

О.І. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>**К.Г. Дьоміна**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: katya20@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-9668-8169>**Г.А. Кононенко**, канд. техн. наук, вчений секретар, e-mail: perlit@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>**О.А. Сафронова**, студентка, інженер 1 категорії, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

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

Аналіз існуючих способів підвищення якості металопродукції залізничного призначення

В статті представлено аналіз існуючих публікацій, в яких висвітлені питання підвищення міцності та надійності осей колісних пар. Підвищення міцності та терміну служби осей може бути досягнуто тільки комплексно: поліпшенням конструкції, раціональним вибором матеріалу, методів його обробки та зміцнення. Важливу роль при цьому відіграє поліпшення умов експлуатації рухомого складу і догляд за ним.

Якщо раніше спостерігалася тенденція забезпечити надійність роботи осі переважно за рахунок збільшення перерізу, то в даний час цей шлях фактично вичерпав себе і поступається місцем прийомам збільшення втомної міцності. Можливості в цій області є досить широкими. Їм і приділено основну увагу в цій статті.

Для вирішення задачі підвищення якості осей залізничних вагонів можна виділити наступні основні способи: заходи, спрямовані на підвищення якості сталі для виробництва осей в процесі її виплавки (зниження вмісту сірки, фосфору, водню і т. п.); легування та мікролегування сталі для виготовлення залізничних осей; поліпшення пророблюваності металу осьових заготовок в процесі гарячої деформації; вибір і розробка оптимальних режимів термічної обробки осьових заготовок.

На наш погляд, поліпшення пророблюваності металу осьових заготовок в процесі гарячої деформації є саме тим способом підвищення якості залізничних осей, що не потребує заходів, які суттєво здорожують існуючу технологію їх виготовлення. Оскільки за рахунок інтенсивної деформаційної дії у звичайній вуглецевій сталі можна покращити якість її макроструктури, сформувати сприятливий розподіл спадкоємної хімічної неоднорідності кремнію та марганцю в її мікроструктурі, який забезпечить утворення дрібнозернистої і рівномірної ферито-перлітної мікроструктури. Усе це буде сприяти підвищенню характеристик пластичності, в'язкості та міцності при циклічних напруженнях вуглецевих сталей конструкційного призначення, зокрема для виготовлення залізничних осей.

Ключові слова: залізнична вісь, сталь, легування та мікролегування, пророблюваність, термічна обробка, мікроструктура.

Сучасний стан проблеми. Для забезпечення безпеки руху поїздів особливо великого значення набуває підвищення міцності та надійності осей колісних пар, які повинні витримувати тривалу безаварійну роботу. При цьому змінюваність осей рухомого складу в експлуатації все ще продовжує залишатися значною, що свідчить про складні умови їх навантаження [1].

Вагонний парк АТ «Укрзалізниця» знаходиться у критичному стані – його зношеність складає близько 90 % [2]. В умовах поживавлення економіки перед вантажовласниками постала проблема гострого дефіциту вагонів. Для забезпечення всіх заявок на перевезення не вистачає вантажного рухомого складу. Серед інших причин такої «вагонної недостатності» з одного боку, а з іншого – простоїв рухомого складу є те, що галузь вагонобудування України відчуває гостру потребу у деталях – комплектуючих ходових частин. Зокрема, існує дефіцит осей колісних пар з навантаженням 23,5 тс [3].

На виготовлення осей для колісних пар, що ремонтуються, у великій кількості витрачається сталь. Тому заходи з продовження їх служби мають значний вплив і на економію металу.

Підвищення міцності та терміну служби осей може бути досягнуто тільки комплексно: поліпшенням конструкції, раціональним вибором матеріалу, методів їх обробки та зміцнення. Важливу роль при цьому відіграє поліпшення умов експлуатації рухомого складу і догляд за ним.

Якщо раніше спостерігалася тенденція забезпечити надійність роботи осі переважно за рахунок збільшення перерізу, то в даний час цей шлях фактично вичерпав себе і поступається місцем прийомам збільшення втомної міцності. Можливості в цій області є досить широкими. Їм і приділено основну увагу в цій статті.

Аналіз існуючих публікацій. Як зазначає автор роботи [4], забезпечення, збереження та підтримання міцності осей колісних пар здійснюються різними

способами залежно від знижуючого її фактора. Існує кілька способів:

1) застосування різних присадок, паст, лаків і покриттів для зменшення фретинг-корозії і відповідно її впливу на міцність осей;

2) накатка поверхні осі колісної пари з вуглецевої сталі для утворення на її поверхні напруження стиснення, що підвищує міцність накатаної осі у порівнянні з ненакатаною віссю;

3) для недопущення пошкоджень поверхні осі від корозії і механічних пошкоджень і також впливу агресивних середовищ на осі наносять захисні покриття [5–8];

4) застосування технологічних способів зміни механічних властивостей матеріалу осей, яке покращує його характеристики міцності.

Встановлення причин виходу деталей з ладу є відправною базою для розробки заходів з підвищення їх міцності. На основі аналізу пошкоджуваності та причин виходу з експлуатації осей, розкриття особливостей утворення і розвитку тріщин, дослідження міцності шляхом випробування натурних зразків і моделей, а також в результаті статистичних методів аналізу впливу на міцність даються відповідні рекомендації. Останніми, крім перших трьох способів, що описані вище, передбачено поліпшення складу, структури та властивостей металу, нові методи контролю якості, комплексне зміцнення осей термічною обробкою та ін. Існують також шляхи продовження термінів служби в експлуатації і повторного використання осей, які отримали пошкодження.

Підвищення міцності осей накочуванням дозволило по-новому підійти до вибору сталі для них. Накочування дало можливість застосувати сталь з підвищеною міцнісною характеристикою, що забезпечує високу стійкість осей в експлуатації. При цьому ефективність накочування як засобу підвищення міцності збільшується з ростом міцнісної характеристики сталі. Накочування дозволяє підійти до практичного вирішення питання про застосування для осей термічної обробки – загартування та відпуску [1].

З урахуванням необхідності економії легуючих елементів, а також зниження трудових і матеріальних витрат на виготовлення деталей рухомого складу, більш раціональним визнано напрям кращого використання вуглецевої сталі за рахунок коригування її складу і застосування різних засобів зміцнення, в першу чергу поверхневого. До того ж в умовах пресових посадок легована сталь не завжди має переваги перед вуглецевою, і її використання не виключає, а навпаки, ще більше підкреслює необхідність застосування накочування та інших засобів зміцнення, оскільки тільки в цьому випадку можуть бути повністю реалізовані підвищені механічні властивості легованої сталі як матеріалу для осей і валів.

Сумісне поверхневе термічне і механічне зміцнення накочуванням сприяє значному підвищенню втомної міцності осей. При цьому встановлено, що максимальне підвищення втомної міцності досягається при накочуванні осей, що мають підвищені значення статичної міцності. Однак, до теперішнього часу ці роботи ще не знайшли промислового застосування [9].

