

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669:[539.43:539.56]

І. О. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Д. М. БОЛОТОВА², С. В. ПРОЙДАК³, Х. АСКЕРОВ⁴, Х. КУГ⁵,
А. О. ЧАЙКОВСЬКА⁶

^{1*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Дніпровський ліцей залізничного транспорту, вул. Універсальна, 7, Дніпро, Україна, 49024, тел.+38 (098) 351 99 70, ел. пошта dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта proydak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Каф. «Інженерна механіка», Карабукський університет, Карабук, Турція, 78050, тел. +90 (538) 455 04 45, ел. пошта hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

⁵Каф. «Інженерна механіка», Карабукський університет, Карабук, Турція, 78050, тел. +90 (544) 842 62 08, ел. пошта harun1878@gmail.com, ORCID 0000-0002-6322-4269

⁶Каф. «Матеріалознавства та обробки матеріалів», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 618 14 63, ел. пошта chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ПІД ЧАС ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Мета. Основною метою роботи є визначення особливостей розвитку процесів рекристалізації аустеніту вуглецевої сталі залежно від ступеня гарячої пластичної деформації та розробка пропозицій щодо поліпшення структурного стану металу залізничного суцільнокатаного колеса. **Методика.** Як матеріал для досліджень використані дві вуглецеві сталі залізничного колеса з мінімальним і максимальним вмістом вуглецю 0,55 і 0,65 % та іншими хімічними елементами в межах марочного складу сталі 60. Зразки у вигляді циліндрів діаметром 20 мм і висотою 40 мм нагрівали в муфельній печі, витримували певний час для вирівнювання температури по перетину зразка. Після цього зразки піддавали гарячому обтискуванню на випробувальній машині типу «Інстрон». Температурний інтервал гарячого обтискування зразків складав 950–1100 °С, за ступенів деформації по висоті в інтервалі 10–40 %. Швидкість деформації дорівнювала 10^{-3} – 10^{-2} с⁻¹. Для виявлення меж зерен аустеніту використовували стандартний травник. Структурні дослідження проводили з використанням світлового мікроскопа типу «Епіквант» за збільшень, достатніх для визначення особливостей будови зерен аустеніту. Величину розміру зерна аустеніту визначали за методиками кількісної металогрфії. **Результати.** У разі гарячого обтискування заготовки залізничного колеса збільшення концентрації атомів вуглецю лише в межах марочного складу сталі достатньо для зростання середнього розміру зерна аустеніту, що підтверджує пропозиції щодо обмеження вмісту вуглецю в металі залізничних коліс. Формування визначеного ступеня структурної неоднорідності аустеніту по перетину обода або маточини залізничного колеса обумовлене зміною механізму розвитку процесів рекристалізації залежно від величини деформації. За умов однакового ступеня гарячої пластичної деформації заміна одноразового обтискування на подрібнене супроводжується порушенням умов формування зародка рекристалізації. У результаті вказаної заміни схеми гарячої пластичної деформації досягається зменшення розміру зерна аустеніту. **Наукова новизна.** На основі дослідження розвитку процесів збиральної рекристалізації під час гарячого обтискування вуглецевої сталі залізничного колеса визначено, що збільшення вмісту вуглецю сприяє збіль-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

шенню зерна аустеніту. Після завершення гарячого обтискування заготовки колеса структурна неоднорідність аустеніту, що виникає, визначається зміною механізму розвитку процесів рекристалізації. Під час деформацій вище критичного ступеня відбувається формування й послідовне зростання зародків рекристалізації, що призводить до подрібнення структури. У разі деформацій нижче критичного значення зростання зерен аустеніту відбувається за механізмом коалесценції, за яким послідовно зникають фрагменти меж із великими кутами дезорієнтації. **Практична значимість.** Для подрібнення зерен аустеніту в масивних елементах залізничного суцільнокатаного колеса пропонуємо заміну одноразового гарячого обтискування на подрібнене.

