днорідну будову (сильно- і слабовитравлювані смуги), формування яких пояснюється наявністю дендритної ліквідації, що виникає в процесі кристалізації. У суцільнокатаному колесі ліквідаційна неоднорідність виражена слабо, мікроструктура феритно-перлітна, однорідна.

4. Встановлено, що лите колесо за такими важливими показниками надійності, як відносне зрушення, відносне подовження, ударна в'язкість значно поступається суцільнокатаному колесу, при цьому рівень відносного подовження, ударної в'язкості литих коліс не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Суцільнокатане колесо має високий рівень як міцнісних властивостей, так і показників пластичності та в'язкості.

Бібліографічний список / References

1. Бюл. ин-та Черметинформация / Г. А. Бибик, М. И. Староселецкий, М. С. Валетов и др. – 1977. – № 16 (904). – С. 19–36.

Bibik G. A., Staroseletskiy M. I., Valetov M. S. *Byul. in-ta Chermetinformatsiya*, 1977, no. 16 (904), pp. 19-36.

2. 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.

3. Узлов И. Г. Прогрессивные процессы производства и качество колес / И. Г. Узлов // Сталь. – 2003. – № 5. – С. 69–72.

Uzlov I. G. *Progressivnye protsessy proizvodstva i kachestvo koles. Stal'*, 2003, no. 5, pp. 69-72.

4. Гетманова М. Е. Особенности химического состава и свойств стали литых и цельнокатанных железнодорожных колес / М. Е. Гетманова, Д. С. Илюхин, А. Н. Никулин, Г. А. Филиппов // Сталь. – М.: Инжермет Инжиниринг, 2017. – С. 59–66.

Getmanova M. E., Ilyukhin D. S., Nikulin A. N., Filippov G. A. *Osobennosti khimicheskogo sostava i svoystvo stali litykh i tsel'nokatanykh zheleznodorozhnykh koles. Stal'*. Moscow, Inzhermet Inzhiring, 2017, pp. 59-66.

5. Анализ макро- и микроструктуры железнодорожных колес, изготовленных различными способами производства / А. И. Бабаченко, А. В. Кныш, А. А. Кононенко, Ж. А. Дементьева, Е. А. Шпак, О. Ф. Клиновья // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – 2015. – Вып. 80. – С. 27–32.

Babachenko A. I., Knysh A. V., Kononenko A. A., Dement'eva Zh. A., Shpak E. A., Klinovaya O. F. *Analiz makro- i mikrostruktury zheleznodorozhnykh koles, izgotovlennykh razlichnymi sposobami proizvodstva. Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*, 2015, issue 80, pp. 27-32.

6. Бабаченко А. И. Оценка степени деформационной проработки колёсных заготовок по из-

менению параметров дендритной структуры / А. И. Бабаченко, Е. Г. Дёмина, А. В. Кныш, А. Н. Хулин, Ж. А. Дементьева // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – 2016. – Вип. 9. – С. 21–32.

Babachenko A. I., Demina E. G., Knysh A. V., Khulin A. N., Dement'eva Zh. A. *Otsenka stepeni deformatsionnoy prarabotki kolesnykh zagotovok po izmeneniyu parametrov dendritnoy struktury. Visnik ukrains'kogo materialoznavchogo tovaristva*, 2016, issue 9, pp. 21-32.

7. Жуков А. А. Термодинамические аспекты оптимизации состава комплекснолегированных сталей / А. А. Жуков // Основы литейных сплавов: труды XIV совещания по теории литейных процессов. – Москва: Наука, 1970. – С. 82–85.

Zhukov A. A. *Termodinamicheskie aspekty optimizatsii sostava kompleksnolegirovannykh staley. Osnovy liteynykh splavov: trudy XIV soveshchaniya po teorii liteynykh protsessov. Moscow, Nauka*, 1970, pp. 82-85.

8. Пустовой В. Н. Metallokonstruktsii gruzopodemnykh mashin. Razrushenie i prognozirovaniye ostatochnogo resursa / В. Н. Пустовой. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.

Pustovoy V. N. *Metallokonstruktsii gruzopodemnykh mashin. Razrushenie i prognozirovaniye ostatochnogo resursa. Moscow, Transport*, 1992, 256 p.

Цель. Проведение сравнительных исследований таких показателей качества, как химический состав, макро-, микроструктура и механические свойства литых железнодорожных колес и цельнокатаных класса С по ААР М-107/М-208.