У роботі [10] було досліджено процес руйнування осей колісних пар в ході їх експлуатації. Визначено, що руйнування осей колісних пар, як правило, відбувається в поверхневому шарі. Розглянуто методи поверхневого пластичного деформування поверхневого шару, що забезпечують підвищення втомної міцності. Аналіз результатів випробувань зразків на втому показав, що значення границь обмеженої втоми при розтягуванні зразків, що піддані вібраційній обробці, на 10 % вище, ніж у зразків, оброблених за серійною технологією. Для великогабаритного виробу, яким є ось колісної пари, рекомендується використання обладнання для дробоструминної обробки, що забезпечить рівномірний розподіл величини залишкових напружень по глибині зміцненого шару.

У роботах [11, 12] узагальнено та проаналізовано результати дослідження процесів і якості металу на всіх стадіях наскрізної технологічної схеми, а також дані дослідно-промислового освоєння виробництва

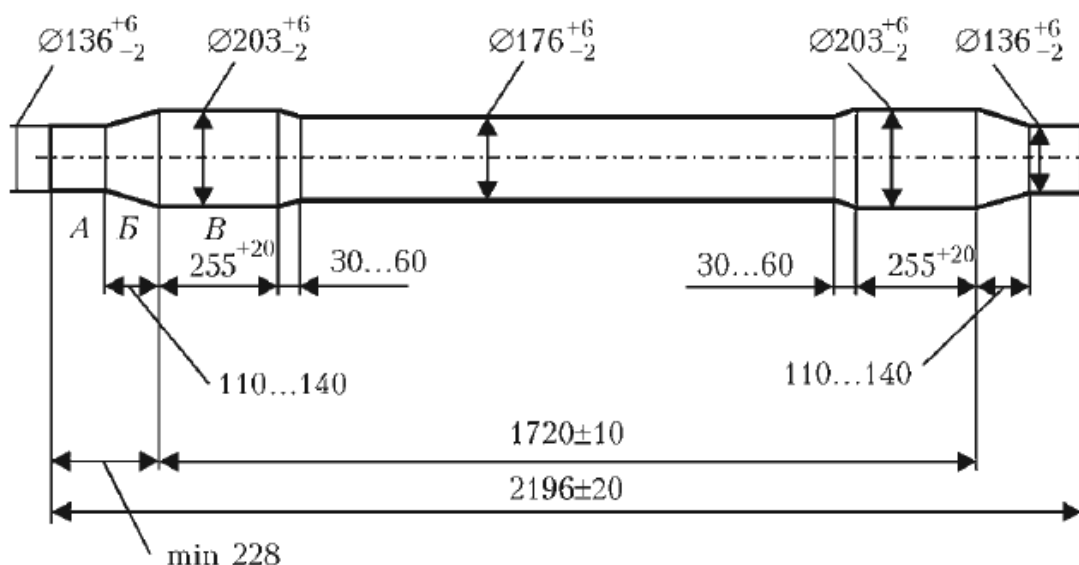


Схема типової кованої профільної заготовки для осей вагонів рухомого складу залізниць: А – шийка осі; В – підматочинна частина; В – маточина [10]

кованих профільних заготовок для осей залізничного транспорту (чорнових осей), включаючи виплавку в дуговій сталеплавильній печі електросталі EA1N (35Г), рафінування (піч-ківш, вакууматор), розливання по виливницям (вага злитка 4,8 і 6,7 тонн), прокатку, кування і термічну обробку (нормалізацію, відпуск) профільних заготовок. Наведено результати технологічного та дослідницького контролю розмірного фактора, кількості неметалевих включень і механічних властивостей металу чорнових осей, а також аналіз в аспекті відповідності вимогам UIC 811-1(E) та EN 13261:2009.

На території України і країн СНД чорнові осі виробляють зі сталі марки ОС, які за якістю відповідають вимогам ГОСТ 31334-2007 і ДСТУ ГОСТ 4728:2014. Для країн далекого зарубіжжя аналогічні за геометрією та формою чорнові осі (рисунок) виготовляють зі сталі марки EA1N відповідно до норм UIC 811-1(E) і EN 13261:2009. Дана сталь EA1N за хімічним складом аналогічна і близька до сталі 35Г (ДСТУ 7806:2015).

Особливістю зарубіжних стандартів є більш жорсткі вимоги до хімічного складу, механічних властивостей і чистоти сталі за неметалевими включеннями, що зумовило необхідність наукового обґрунтування нових технологічних рішень на стадії виплавки і позапічної обробки, а також створення нових режимів термічної обробки чорнових осей.

Однією з основних складних задач при виконанні експортних поставок осей є забезпечення жорстких вимог стандарту EN 13261:2009 до забруднення сталі за неметалевими включеннями. Відповідно до вимог стандарту UIC 811-1(E), всі види неметалевих включень не повинні перевищувати 2,5–3,0 бала (для тонких включень) і 2,0 бала (для товстих включень) під час контролю за ISO 4967, метод А. Разом з тим, згідно з новими вимогами стандарту EN 13261:2009, забрудненість сталі за неметалевими включеннями не повинна перевищувати відповідно 2,0 і 1,5 бала.

Сталь EA1N (35Г) для промислового виробництва заготовок чорнових осей виплавляли в основній дуговій печі ДСП-60 з окиснювальним періодом і застосуванням кисню. Після дефосфорації сталевих ванн і окиснення вуглецю сталь-напівпродукт розкиснювали феросиліцієм ФС65, алюмінієм і обробляли у ковші твердошлаковими сумішами на основі вапна і плавикового шпату. Подальшу обробку металу проводили на установці піч-ківш (УПК) і в вакууматорі. Перед передачею ковша з вакууматора на розливку проводили комплексне розкиснення металу з використанням алюмінію, титану і SiCa дроту.

Наведені заходи сприяли зниженню масової частки сірки в кінці рафінування металу на УПК в 1,5 раза в порівнянні з виправкою такої сталі з допустимим рівнем сульфідів товстої серії не більше 2,0 бала і, як наслідок, зменшення забрудненості сталі товстими сульфідними включеннями $A_{\text{тл}}$ до необхідного рівня (не більше 1,5 бала). Низький рівень забрудненості сталі товстими оксидними включеннями забезпечували шляхом регламентації залишкової масової частки алюмінію, кальцію і введення додаткового елементу титану [13].

Після освоєння нової технології кінцевого розкиснення сталі 35Г при ультразвуковому контролі в поодиноких осях виявлено невеликі скупчення неметалевих включень [10]. В процесі їх вивчення на електронному мікроскопі встановлено наявність в них поряд з оксидами алюмінію і кальцію також оксидів титану. При масовій частці титану не більше 0,03 % оксиди титану раніше не виявляли. Це послужило припущенням того, що вони внесені в сталь у вигляді екогенних включень.