Ключові слова: аустеніт; деформація; температура; розмір зерна; вуглецева сталь; залізничне колесо

Вступ

За технологією виготовлення залізничного колеса, заготовку піддають послідовному гарячому обтискуванню на пресі і прокатці на спеціальному стані. Висока температура гарячого обтискування, за відповідних ступенів деформації на кожному етапі формоутворення колеса, призводить до виникнення достатньо суттєвої структурної неоднорідності металу [4]. Указана структурна неоднорідність у заготовці залізничного колеса обумовлена формуванням високого ступеня нерівномірності за розмірами зерен аустеніту як основної фази високотемпературного стану вуглецевої сталі. Така неоднорідна структура унаслідок усіх подальших обробок, що суттєво знижує загальний комплекс властивостей металу елементів залізничного колеса [2, 8]. Причинами з формування структури аустеніту з відносно великими та малими за розмірами сусідніми зернами є підвищена швидкість дифузії та градієнт деформацій, що виникає по перетину елементів колеса під час гарячого обтискування заготовки. Через це шар металу, розташований безпосередньо з деформуючим інструментом, піддається максимальному обтискуванню, а більш віддаленим шаром відповідає зниження ступеня гарячої пластичної деформації [4]. У наслідок цього в об'ємах металу, які піддавалися обтискуванню на ступені поблизу з критичним значенням (за різними оцінками, на рівні 8–10 % [1, 7]), відбувається зростання зерна аустеніту до дуже великих розмірів. Водночас за незначних перебільшень деформацією критичного значення відбувається відповідне диспергування аустенітної структури, що разом із зернами дуже великих розмірів буде призводити до нерівномірності структури аустеніту в цілому. Сформована структура аустеніту з різним зерном обов'язково негативно позначиться на структурному стані металу колеса після окремого

нагрівання й завершальної термічної зміцнювальної обробки – прискореного охолодження [11, 12]. Пропорційно структурному стану буде змінюватися й комплекс властивостей металу по перетину обода й маточини, що є найбільш масивними елементами залізничного суцільнокатаного колеса.

Мета

Основною метою роботи є визначення особливостей розвитку процесів рекристалізації аустеніту вуглецевої сталі залежно від ступеня гарячої пластичної деформації та розробка пропозицій щодо поліпшення структурного стану металу залізничного суцільнокатаного колеса.

Методика

Як матеріал для досліджень використані дві вуглецеві сталі залізничного колеса з мінімальним і максимальним вмістом вуглецю 0,55 і 0,65 % та іншими хімічними елементами в межах марочного складу сталі 60. Зразки у вигляді циліндрів діаметром 20 мм і висотою 40 мм нагрівали в муфельній печі, витримували певний час для вирівнювання температури по перетину зразка. Після цього зразки піддавали гарячому обтискуванню на випробувальній машині типу «Інстрон». Температурний інтервал гарячого обтискування зразків складав 950–1100 °С, за ступенів деформації по висоті в інтервалі 10–40 %. Швидкість деформації дорівнювала 10^{-3} – 10^{-2} с⁻¹. Для виявлення меж зерен аустеніту використовували стандартний травник. Структурні дослідження проводили з використанням світлового мікроскопа типу «Епіквант» за збільшень, достатніх для визначення особливостей будови зерен аустеніту. Величину розміру зерна аустеніту визначали за методиками кількісної металографії.

Результати

У процесі виготовлення суцільнокатаних залізничних коліс послідовне обтиснення заготовки в калібрах пресового устаткування прокатного стану за температур порядку 1 200–1 250 °С супроводжується формуванням значної структурної неоднорідності вуглецевої сталі. Обумовлено це високими температурами обтискування металу, складністю форм і різною товщиною окремих елементів залізничного колеса. Дослідженнями мікроструктури [3, 4] встановлено, що в центральних об'ємах обода колеса ступінь пластичної деформації не перевищує 10 %, а поблизу з поверхнею кочення може досягати рівня 50–60 %. Розбіжність у ступені пластичної деформації за зазначених температур гарячого обтискування впливає на розвиток процесів рекристалізації аустеніту, що в свою чергу визначає кінцевий розмір зерна. За даними [9, 13], у разі незмінної температури нагрівання, пропорційно ступеню пластичної деформації вище за критичне значення, розмір зерна аустеніту буде зменшуватися. На підставі цього величина зерна аустеніту в центральних об'ємах обода залізничного колеса, після завершення гарячого обтискування та з урахуванням окремого нагрівання для термічного зміцнення й відпускання, становить приблизно 0 або 1 бал. А поблизу з поверхнею кочення, за рахунок більш високого ступеня пластичної деформації, не перевищуватиме 2–3 бали [4]. У загальному вигляді сформована структура металу перебуває в якійсь кореляції з епюрами розподілу величини гарячої пластичної деформації по елементах колеса. Так, максимальне обтискування досягається в області обода, що призводить до формування структури аустеніту з розміром зерна приблизно 2 бали. В областях диска поблизу з ободом картина значно складніша. Річ у тому, що хоча метал поблизу з ободом і піддається значно меншому обтискуванню (порівняно з ободом), структура аустеніту насправді має більш високу дисперсність. Розмір зерна для вказаних об'ємів металу складає значення на рівні 3–4 бали [4]. Наведене положення обумовлене частковим збереженням наслідків гарячого наклепу аустеніту після обтискування заготовки на пресі 100 МН (рис. 1, б) перед прокатуванням на прокатному стані. Су-

марний вплив від послідовних етапів гарячої деформації призводить до формування більш дисперсної структури аустеніту з розмірами зерна до 4 балів.