Методика. Для выявления макроструктуры металла колес выполняли глубокое горячее травление 50%-м водным раствором соляной кислоты по ГОСТ 10243. Оценка загрязнённости металла исследуемых колёс выполнена в соответствии с ГОСТ 1778. Микроструктуру выявляли с помощью травления в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Испытания на растяжение стали ободьев и дисков колес проводили в соответствии с ГОСТ 1497, твердость – по ГОСТ 9012, ударную вязкость определяли по ГОСТ 9454. Результаты механических испытаний проверяли на соответствие требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016

Результаты. Выполнены исследования макро- и микроструктуры литых и цельнокатаных железнодорожных колес. Установлено, что ввиду особенностей производства литых железнодорожных колес (кристаллизуется обод колеса, питаясь жидким металлом через диск, затем кристаллизуются диск и ступица) все три зоны, которые наблюдаются в стальном слитке (зона мелкозернистой корочки, столбчатых кристаллов и равноосных кристаллов), наблюдаются и в каждом элементе литого железнодорожного колеса. В металле обода литого колеса, средний балл сульфидов составляет 3 балла, что не соответствует требованиям ГОСТ 10791:2016, а сульфидные включения в цельнокатаном желез-

нодородном колесе не превышают 2 баллов по шкале С ГОСТ 1778-70. Показано, что микроструктура литого железнодорожного колеса состоит из перлита, имеет неоднородную структуру (сильно- и слаботравящиеся полосы), формирование которых объясняется наличием дендритной ликвации, которая возникает в процессе кристаллизации. В цельнокатаном колесе ликвационная неоднородность выражена слабо, микроструктура ферритно-перлитная, однородная. Литые колеса класса С по прочностным свойствам удовлетворяют требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016, предъявляемым к колесам из стали марки Т, однако не соответствуют требованиям к пластическим и вязким характеристикам.

Научная новизна. Установлено влияние способа производства (литье, горячая пластическая деформация) на показатели качества железнодорожных колес.

Практическая значимость. Поскольку металл литого железнодорожного колеса класса С имеет низкие значения показателей надежности, использование литых железнодорожных колес возможно, по-видимому, только на замкнутых маршрутах со специальными условиями эксплуатации.

Ключевые слова: литые железнодорожные колеса, цельнокатаные железнодорожные колеса, микроструктура, макроструктура, кристаллизация, свойства.

Purpose. Conducting comparative studies of such quality indicators as chemical composition, macro-, microstructure and mechanical properties of cast railway wheels and solid-rolled C class according to AAR M-107/M-208.

Methodology. To identify the macrostructure of the metal of the wheels, deep hot etching was performed with a 50 % aqueous hydrochloric acid solution according to GOST 10243. An assessment of the contamination of the metal of the wheels under study was performed in accordance with GOST 1778. The microstructure was detected by etching in 4 % alcoholic nitric acid solution. Tensile tests of steel rims and wheel disks were carried out in accordance with GOST 1497, hardness according

to GOST 9012, impact strength was determined according to GOST 9454. The results of mechanical tests were checked for compliance with the requirements of DSTU GOST 10791:2016

Findings. The macro and microstructures of cast and solid-rolled railway wheels were studied. It was established that due to the characteristics of the production of cast railway wheels (the wheel rim crystallizes, feeding on liquid metal through a disk, then the disk and hub crystallize), all three zones that are observed in a steel ingot (a zone of fine-grained crust, columnar crystals and equiaxial crystals) are observed and in each element of the cast railway wheel. In the metal of the rim of the cast wheel, the average score of sulphides is 3 points, which does not meet the requirements of GOST 10791:2016, and the sulphide inclusions in the whole-rolled railway wheel do not exceed 2 on the C scale of GOST 1778-70. It is shown that the microstructure of a cast railway wheel consists of perlite, has a heterogeneous structure (strongly and weakly treated strips), the formation of which is explained by the presence of dendritic segregation, which occurs in the process of crystallization. In the solid-rolled wheel, segregation heterogeneity is weakly expressed, the microstructure is ferritic-pearlitic, homogeneous. The cast wheels of class C according to the strength properties satisfy the requirements of DSTU GOST 10791:2016 for wheels made of steel grade T, but do not meet the requirements for plastic and viscous characteristics.

Originality. The influence of the production method (casting, hot plastic deformation) on the quality indicators of railway wheels has been established.

Practical value. Since the metal of a cast railway wheel of class C has low values of reliability indicators, the use of cast railway wheels is possible, apparently, only on closed routes with special operating conditions.

Key words: cast railway wheels, all-rolled railway wheels, microstructure, macrostructure, crystallization, properties.

Рекомендована до друку
д. т. н. Л. Н. Дейнекою

Надійшла 04.04.2019