Титан, що застосовується для розкиснення металу, забруднений киснем більшою мірою, ніж вакуумована сталь. Тому оксиди титану могли бути внесені разом з титаном, який сідав в розплав після вакуумування перед передачею ковша на розливання, і при відсутності обробки металу аргонном не вилучились у шлакову фазу.

Для перевірки цієї гіпотези автори роботи [11] при подальшій виплавці сталі вводили титан в рідкий метал до вакуумування. В процесі ультразвукового контролю кованих чорнових осей зі сталі плавов за новою технологією розкиснення дефекти, що зустрічались раніше у вигляді скупчень неметалевих включень, виявлені не були. Зміна черговості присадки титану сприяла також зменшенню загальної забрудненості сталі неметалевими включеннями: оксидами і сульфідами.

У роботі [14] показано, що головною причиною низьких техніко-економічних показників ефективності роботи залізничного транспорту України, держав СНД та деяких країн далекого зарубіжжя: його невідповідність сучасним вимогам підвищених швидкостей руху і вантажопідйомності рухомого складу, – є застосування нелегованих і низьколегованих високо- і середньовуглецевих перлітних сталей виробництва металопродукції для рухомого складу (рейок, коліс, осей і т. д.).

У сталях цих класів підвищення статичної міцності за рахунок збільшення вмісту вуглецю супроводжується зниженням циклічної міцності, статичної і циклічної в'язкості руйнування, пластичності, контактної витривалості [15–17].

В Росії і Україні до теперішнього часу провідні матеріалознавчі організації, зокрема Інститут металургії і матеріалознавства ім. О.О. Байкова Російської академії наук, Федеральне державне унітарне підприємство «Центральний науково-дослідний інститут чорної металургії ім. І.П. Бардіна», Федеральне державне унітарне підприємство «Всеросійський науково-дослідний інститут залізничного транспорту», Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України і підприємства-виробники металопродукції для залізничного транспорту: БАТ «Кузнецкий металургійний комбінат», ПАТ «МК «Азовсталь», БАТ «Виксунський металургійний завод», БАТ «Нижньо-тагільський металургійний комбінат», ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ» і ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», – як шляхи підвищення експлуатаційних характеристик стандартних перлітових сталей розглядають уже давно відому технологію мікролегкування ванадієм, а також методи термічного і термомеханічного зміцнення [18].

Мікролегуванню сталей азотом і нітридоутворюючими елементами: ванадієм, ніобієм, титаном, алюмінієм, – в останні роки приділяють пильну увагу [19–21]. При цьому вирішується задача диспергування зерна аустеніту і перліту, а також обмеженого і нестабільного підвищення дисперсійного зміцнення сталей. Так, в роботі [20] визначено оптимальний термічний інтервал відпуску загартованих мікролегованих ванадієм колісно-бандажних сталей – при температурі 500 ± 10 °С. Показано, що в інтервалі 450–500 °С цілісність структурного стану, що характеризується наявністю фериту голчастої морфології, не порушується. При температурах ~ 500 °С досягається також додаткове зміцнення виробів за рахунок формування мікророзділення карбідів. Негативний вплив полігонізації структури голчастої α -фази і сфероїдизації цементита перліту на показники в'язкості і міцності проявляється при температурах понад 500 °С.

Системні фундаментальні дослідження протягом декількох десятиріч у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів Національної академії наук України (ФТІМС НАН України) та накопичений досвід промислового застосування показали, що технологія мікролегування азотом і ванадієм є методом докорінного підвищення всього комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей ливарних і деформованих вуглецевих, низьколегованих і легуваних сталей різного функціонального призначення, в тому числі середньо- і високовуглецевих [22]. Авторами вперше встановлено, що необхідною умовою ефективного мікролегування азотом і ванадієм є не тільки оптимізація процесу дисперсійного нітридного зміцнення, а й вплив азоту і нітридної фази на процеси кристалізації і пов'язані з нею розвиток первинної хімічної і структурної неоднорідності металу, розмір зерна аустеніту, термодинамічні і кінетичні параметри перлітного, бейнітного і мартенситного перетворень, морфологію карбідних фаз при розпаді пересиченого твердого розчину аустеніту та фериту, розвиток вторинної хімічної і структурної неоднорідності, в тому числі зернограничної. Найбільш важливою перевагою розроблених у ФТІМС НАН України сталей, мікролегованих азотом і ванадієм, є одночасне істотне підвищення їх статичної і циклічної міцності, статичної і циклічної в'язкості руйнування, тепло- і термостійкості, зносостійкості, прокалюваності, зварюваності, зниження або повне усунення схильності до природного, деформаційного і теплового окрихчування.

Виконані дослідження показали, що такого ж результату досягають і на високовуглецевих сталях для виробництва рейок і коліс. Так, за рахунок диспергування аустенітного зерна, зменшення хімічної і структурної неоднорідності, додаткового дисперсійного зміцнення нанорозмірними внутрішньозеренними частинками нітриду ванадія забезпечується істотне підвищення міцності (на 100 МПа) сталей без зменшення їх пластичності і в'язкості. Цього результату досягають при зменшенні на 0,07–0,10 %мас. вуглецю в сталях.

В економічно розвинених країнах вже намічений шлях по заміні перлітових високо- і середньовугле-

цевих сталей на низьковуглецеві сталі зі структурою нижнього бейніта і навіть на жароміцні сталі на нікелевій основі [23, 24]. Ці сталі, наприклад рейкова сталь фірми «Nippon Steel Corp.» (Японія) з вмістом (%мас.): 0,15–0,45 С; 0,15–0,20 Si; 0,3–2,0 Mn; 0,5–3,0 Cr; 0,1–0,6 Mo, 0,05–0,40 Ni; 0,03–0,30 V; 0,05–0,50 Cu; 0,1–0,6 Mo, 0,05–0,40 Ni; 0,03–0,30 V; 0,05–0,50 Cu; 0,01–0,05 Ti, 0,01–0,05 Nb, сталь для колісного обода RTX (Великобританія) з вмістом (%мас.) 0,25 С; 1,1 Si, 1,1 Mn; Cr + Mo + Ni = 1,8; 0,05 V; 0,30 Cu, а також нікелеві сплави мають високу міцність, зносостійкість, тепло- і термостійкість, не схильні до $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow M$ перетворень.

Об'єктом дослідження конструкторів і авторів роботи [25] стала високоміцна легована сталь 30NiCrMoV12 від італійської компанії «Lucchini Sidermeccanica», що широко використовується в Італії і Європі, особливо для осей колісних пар високошвидкісних поїздів.

Основною характеристикою цієї сталі є висока втомна міцність разом зі значенням чутливості до надризу, що аналогічні стандартним маркам сталі EA1N і EA4T (EN 13261:2009). Це дозволяє конструкторам повною мірою використовувати її переваги при розробці виробів і значно на 20 % знизити вагу колісних пар, що досягається за рахунок зменшення зовнішніх діаметрів осі або при виготовленні з даної марки сталі порожнистої осі. В результаті, може бути досягнуто зниження вібрацій всіх невіднесених компонентів, меншого зносу колеса і рейки, в тому числі в важких умовах навантаження, і кращої динамічної поведінки завдяки зменшенню моменту інерції.