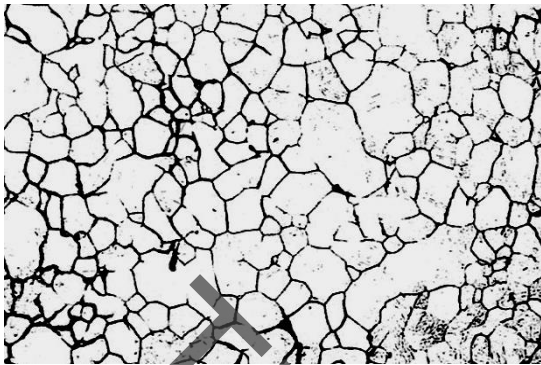
Таким чином, чим більший перетин металу має визначений елемент залізничного колеса, тим більш значної нерівномірності за розмірами зерен аустеніту слід очікувати. Структура аустеніту з різним зерном негативно впливає на структурний стан металу колеса після окремого нагрівання та прискореного охолодження. Пропорційно структурному стану буде змінюватися й комплекс властивостей металу по перетину елемента залізничного суцільнокатаного колеса [13].

Нагрівання заготовки залізничного колеса для гарячого обтискування здійснюють до температур, що суттєво перевищують завершення формування однофазної аустенітної структури. За час достатньо тривалої витримки для вирівнювання температури по перетину заготовки відбувається суттєве зростання розміру зерна аустеніту. Окрім ефекту гальмування процесу переміщення межі зерна аустеніту в разі розвитку процесу збиральної рекристалізації, слід очікувати також впливу від загального вмісту вуглецю в сталі [1, 3]. При цьому ступінь перебільшення температурою моменту завершення аустенітного перетворення буде по-різному сприяти прискоренню процесів збільшення розміру аустенітного зерна, залежно від концентрації атомів вуглецю в межах марочного складу сталі залізничного колеса. Якісні зміни в розмірах зерен можна оцінити, порівнюючи реальні структури за прийнятою шкалою балів. З аналізу структури визначено, що більш високим температурам нагрівання відповідає структура аустеніту з цілком очікуваним зростаючим розміром зерна. Разом із цим, за нормативною документацією, для вуглецевої сталі залізничного колеса дозволена зміна концентрації вуглецю в межах марочного складу приблизно на 0,1 %. З урахуванням цього під час розробки технології зміцнення обробок виникає необхідність оцінити можливу зміну розміру зерна аустеніту в сталі з максимальним вмістом вуглецю та мінімальним значенням у процесі гарячого обтискування.

За аналізом мікроструктури (рис.1, а) зразків

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

а



б

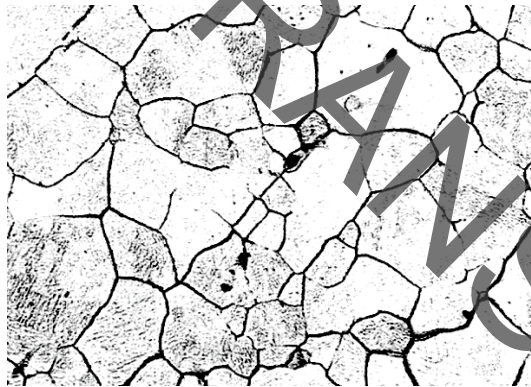


Рис. 1. Структура аустеніту сталі з 0,55 % С після обтискування на 10 %, за температур: а – 950 °С; б – 1100 °С. Збільшення 100

сталі з вмістом вуглецю 0,55 % після 10 % обтискування за температури 950 °С, виявлене формування зерен аустеніту за формою, близькою до поліедра, за середнього розміру порядку 50–60 мкм. Для температури деформації 1100 °С одночасно зі зростанням середнього розміру зерна спостерігається формування структури аустеніту з суттєвою неоднорідністю (рис. 1, б). Присутність у структурі сталі зерен із великою розбіжністю в розмірах можна розглядати як свідчення початку розвитку рекристалізації за механізмом коалесценції [1, 6, 9]. Водночас у структурі гарячедеформованого металу виявляється збільшення кількості меж зерен із відсутніми окремими фрагментами (рис. 1, б). Зазначена ознака свідчить про початок аномального зростання зерен, що обумовлює подальше зростання неоднорідності структури аустеніту в цілому [1, 13]. Аналогічні об'єми металу (з відсутніми ділянками меж), хоча і в меншій кількості, були визначені

в структурі і за більш низьких температур обтискування (рис. 1, а).

Підвищення концентрації вуглецю в сталі до 0,65 % не призвело до якісних змін у характері сформованої структури аустеніту. У першу чергу слід відзначити незмінність форми зерен. Разом із цим середній розмір зерна аустеніту має більші значення для сталі з підвищеним вмістом вуглецю. Порівняно зі сталлю з 0,55 % С, для однакових температур і ступенів обтискування (рис. 1) сформована структура аустеніту візуально має більший середній розмір зерна (рис. 2). Дійсно, порівняно зі структурами після однакових умов деформації, наприклад, після обтискування на 10 %, для температури 950 °С можна визначити, що тільки підвищення концентрації вуглецю в сталі на 0,1 % призвело до зростання розміру зерна аустеніту на 30 мкм. Наведене збільшення у відносних величинах складає приблизно 30 %. Одночасно зросла неоднорідність структури аустеніту в цілому. Для досліджуваних сталей отримані залежності розміру зерна аустеніту від температури і ступеня гарячого обтискування якісно збігаються з відомими результатами експериментальних досліджень [3, 4, 12].

Таким чином, із метою підвищення рівномірності структури та зменшення розміру зерна аустеніту після завершення гарячого обтискування заготовки залізничного колеса, може бути запропоновано збільшення ролі гарячого наклепу металу. Так, під час формування профілю обода, з урахуванням обмеженої потужності прокатного стану, збільшити ступінь гарячого наклепу можна завдяки зниженню температури обтискування. Технологічно такий вплив на формування структури може бути реалізований завдяки поступовому зниженню температури під час гарячої пластичної деформації в разі утворення обода. Дійсно, після певної деформації на завершальному етапі формоутворення обода, навіть незначного зниження температури на рівні 100–150 °С поверхневих прошарків повинно бути достатньо для подрібнення структури аустеніту на більш віддалених від поверхні ділянках. Указане зниження температури обтискування, забезпечуючи підвищення опору поверхневих прошарків металу обода, буде сприяти збільшенню ступеня гарячої пластичної

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

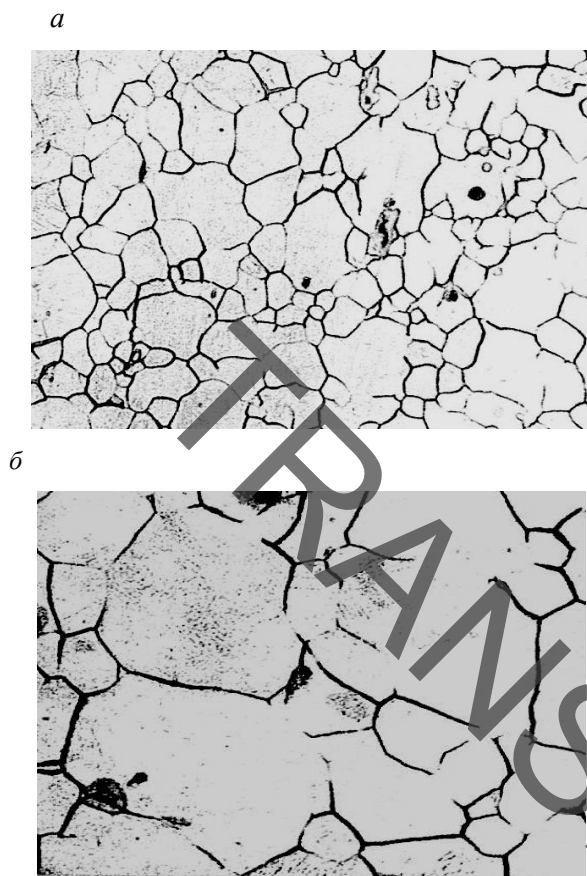


Рис. 2. Структура аустеніту сталі з 0,65 % С після обтискування на 10 % за температур: а – 950 °С; б – 1100 °С. Збільшення 100

деформації аустеніту в його центральних об'ємах. Унаслідок цього центральні об'єми обода будуть піддаватися більшому гарячому наклепу. Таким чином, підвищення ступеня гарячого наклепу, прискорюючи розвиток процесів рекристалізації, призведе до формування більш рівномірної структури з подрібненим зерном аустеніту по перетину обода суцільнокатаного залізничного колеса.