Але, незважаючи на всі переваги мікро- і комплексно легуваних сталей перед якісними вуглецевими сталями, висока собівартість легування і досить великий обсяг виробництва і застосування рейок, коліс і осей роблять розвиток даного напрямку в Україні і в країнах СНД в даний час нереальним. Тому на пострадянському просторі найбільш доцільним залишається спосіб підвищення якості металопродукції залізничного призначення шляхом варіації хімічного складу в межах марочного складу, а в окремих випадках – використання мікролегування і/або підвищення вмісту одного з основних елементів в сталі до рівня легуючого [11, 26–30].

Так, в роботі [11] для отримання чорнових осей зі сталі EA1N (35Г) на підставі проведених досліджень обґрунтовано звужені границі за вмістом вуглецю і марганцю під верхню допустиму границю. При подальшому виробництві чорнових осей із забезпеченням рекомендованих звужених границь за хімічним складом виконано 27 плавів. При первинному контролі механічних властивостей 59 % плавів мали рівень тимчасового опору вище норм UIC 811-1(E).

В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України) виконано комплекс науково-дослідних робіт з розробки нових сталей для залізничних коліс з підвищеним рівнем твердості (320–400 HB). Розроблено хімічний склад економно легованої сталі кремнієм (марка «К») і режими термічної обробки залізничних коліс, що виробляються

з неї, які забезпечили при зниженні вмісту вуглецю в сталі до 0,60 %мас. рівень твердості не менше 320 HB і зменшення чутливості до утворення дефектів на поверхні кочення. Ці технологічні рішення були успішно випробувані в промислових умовах ПАТ «ІН-ТЕРПАЙП НТЗ».

Перераховані вище варіації хімічного складу вибираються і спеціально розробляються з метою отримання сприятливого структурного стану в сталевих виробках, оскільки управління структурою, яка в більшості розглянутих випадків гетерофазна, є одним з найбільш ефективних засобів спрямованої зміни властивостей кристалічних матеріалів. Вивчення морфології виділень і кінетики перетворень дозволяє передбачити характер структури, що формується, і властивостей матеріалів. Разом з дефектами кристалічної будови, їх типом і характером розподілу гетерофазна структура визначає весь комплекс структурно-чутливих властивостей реальних виробів і напівфабрикатів з металевих матеріалів, що випускаються промисловістю [31].

Формування властивостей металевих сплавів визначається фазовими і структурними перетвореннями, які протікають в матеріалах при їх обробках різними методами. Саме вони об'єднуються загальним терміном «перетворення» і розглядаються фахівцями при призначенні різних режимів обробки сплавів з метою отримання необхідних для конкретних виробів властивостей. Фактично теорія перетворень в твердому стані є основою для управління структурою і властивостями металів і сплавів при їх обробці. Під перетворенням в твердому стані розуміються процеси, що призводять до зміни структури, а отже, і властивостей твердих тіл.

Підвищення механічних і експлуатаційних властивостей осей шляхом впливу на мікроструктуру сталі в процесі обробки тиском, термічної обробки і механічного зміцнення поверхні досліджено в ряді робіт [9, 32–41].

Технічні вимоги на вагонні та локомотивні осі за кордоном передбачають використання їх після різної термічної обробки [9]. Так, в США вагонні осі застосовують в гарячекатаному і відпаленому станах, а також після нормалізації з відпуском, а локомотивні осі піддають нормалізації з відпуском. При виробництві осей в Англії застосовують нормалізацію, гартування у воді з відпуском, а також гартування в маслі. В Угорщині вагонні осі використовують без термічної обробки, а локомотивні – в покращеному стані. В Японії вагонні та локомотивні осі застосовують після нормалізації з відпуском, а також після гартування у воді або маслі з відпуском.

Для автотрис на новій дорозі Токайдо в Японії, де починаючи з 1964 р. відкрито регулярний рух високошвидкісних поїздів (максимальна швидкість до 210 км/год), застосовано осі, що піддано індукційному гартуванню. Для їх виготовлення застосовано вуглецеву сталь з 0,35–0,41 %мас. С. Після кування заготовки піддають гартуванню в маслі (з 870 °C) і високому відпуску (при 600 °C). Поверхню термічно обробленої осі після остаточної механічної обробки

з допуском на доводку піддають індукційному гартуванню і низькотемпературному відпуску. Цей технологічний процес термічної обробки забезпечує досить високі механічні властивості внутрішньої частини осі та плавний перехід структурних складових від мартенситу в поверхневих шарах до дрібнодисперсного перліту в центральній частині осі, а також сприятливу схему розподілу залишкових напружень.

Раніше [32–34] розглядалося питання про можливість і умови проведення термічної обробки залізничних осей, а також вивчено вплив різних режимів термічної обробки на структуру і механічні властивості металу залізничних осей по перерізу.

Необхідність термічної обробки була викликана тим, що в осях в процесі роботи виникають втомні тріщини і злами, в результаті чого щорічно знімається з експлуатації близько 10 000 осей. При зростаючих швидкостях руху існуючий метод зміцнення шийок і підматочинних частин осей обкаткою стає неефективним, оскільки при цьому не зміцнюється середня частина осі, на якій також утворюються тріщини втоми. Обкатувати ж середню частину економічно недоцільно.

Залізничні осі працюють в умовах знакозмінного навантаження при наявності концентраторів напружень в результаті пресової посадки внутрішніх кілець підшипника, тому механічні характеристики, отримані при статичному випробуванні, не можуть служити гарантією високої втомної міцності.

В роботі [33] з'ясовано вплив хімічного складу і термічної обробки на втомну міцність залізничних осей. Дослідження проведено на зразках шийок осей натуральних розмірів (діаметр 135 мм) при знакозмінному навантаженні. За результатами виконаних досліджень зроблено два основні висновки:

1. Поліпшення (гартування і високий відпуск при температурі 600 °C) залізничних осей і зразків шийок діаметром 135 мм, виготовлених з осьової сталі з вмістом вуглецю 0,34–0,44 %мас., не приводить до підвищення механічних властивостей металу і його втомної міцності.

2. Для підвищення границі витривалості залізничних осей необхідно вміст вуглецю в осьовій сталі збільшити до 0,50–0,55 %мас. і марганцю – до 0,8–0,9 %мас., піддаючи цю сталь термічній обробці у вигляді: а) гартування у водяному спреїєрному баку з наступним відпуском при температурах 580–600 °C або б) гартування в маслі або без відпуску, або з подальшим відпуском при температурах 250–300 °C.

Автором роботи [35] після нормалізації вже виготовлених осьових заготовок розроблено режим відпуску (температура нагріву 680 °C), який гарантує отримання необхідного рівня механічних властивостей сталі марки EA1N (EN 13261:2009).