Порівняно зі зміною температури обтискування, визначеного впливу на розвиток процесів подрібнення зерна аустеніту можна досягти, змінюючи схему деформації металу. Річ у тому, що під час гарячого обтискування вуглецевої сталі за температурах вище за A_{c3} співвідношення в розвитку процесів полігонізації та рекристалізації буде визначати формування кінцевої аустенітної структури [9, 11]. Сам механізм впливу на структурні зміни аустеніту в разі за-

міни одноразової деформації на обтискування в декілька етапів (за умов незмінного сумарного значення) насправді визначається умовами формування осередку рекристалізації [1].

Критичний ступінь пластичної деформації є межею на діаграмі рекристалізації, що відокремлює області з практично відсутніми ознаками розвитку процесів рекристалізації від тих, у яких тривалості кількох секунд достатньо для її завершення. У цьому випадку темп накопичення дефектів кристалічної будови та їх розташування будуть мати вирішальний вплив на зародження зерен під час рекристалізації. Так, на початкових етапах гарячого обтискування, коли накопиченню дефектів кристалічної будови відповідає рівномірний їх розподіл у матриці металу, умови формування зародка рекристалізації не будуть виконуватися [6]. У разі підвищення ступеня деформації пропорційно буде зростати неоднорідність розподілу дефектів і, у першу чергу, дислокацій. Моменту формування осередку рекристалізації відповідає така величина гарячого обтискування, коли виникає флуктуація в розподілі дислокацій відповідного рівня. Таким чином, піддаючи гарячому обтискуванню вуглецеву сталь на величини, яких недостатньо для формування зародка рекристалізації, стає можливим зсунути момент розвитку вказаного процесу в бік більш тривалих витримок після завершення деформації.

Аналіз результатів проведених досліджень [2, 3] підтвердив можливість поліпшення структурного стану та пов'язаного з ним комплексу властивостей після гарячого обтискування прокату з вуглецевих сталей. За температури гарячого обтискування вуглецевої сталі залізничного колеса 1250 °С заміна величини деформації 30 % на три етапи по 10 % призвела до збільшення відносного видовження, енергії руйнування металу, коефіцієнта тріщиностійкості приблизно на 10–12 % [1]. Отриманий результат має своє пояснення. Так, якщо врахувати, що утворення зародка рекристалізації аустеніту вуглецевої сталі як у процесі гарячого обтискування, так і під час витримок між етапами деформації значною мірою визначається не стільки зниженням густини дефектів кристалічної будови, скільки їх перерозподілом, заміна одноразової деформації на подрібнену може сут-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

тево змінити умови розвитку вказаного процесу.

На основі аналізу експериментальних даних [12], можна констатувати що розвиток процесу рекристалізації «in situ» повинен призводити до формування такої субструктури, яка після завершення гарячого обтискування визначає вплив на остаточний структурний стан готового виробу. Результати дослідження мікроструктури наведені в табл. 1. Аналіз отриманих розмірів зерна аустеніту свідчить, що периферійні об'єми металу обода залізничного колеса, які безпосередньо контактують із деформуючим інструментом, мають дещо нижчу температуру порівняно з більш віддаленими. Як наслідок, у цих об'ємах металу на більш тривалий термін буде збережений стан гарячого наклепу. У свою чергу, це призведе до підвищення концентрації дефектів кристалічної будови в зернах аустеніту після завершення деформації.

Таблиця 1

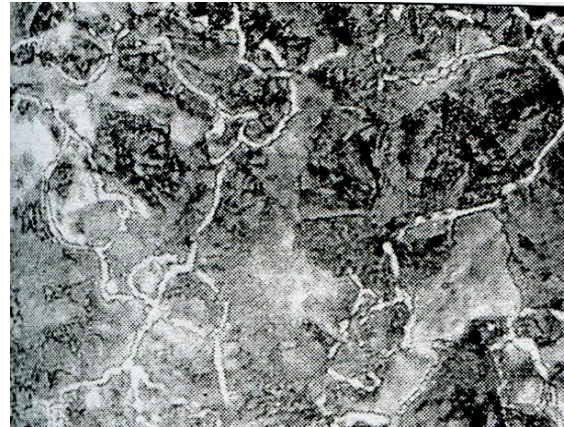
Вплив одноразового й подрібненого обтискування вуглецевої сталі за температури 1 250 °С