Найпоширенішим видом недосконалості мікроструктури деформованих і потім термічно оброблених виробів, особливо виробів складної форми, в тому числі і залізничних осей, є неоднорідність зеренної структури по перерізу виробу. Ця неоднорідність за своєю топографією, природою і причинами виникнення може бути досить різноманітною. Найчастіше виглядом структурної неоднорідності є різнозернистість

структури, тобто неоднаковість розмірів зерен, яка виходить за границі звичайного нормального розподілу. Різноманітність, як правило, негативно впливає на властивості та часто призводить до великих економічних втрат.

Дослідження [36] показали, що причиною неоднорідності структури вуглецевої сталі для виготовлення залізничних осей марки ОС (ДСТУ ГОСТ 4728:2014) є наслідок високої температури і нерівномірного нагріву виробу при термічній обробці. Для усунення структурної неоднорідності сталь марки ОС розкиснювали алюмінієм. Це призвело до утворення дрібних включень нітриду алюмінію AlN , які розміщені на границі зерен аустеніту і перешкоджають їх росту. Найбільш високу холодостійкість і найкращий комплекс механічних властивостей зразків залізничних осей отримано при вмісті алюмінію 0,03–0,06 %мас.

З огляду на неоднорідність мікроструктури вуглецевої сталі марки ОС (ДСТУ ГОСТ 4728:2014) автором роботи [37] показано її вплив на довговічність осей колісних пар при асиметричному циклі навантаження та розроблено метод оцінки залишкового ресурсу елементів колісних пар, який відтепер використовується у відокремленому підрозділі «Локомотивне депо Тернопіль» при визначенні міжінспекційних періодів їх контролю.

Причиною виникнення структурної неоднорідності здебільшого є технологія виготовлення осей колісних пар. Існуюча технологія виробництва залізничних осей визначається вимогами державного стандарту України ДСТУ ГОСТ 31334:2009 (ГОСТ 31334-2007, IDT).

Деякі роки тому в ІЧМ НАН України виконано ряд науково-дослідних робіт, спрямованих на підвищення якості осей рухомого складу залізниць за рахунок формування дрібнозернистої, бездефектної мікроструктури без застосування заходів, що здорожують існуючу технологію їх виготовлення: без використання легування сталі та додаткових термічних обробок. Найбільш важливі результати даних досліджень відображено в роботах [38–40].

На підставі отриманих в цих роботах результатів встановлено, що найбільший вплив на формування мікроструктури осей в процесі виготовлення мають особливості процесів ліквідації та фазових перетворень в сталі, а також температурно-деформаційні параметри обробки прокату. Зокрема, значна роль тут відводиться величині деформації центральної зони заготовки у процесі гарячої деформації. Так, при прокатці заготовок значного діаметру величина деформації по перерізу є нерівномірною, що і призводить до формування нерівномірної структури вуглецевої сталі.

Іншим фактором, що впливає на неоднорідність структури матеріалу, є режим нормалізації та нерівномірне охолодження по перерізу осьових заготовок. Нерівномірність структури зі свого боку призводить до деякої нерівномірності механічних властивостей матеріалу по перерізу осей колісних пар.

Тому основна ідея зазначених досліджень полягала в оптимізації деформаційно-температурних режимів обробки на тих етапах виробництва, де відбува-

ється найбільший вплив на структуру осьових заготовок, а саме, при прокатці на блюмінгу та стані 250, а також під час остаточної термічної обробки.

Впровадження таких заходів показало, що необхідна структура і, як наслідок, механічні властивості залізничних осей згідно з вимогами стандарту AAR M-101-2017 можуть бути забезпечені вже після проведення однієї нормалізації при використанні режимів деформації, що рекомендуються, на блюмінгу, зниженні температури нагрівання заготовок перед прокаткою на стані 250 до 1150 °C і температури нормалізації до 820–840 °C.

Застосування методу радіального кування на гідравлічному пресі фірми «SMS Meer» дозволило виключити операцію прокатки напівфабриката та виготовляти залізничні осі високої якості з вуглецевої сталі марки C45 (EN 10083-2) всього за одну операцію кування, що суттєво знижує витрати на виробництво і, як наслідок, собівартість продукції та підвищує продуктивність [41]. Отримати готові осі з бездефектною макроструктурою стало можливо завдяки високому формувальному потенціалу гідравлічного преса радіального кування. Характерною особливістю даного преса є передання максимального зусилля під час проходження кування, що веде до проробки металу до самого центру заготовки.

Матеріалом для дослідження послужили початкова безперервнолита заготовка Ø 410 мм і викувана здвоєна вісь з діаметром середньої частини Ø 223 мм. Аналіз макро- і мікроструктури викуваних осьових заготовок показав хороші результати. Зона, що зазнала найменшої деформації, має рівномірно розподілену по радіусу заготовки гомогенну мікроструктуру. Розподіл зерна також рівномірний по всьому перерізу і становить номер 8,5 (ASTM E 112). Ультразвуковий контроль показав відсутність пор розмірами більше 3 мм в макроструктурі кованих заготовок.

Висновки

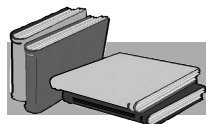
Підсумовуючи вищесказане, в матеріалознавчому аспекті для вирішення задачі підвищення якості осей залізничних вагонів можна виділити наступні основні способи:

- заходи, спрямовані на підвищення якості сталі для виробництва осей в процесі її виплавки (зниження вмісту сірки, фосфору, водню і т. п.);
- легування та мікрولةгування сталі для виготовлення залізничних осей;
- поліпшення пророблюваності металу осьових заготовок в процесі гарячої деформації;
- вибір і розробка оптимальних режимів термічної обробки осьових заготовок.

На наш погляд, поліпшення пророблюваності металу осьових заготовок в процесі гарячої деформації є саме тим способом підвищення якості залізничних осей, що не потребує заходів, які суттєво здорожують існуючу технологію їх виготовлення. Оскільки за рахунок інтенсивної деформаційної дії у звичайній вуглецевій сталі можна покращити якість її макроструктури, сформувати сприятливий розподіл спадкоємної

хімічної неоднорідності кремнію та марганцю в її мікроструктурі, який забезпечить утворення дрібнозернистої і рівномірної ферито-перлітної мікроструктури. Усе це буде сприяти підвищенню характеристик плас-

тичності, в'язкості та міцності при циклічних напруженнях вуглецевих сталей конструкційного призначення, зокрема для виготовлення залізничних осей.