Загальний ступінь деформації 30 %	Розмір зерна аустеніту (мкм) на відстані від поверхні обтискування (мм)	
	10	35
одноразовий	110	100
подрібнений	54	100

Указана підвищена густина дефектів у структурі аустеніту буде додатковим стимулом для розвитку як динамічної в процесі обтискування, так і статичної рекристалізації за термін витримки після завершення гарячого обтискування. З іншого боку, аустенітна структура вуглецевої сталі є дуже чутливою до густини дефектів кристалічної, що вводяться під час гарячої пластичної деформації. Наприклад, збільшення ступеня деформації приблизно в 1,5 раза при температурі 1 000 °С, скорочує термін завершення рекристалізації аустеніту до 10 разів, із 20–30 до 3 с [3]. Таким чином, у разі заміни 30 % гарячої деформації на триразову по 10 % будуть досягнуті умови формування структури аустеніту з більш дрібним зерном, яка в подальшому визначатиме остаточну структуру металу залізничного колеса (рис. 3). У випадку

збільшення відстані від поверхні обтискування, зміна схеми деформації (одноразова або подрібнена) буде мати пропорційно більш низький відбиток на розмірі зерна аустеніту (рис. 3, табл. 1).

а



б

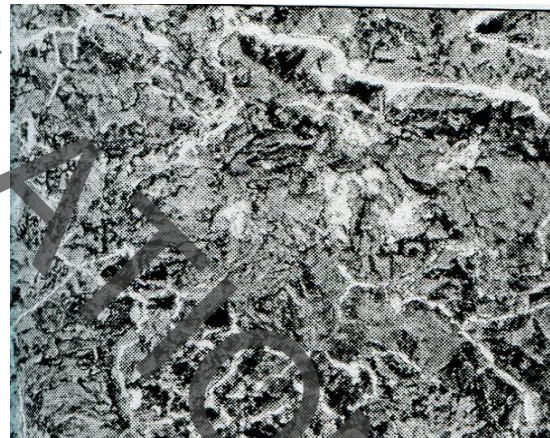


Рис. 3. Структура сталі залізничного колеса на відстані 10 мм від поверхні обтискування після одноразової деформації на величину 30 % (а) і подрібненої (б). Збільшення 300

Таким чином, наведені структурні зміни в сталі залізничного колеса обумовлені значною мірою формуванням структури аустеніту під час гарячого обтискування. З іншого боку, додаткового диспергування зерен аустеніту можна досягти шляхом порушення умов розвитку процесів збиральної рекристалізації, змінюючи співвідношення між ступенем гарячої деформації, тривалістю ізотермічних витримок і т. д. [7, 14]. Наведені положення пояснюються

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

конкуруючим впливом на структуроутворення під час нагрівання деформованого металевого матеріалу від якісно різних за природою механізмів.

За умов, коли ступеня пластичної деформації для початку розвитку процесів рекристалізації не достатньо, структурні перетворення відбуваються завдяки розвитку полігонізації. У наслідок цього в деформованому металі порушуються умови формування зародка рекристалізації. Із метою подальшого сприяння розвитку рекристалізації необхідно здійснити додаткову пластичну деформацію або підвищити температуру нагрівання деформованого металу. Таким чином, заміна одноразового обтискування на подрібнене сприятиме прискоренню розвитку процесів полігонізації, що значною мірою повинно порушити умови формування зародка рекристалізованого аустенітного зерна. Сформована за вказаних умов аустенітна структура позитивно вплине на остаточний структурний стан вуглецевої сталі залізничного колеса на завершальній стадії термічного змінення [4, 5, 10].

Наукова новизна та практична значимість

На основі дослідження розвитку процесів збиральної рекристалізації під час гарячого обтискування вуглецевої сталі залізничного колеса визначено, що збільшення вмісту вуглецю сприяє збільшенню зерна аустеніту. Після заве-

ршення гарячого обтискування заготовки колеса структурна неоднорідність аустеніту, що виникає, визначається зміною механізму розвитку процесів рекристалізації. У разі деформацій вище критичного ступеня відбувається формування й послідовне зростання зародків рекристалізації, що призводить до подрібнення структури. За деформацій нижче критичного значення зростання зерен аустеніту відбувається за механізмом коалесценції, за яким послідовно зникають фрагменти меж із великими кутами дезорієнтації. Із метою подрібнення зерен аустеніту в масивних елементах колеса пропонуємо заміну одноразового гарячого обтискування на подрібнене.