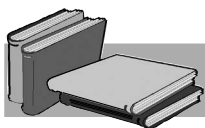


ЛІТЕРАТУРА

1. Школьник Л.М. Повышение прочности осей подвижного состава. М.: Транспорт, 1964. 224 с.
2. Донченко А.В. Стратегія розвитку транспортного машинобудування для залізниць України. Кременчук: ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування». 2013. Вип. 9. С. 9.
3. Чебуров С.А., Білецький О.М. Один із напрямків зниження дефіциту осей колісних пар візків ватажних вагонів із навантаженням 23,5 тс. *Зб. наук. праць: Рейковий рухомий склад*. 2019. Вип. 18. С. 61–65.
4. Князев Д.А. Обоснование периодичности освидетельствования полых осей колесных пар высокоскоростного подвижного состава: дис. канд. техн. наук: 05.22.07. Москва: Российский университет транспорта, 2019. 138 с.
5. Обработка поверхностного слоя осей колесных пар. *Железные дороги мира*. 2009. № 10. С. 67–73.
6. Князев Д.А. Защита осей колесных пар высокоскоростного подвижного состава от механических повреждений их поверхности. *Вестник ВЭЛНИИ*. 2011. № 2. С. 178–184.
7. Волохов Г.М., Князев Д.А. Защита осей колесных пар скоростного подвижного состава от механического повреждения фракциями балласта пути, поднятыми воздухом. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Дала*. Северодонецк. 2011. № 4. С. 55–58.
8. Волохов Г.М., Князев Д.А. Защита осей колесных пар скоростного подвижного состава от механического повреждения фракциями балласта призм пути, поднимаемыми турбулентными потоками воздуха при движении высокоскоростного подвижного состава. *Материалы XII науч.-практ. конф. «Безопасность движения поездов»*. М.: МИИТ, 2011. С. 1-5-1-6.
9. Оси. Технология термического упрочнения проката. *Metallicheckiy-portal.ru*. Центральный металлический портал РФ. URL: http://metallicheckiyportal.ru/articles/chermet/termo_yprochn_prokata/tehnologia/26
10. Лубенская Л.М., Колодяжный П.В. Повышение эксплуатационных свойств осей колесных пар за счет упрочнения их поверхности. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2011. Вип. 38. С. 41–46.
11. Гасик М.И., Сальников А.С., Пересащенко О.В., Лоза В.В. Разработка и промышленное освоение сквозной технологии производства кованых черновых осей из электроласти EA1N (35Г). *Электрометаллургия стали и ферросплавов*. 2009. № 2. С. 40–48.
12. Панченко А.И., Кийко С.Г., Гасик М.И., Левченко Г.В., Горобец А.П., Проїдак Ю.С., Климчик Ю.В. Современные технологии выплавки и разливки стали EA1N для производства железнодорожных осей. *Современная электрометаллургия*. 2019. № 2. С. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.06>
13. Сальников А.С., Казаков С.С., Улитенко А.Н. и др. Качество конструкционной электроласти. Запорожье: Палитра, 2004. 134 с.
14. Щипицын С.Я., Бабаскин Ю.З., Короленко В.П., Золотарь Н.Я. Новые рельсовые и колесные стали для железнодорожного транспорта недалекого будущего. *Металл и литье Украины*. 2013. № 6 (241). С. 29–33.
15. Маркин В.С., Шишов А.А., Сухов А.В. и др. Освоение производства новых видов цельнокатаных колес для железнодорожного транспорта. *Сталь*. 2007. № 9. С. 79–82.
16. Гетманова М.Е., Гриншпон А.С., Сухов А.В. и др. Влияние неоднородности структуры и неметаллических включений на вязкость разрушения колесной стали. *Сталь*. 2007. № 9. С. 96–99.
17. Осташ О.П., Андрейко І.М., Кулик В.В. та ін. Втомна довговічність сталей залізничних коліс. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2007. № 3. С. 93–102.
18. Арсенкин А.М., Далматов А.Ю., Демин К.Ю. и др. Микролегирование колесной стали карбидообразующими элементами. *Сталь*. 2007. № 9. С. 29–30.
19. Узлов И.Г., Узлов К.И., Перков О.Н. Высокопрочные железнодорожные колеса из микролегированной ванадием стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 1. С. 84–88.
20. Узлов К.И., Сухомлин Г.Д. Оптимизация структурного состояния высокопрочной микролегированной ванадием колесно-бандажной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 1. С. 49–55.
21. Шапошников Н.Г., Конов А.А., Могутнов Б.М. Условия эффективного воздействия нитридных и карбонитридных фаз на измельчение структуры конструкционных перлитных сталей. *Сталь*. 2004. № 7. С. 84–87.
22. Бабаскин Ю.З., Щипицын С.Я., Кирчу И.Ф. Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой. Киев: Наукова думка, 2005. 371 с.

23. Кассиді Ф.Д. Леговані метали можуть подовжити життя коліс. *Залізничний транспорт України*. 2002. № 5. С. 69–70.
24. Poshman J. Новые марки колесной стали. *Железные дороги мира*. 2004. № 1. С. 47–56.
25. Mancini G., Corbizi A., Lombardo F., Cervello S. Design of railway axle in compliance with the European Norms: high strength alloyed steels compared to standard steels. "Proceedings of the World Congress on Railway Research". Montreal. Canada. 4–8 June 2006. URL: <http://www.railwayresearch.org/WCRR-Congresses-2001-2008> (last accessed 31.08.2015).
26. Головкин Л.А., Тогобицкая Д.Н., Бабаченко А.И., Козачок А.С., Кононенко А.А. Информационно-математическое обеспечение оценки влияния химического состава на свойства колесной стали. *Матеріали науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. С. 5–16.
27. Бабаченко А.И., Тогобицкая Д.Н., Козачок А.С. Концептуальные основы выбора химического состава стали для железнодорожных колес. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 4. С. 34–48.
28. Бабаченко А.И. Надежность и долговечность железнодорожных колес и бандажей. Днепропетровск: Литограф, 2015. 356 с.
29. Бабаченко А.И., Филиппов А.А., Дементьева Ж.А., Кононенко А.А. Разработка новой системы микролегирования стали для высокопрочных железнодорожных колес. *Сб. науч. трудов: «Строительство, материаловедение, машиностроение»*. Днепр: ГВУЗ «ПГАСА». 2017. Вып. 96. С. 13–17.
30. Babachenko A.I., Togobitskaya D.N., Kozachyok A.S., Kononenko A.A. et al. Optimization of chemical composition of steel for railroad wheels providing stabilization of mechanical and increase of operational properties. *Metallurgical and Mining industry*. 2017. № 3. P. 32–39.
31. Попов А.А., Жиликова М.А., Зорина М.А. Фазовые и структурные превращения в металлических сплавах: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство УрФУ, 2018. 315 с.
32. Тараско Д.И. Влияние некоторых факторов на усталостную прочность вагонных осей с напрессованными роликовыми подшипниками. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1958. № 2. С. 156–171.
33. Грдина Ю.В., Тараско Д.И., Кайгородцев В.С. Термическая обработка железнодорожных осей. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1961. № 4. С. 97.
34. Грдина Ю.В., Тараско Д.И., Кайгородцев В.С. Влияние термической обработки и химического состава стали на усталостную прочность железнодорожных осей. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1961. № 12. С. 144–148.
35. Сальников А.С., Пересащенко О.В., Лоза В.В. Ось вопроса – вопрос оси. О качестве кованых профильных заготовок для вагонных осей из стали 35Г, поставляемых по зарубежным стандартам. *Металлургический компас*. 2007. № 9. С. 22–26.
36. Войнова Е.В., Рябичева Л.А. Анализ дефектов микроструктуры осевой стали. *Материалы конференции «Материаловедение XXI-го века 2016 год»*. Донецк: ДонНТУ, 2016. Электронный архив Донецкого национального технического университета (г. Донецк). URL: <http://www.ea.donntu.org:8080/bitstream/123456789/31049/1/АНАЛИЗ%20ДЕФЕКТОВ%20МИКРОСТРУКТУРЫ%20ОСЕВОЙ%20СТАЛИ.pdf>
37. Сорочак А.П. Тріщиностійкість і залишковий ресурс осей колісних пар з урахуванням структурно-механічної неоднорідності: дис. канд. техн. наук: 01.02.04. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2015. 133 с.
38. Дьоміна К.Г., Грицай Т.В. Розробка оптимальних параметрів виробництва залізничних осей. *Металознавство та обробка металів*. 2009. № 1. С. 52–57.
39. Левченко Г.В., Грицай Т.В., Романенко В.И., Антонов Ю.Г., Мединский Г.А. Формирование микроструктуры железнодорожных осей на различных этапах их производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 3. С. 43–46.
40. Левченко Г.В., Грицай Т.В., Нефедьева Е.Е. и др. Влияние режимов нормализации на структуру осевой стали. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИЧМ НАНУ. 2010. Вып. 22. С. 221–226.
41. Кнауф Ф. Структурный анализ осей железнодорожных колесных пар, изготовленных на гидравлическом прессе радиальнойковки типа SMX. *Литье и металлургия*. 2013. № 3. С. 123–128.

Надійшла 16.10.2020



REFERENCES

1. Shkolnik, L.M. (1964). Increasing the strength of rolling stock axles. Moscow: Transport, 224 p. [in Russian].
2. Donchenko, A.V. (2013). Strategy for the development of transport machinery for Ukraine. Kremenchuk: DP "Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut vagonobuduvannya", iss. 9, p. 9 [in Ukrainian].
3. Cheburov, S.A., Biletskiy, O.M. (2019). One out of direct reduction of wheel pair axle deficiency in vantage wagons out of 23.5 tf shipments. *Zb. nauk. prats: Reykovyi rukhomiyi sklad*, iss. 18, pp. 61–65 [in Ukrainian].

4. Knyazev, D.A. (2019). Rationale periodicity examination hollow axles wheelsets high rolling. Candidate's thesis. Moscow: Russian University of Transport, 138 p. [in Russian].
5. Treatment of the surface layer of wheelset axles (2009). *Zheleznye dorogi mira*, no. 10, pp. 67–73 [in Russian].
6. Knyazev, D.A. (2011). Protection of axles of wheelsets of high-speed rolling stock from mechanical damage to their surface. *Vestnik VEINII*, no. 2, pp. 178–184 [in Russian].
7. Volokhov, G.M., Knyazev, D.A. (2011). Protection of axles of wheelsets of high-speed rolling stock from mechanical damage by fractions of track ballast lifted by air. *Visnyk Skhidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu im. Volodimira Dalya*, no. 4, pp. 55–58 [in Russian].
8. Volokhov, G.M., Knyazev, D.A. (2011). Protection of the axles of wheelsets of high-speed rolling stock from mechanical damage by fractions of ballast of the track prism, lifted by turbulent air flows during the movement of high-speed rolling stock. *Materialy XII nauch.-prakt. konf. "Bezopasnost dvizheniya poezdov"*, Moscow: MIIT, pp. 1-5-1-6 [in Russian].
9. Axles. Heat hardening technology for rolled products. *Metallischekiy-portal.ru*. URL: http://metallischekiyportal.ru/articles/chermet/termo_yprochn_prokata/tehnologia/26 [in Russian].
10. Lubenskaya, L.M., Kolodyazhnyi, P.V. (2011). Improving the performance properties of wheelset axles by hardening their surface. *Visnyk Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu zaliznychnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, iss. 38, pp. 41–46 [in Russian].
11. Gasik, M.I., Salnikov, A.S., Peresadenko, O.V., Loza, V.V. (2009). Development and commercialization of a through technology for the production of forged rough axles from EA1N electric steel (35G). *Elektrometallurgiya stali i ferrosplavov*, no. 2, pp. 40–48 [in Russian].
12. Panchenko, A.I., Kiyko, S.G., Gasik, M.I., Levchenko, G.V., Gorobets, A.P., Proydak, Yu.S., Klimchik, Yu.V. (2019). Modern technologies for smelting and casting EA1N steel for the production of railway axles. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, no. 2, pp. 35–41, doi: <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.06> [in Russian].
13. Salnikov, A.S., Kazakov, S.S., Ulitenko, A.N. et al. (2004). Quality structural electrosteel. *Zaporizhzhia: Palitra*, 134 p. [in Russian].
14. Shipitsin, S.Ya., Babaskin, Yu.Z., Korolenko, V.P., Zolotar, N.Ya. (2013). New rail and wheel types of steel for the rail transport system of the near future. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 6, pp. 29–33 [in Russian].
15. Markin, V.S., Shishov, A.A., Suhov, A.V. et al. (2007). Mastering the production of new types of solid-rolled wheels for railway transport. *Stal*, no. 9, pp. 79–82 [in Russian].
16. Getmanova, M.E., Grinshpon, A.S., Sukhov, A.V. et al. (2007). Influence of the inhomogeneity structure of non-metallic inclusions and fracture toughness steel wheel. *Stal*, no. 9, pp. 96–99 [in Russian].
17. Ostash, O.P., Andreiko, I.M., Kulik, V.V. et al. (2007). Fatigue durability of steels of railway wheels. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv*, no. 3, pp. 93–102 [in Ukrainian].
18. Arsenkin, A.M., Dalmatov, A.Yu., Demin, K.Yu. et al. (2007). Microalloying of wheel steel with carbide-forming elements. *Stal*, no. 9, pp. 29–30 [in Russian].
19. Uzlov, I.G., Uzlov, K.I., Perkov, O.N. (2004). High railway wheels of microalloy steel with vanadium. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no. 1, pp. 84–88 [in Russian].
20. Uzlov, K.I., Sukhomlin, G.D. (2012). Optimization of the structural state of high-strength microalloying with vanadium of wheeltire steel. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no. 1, pp. 49–55 [in Russian].
21. Shaposhnikov, N.G., Konov, A.A., Mogutnov, B.M. (2004). Conditions for the effective action of nitride and carbonitride phases on the refinement of the structure of structural pearlitic steels. *Stal*, no. 7, pp. 84–87 [in Russian].
22. Babaskin, Yu.Z., Shipitsyn, S.Ya., Kirchu, I.F. (2005). Structural and special steels with a nitride phase. Kyiv: Naukova dumka, 371 p. [in Russian].
23. Cassidi, F.D. (2002). Alloy metals can extend the life of wheels. *Zaliznichnyi transport Ukrainy*, no. 5, pp. 69–70 [in Ukrainian].
24. Poshman, J. (2004). New grades of wheel steel. *Zheleznye dorogi mira*, no. 1, pp. 47–56 [in Russian].
25. Mancini, G., Corbizi, A., Lombardo, F., Cervello, S. (4–8 June 2006). Design of railway axle in compliance with the European Norms: high strength alloyed steels compared to standard steels. *"Proceedings of the World Congress on Railway Research"*. Montreal. Canada. 4–8 June 2006. URL: <http://www.railwayresearch.org/WCRR-Congresses-2001-2008> (last accessed 31.08.2015).
26. Golovko, L.A., Togobitskaya, D.N., Babachenko, A.I., Kozachok, A.S., Kononenko, A.A. (2014). Information and mathematical support for assessing the effect of chemical composition on the properties of wheel steel. *Materialy naukovo-tehnichnoi konferentsii "Informatsiyi tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni"*. Dnipropetrovsk: NMetAU, pp. 5–16 [in Russian].
27. Babachenko, A.I., Togobitskaya, D.N., Kozachok, A.S. (2014). Conceptual basis for the selection of the chemical composition of steel for railway wheels. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, no. 4, pp. 34–48 [in Russian].
28. Babachenko, A.I. (2015). Reliability and durability of railway wheels and tires. Dnipropetrovsk: Litograf, 356 p. [in Russian].
29. Babachenko, A.I., Filippov, A.A., Dementieva, Zh.A., Kononenko, A.A. (2017). Development of a new steel microalloying system for high-strength railway wheels. *Sb. nauch. trudov: "Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie"*, no. 96, pp. 13–17 [in Russian].
30. Babachenko, A.I., Togobitskaya, D.N., Kozachyok, A.S., Kononenko, A.A. et al. (2017). Optimization of chemical composition of steel for railroad wheels providing stabilization of mechanical and increase of operational properties. *Metallurgical and Mining industry*, no. 3, pp. 32–39.