Висновки

1. У випадку гарячого обтискування заготовки залізничного колеса збільшення концентрації атомів вуглецю в межах марочного складу сталі сприяє зростанню середнього розміру зерна аустеніту.
2. Формування визначеного ступеня структурної неоднорідності аустеніту по перетину обода або маточини залізничного колеса обумовлене залежністю механізму розвитку процесів рекристалізації від величини деформації.
3. За умов однакового ступеня гарячої пластичної деформації заміна одноразового обтискування на подрібнене сприяє зменшенню розміру зерна аустеніту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко И. А., Большаков В. И. *Морфология структуры и деформационное упрочнение стали*. Днепро : Маковецкий, 2008. 196 с.
2. Вакуленко И., Перков О., Страдомски З. Влияние температуры величины горячей деформации на размер зерна аустенита при изготовлении железнодорожных колес. Copyright by Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materialow Politechniki Czestochowskiej. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering : Collective monograph XVI International Scientific Conference*. Czestochowa, 2015. № 48. С. 365–368.
3. Узлов И. Г., Перков О. Н., Вакуленко И. А. Влияние схемы горячей деформации заготовки на свойства металла обода цельнокатаных железнодорожных колес. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2002. Вып. 5. С. 196–199.
4. Шифрин М. Ю., Андреев Ю. В., Лихошвай В. А. Влияние деформации заготовки на прессах и в колесопрокатном стане на механические свойства диска и обода цельнокатаных колес. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1970. № 8. С. 7–11.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

5. Banerjee A., Hossain R., Pahlevani F., Zhu Q., Sahajwalla V., Prusty G. Strain-rate-dependent deformation behaviour of high-carbon steel in compression : mechanical and structural characterization. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. Iss. 8. P. 6594–6607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03301-x>
6. Hossain R., Pahlevani F., Quadir M. Z., Sahajwalla V. Stability of retained austenite in high carbon steel under compressive stress : an investigation from macro to nano scale. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34958>
7. Hubbard D. *Plastic Deformation : Processes, Properties and Applications*. USA : Nova Science Publishers, 2016. 198 p.
8. Ławrynowicz Z. Plastic deformation and softening of the surface layer of railway wheel. *Advances in Materials Science*. 2015. Vol.15. Iss. 4. P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.1515/adms-2015-0018>
9. Mirzadeh H. Constitutive modeling and prediction of hot deformation flow stress under dynamic recrystallization conditions. *Mechanics of Materials*. 2015. Vol. 85. P. 66–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.02.014>
10. Qiu C., Cookson J., Mutton P. The role of microstructure and its stability in performance of wheels in heavy haul service. *Journal of Modern Transportation*. 2017. Vol. 25. Iss. 4. P. 261–267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0143-9>
11. Ren X., Qi J., Gao J., Wen L., Jiang B., Chen G., Zhao H. Effects of Heating Rate on Microstructure and Fracture Toughness of Railway Wheel Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. Iss. 2. P. 739–747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3264-y>
12. Shen X., Yan J., Zhang L., Gao L., Zhang J. Austenite grain size evolution in railway wheel during multi-stage forging processes. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. Vol. 20. Iss. 3. P. 57–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60070-9](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60070-9)
13. Zhao H., Qi J., Su R., Zhang H., Chen H., Bai L., & Wang C. Hot deformation behaviour of 40CrNi steel and evaluation of different processing map construction methods. *Journal Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 2856–2869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.020>
14. Wang J., Xiao H., Xie H. B., Xu X. M. Simulation of Recrystallization Behavior and Austenite Grain Size Evolution during Hot Deformation of Low Carbon Steel Using the Flow Stress. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 337. P. 178–183. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.337.178>

И. А. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Д. М. БОЛОТОВА², С. В. ПРОЙДАК³, Х. АСКЕРОВ⁴, Х. КУГ⁵, А. О. ЧАЙКОВСКАЯ⁶

^{1*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Днепропетровский лицей железнодорожного транспорта, ул. Универсальная, 7, Днипро, Украина, 49024, тел. +38 (098) 351 99 70, эл. почта dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта proydak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Каф. «Инженерная механика», Карабукский университет, Катабук, Турция, 78050, тел. +90 (538) 455 04 45, эл. почта hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

⁵Каф. «Инженерная механика», Карабукский университет, Катабук, Турция, 78050, тел. +90 (544) 842 62 08, эл. почта hangun1878@gmail.com, ORCID 0000-0002-6322-4269