31. Popov, A.A., Zhilyakova, M.A., Zorina, M.A. (2018). Phase and structural transformations in metal alloys: a tutorial. Ekaterinburg: Izdatelstvo UrFU, 315 p. [in Russian].
32. Tarasko, D.I. (1958). Influence of some factors on the fatigue strength of carriage axles with pressed roller bearings. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, no. 2, pp. 156–171 [in Russian].
33. Grdina, Yu.V., Tarasko, D.I., Kaigorodtsev, V.S. (1961). Heat treatment of railway axles. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, no. 4, p. 97 [in Russian].
34. Grdina, Yu.V., Tarasko, D.I., Kaigorodtsev, V.S. (1961). Influence of heat treatment and chemical composition of steel on the fatigue strength of railway axles. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, no. 12, pp. 144–148 [in Russian].
35. Salnikov, A.S., Peresadenko, O.V., Loza, V.V. (2007). The axis of the question is the question of the axis. On the quality of 35G steel forged sections for carriage axles supplied according to foreign standards. *Metallurgicheskii kompaz*, no. 9, pp. 22–26 [in Russian].
36. Voinova, E.V., Ryabicheva, L.A. (2016). Analysis of microstructure defects in axial steel. *Materialy konferentsii "Materialovedenie XXI-go veka 2016 god"*. Donetsk: DonNTU. URL: <http://www.ea.donntu.org:8080/bitstream/123456789/31049/1/АНАЛИЗ%20ДЕФЕКТОВ%20МИКРОСТРУКТУРЫ%20ОСЕВОЙ%20СТАЛИ.pdf> [in Russian].
37. Sorochak, A.P. (2015). Crack resistance and residual life of axles of wheel pairs taking into account structural and mechanical inhomogeneity. Candidate's thesis. Ternopil: Ternopilskiy natsionalniy tehnicniy universitet imeni Ivana Pulyuya, 133 p. [in Ukrainian].
38. Dyomina, K.G., Gritsay, T.V. (2009). Development of optimal parameters for the production of railway axles. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, no. 1, pp. 52–57 [in Ukrainian].
39. Levchenko, G.V., Gritsay, T.V., Romanenko, V.I., Antonov, Yu.G., Medinsky, G.A. (2009). Formation of the microstructure of railway axles at various stages of their production. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no. 3, pp. 43–46 [in Russian].
40. Levchenko, G.V., Gritsay, T.V., Nefedieva, E.E. et al. (2010). Influence of normalization modes on the structure of axial steel. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: Sb. nauch. tr.*, no. 22, pp. 221–226 [in Russian].
41. Knauf, F. (2013). Structural analysis of the axles of railway wheelsets manufactured on a radial forging hydraulic press of the SMX type. *Lit'e i metallurgiya*, no. 3, pp. 123–128 [in Russian].

Received 16.10.2020

Summary

O.I. Babachenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Director,
e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>
K.G. Domina, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: katya20@ua.fm,
<https://orcid.org/0000-0001-9668-8169>
G.A. Kononenko, PhD (Engin.), Scientific Secretary, e-mail: perlit@ua.fm,
<https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>
O.A. Safronova, student, 1-category engineer,
e-mail: safronovaaa77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Analysis of existing methods of improving the quality of railway metal products

The article presents an analysis of existing publications, which highlight the issues of increasing the strength and reliability of the axles of wheelsets. Increasing the strength and service life of axles can only be achieved in a comprehensive manner: by improving the design, by rational choice of material, methods of processing and strengthening them. An important role in this is played by the improvement of the operating conditions of the rolling stock and its maintenance.

If earlier there was a tendency to ensure the reliability of the axle operation mainly by increasing the section, now this way has actually exhausted itself and is giving way to methods of increasing the fatigue strength. The opportunities in this area are wide enough. They are the main focus of this article.

To solve the problem of improving the quality of axles of railway cars, the following main methods can be distinguished: measures aimed at improving the quality of steel for the production of axles in the process of its smelting (reducing the content of sulfur, phosphorus, hydrogen, etc.); alloying and microalloying of steel for the manufacture of railway axles; improving the processing of the metal of axial blanks in the process of hot deformation; selection and development of optimal modes of heat treatment of axial workpieces.

In our opinion, improving the processing of the metal of axle blanks in the process of hot deformation is precisely the way to improve the quality of railway axles, which does not require measures that significantly increase the cost of the existing technology for their manufacture. Since, due to the intense deformation action in ordinary carbon steel, it is possible to improve

the quality of its macrostructure, to form a favorable distribution of the hereditary chemical heterogeneity of silicon and manganese in its microstructure, which will ensure the formation of a fine-grained and uniform ferrite-pearlite microstructure. All this will contribute to an increase in the characteristics of plasticity, toughness and strength under cyclic loads of carbon steel for structural purposes, in particular for the manufacture of railway axles.

Keywords

Railway axle, steel, alloying and microalloying, deformability, heat treatment, microstructure.