⁶Каф. «Материаловедения и обработки материалов», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (095) 618 14 63, эл. почта chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Цель. Основной целью работы является определение особенностей развития процессов рекристаллизации аустенита углеродистой стали в зависимости от степени горячей пластической деформации и разработка предложений по улучшению структурного состояния металла железнодорожных цельнокатаных колес.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Методика. В качестве материала для исследований использованы две углеродистые стали железнодорожных колес с минимальным и максимальным содержанием углерода 0,55 и 0,65 %, и другими химическими элементами в пределах марочного состава стали 60. Образцы в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 40 мм нагревали в муфельной печи, выдерживали требуемое время для выравнивания температуры по сечению образца. После этого образцы подвергались горячему обжатию на испытательной машине типа «Инстрон». Температурный интервал горячего обжатия образцов составлял 950–1100 °С, при степенях деформации по высоте в интервале 10–40 %. Скорость деформации составляла 10^{-3} – 10^{-2} с⁻¹. Для выявления границ зерен аустенита использован стандартный травитель. Исследования структуры осуществляли с использованием светового микроскопа типа «Епиквант» при увеличениях, достаточных для определения особенностей строения зерен аустенита. Величину размера зерна аустенита определяли с использованием методик количественной металлографии. **Результаты.** При горячем обжатии заготовки железнодорожного колеса увеличения концентрации атомов углерода только в пределах марочного состава стали достаточно для роста среднего размера зерна аустенита, что подтверждает предположения по ограничению содержания углерода в металле железнодорожных колес. Формирование определенной степени структурной неоднородности аустенита по сечению обода или ступицы железнодорожного колеса обусловлено изменением механизма развития процессов рекристаллизации в зависимости от величины деформации. В условиях одинаковой степени горячей пластической деформации замена однократного обжатия на дробное сопровождается нарушением условий формирования зародыша рекристаллизации. В результате указанной замены схемы горячей пластической деформации достигается уменьшение размера зерна аустенита. **Научная новизна.** На основе исследования развития процессов собирательной рекристаллизации во время горячего обжатия углеродистой стали железнодорожного колеса определено, что увеличение содержания углерода способствует приросту размера зерна аустенита. После завершения горячего обжатия заготовки колеса возникающая структурная неоднородность аустенита объясняется изменением механизма развития процессов рекристаллизации. При деформациях выше критической степени происходит формирование и последовательный рост зародышей рекристаллизации, приводя к измельчению структуры. При деформациях ниже критического значения рост зерен аустенита происходит по механизму коалесценции, по которому последовательно исчезают фрагменты границ с большими углами разориентации. **Практическая значимость.** Для измельчения зерен аустенита в массивных элементах железнодорожного цельнокатаного колеса предлагаем замену однократного горячего обжатия на дробное.

Ключевые слова: аустенит; деформация; температура; размер зерна; углеродистая сталь; железнодорожное колесо

I. O. VAKULENKO^{1*}, D. M. BOLOTOVA², S. V. PROIDAK³, H. ASKEROV⁴, H. CUG⁵,
H. O. TCHAIKOVSKA⁶

^{1*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Dnipro Lyceum of Railway Transport, Universalna St., 7, Dnipro, Ukraine, 49024, tel.+38 (098) 351 99 70, e-mail dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail proydak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (538) 455 04 45, e-mail hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

⁵Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (544) 842 62 08, e-mail harun1878@gmail.com, ORCID 0000-0002-6322-4269

⁶Dep. «Materials Science and Materials Processing», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 618 14 63, e-mail chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

FORMATION OF CARBON STEEL STRUCTURE DURING HOT PLASTIC DEFORMATION

Purpose. The main purpose of the work is to determine the peculiarities of the development of recrystallization processes of carbon steel austenite depending on the degree of hot plastic deformation and to develop proposals for improving the structural state of the metal of the railway solid-rolled wheel. **Methodology.** Two carbon steels of a railway wheel with a minimum and maximum carbon content of 0.55 and 0.65 % and other chemical elements within the grade composition of the steel 60 were used as research material. Samples in the form of cylinders with a diameter of 20 mm and a height of 40 mm were heated in a muffle furnace, exposed for a certain time to equalize the temperature across the cross section of the sample. After that, the samples were subjected to hot compression on Instron type test machine. The temperature interval of hot compression of the samples was 950–1100 °C, with deformation degrees in height in the range of 10–40%. The strain rate was 10^{-3} – 10^{-2} sec⁻¹. A standard etching was used to detect the boundaries of the austenite grains. Structural studies were performed using Epikvant type light microscope at magnifications sufficient to determine the structure of austenite grains. The grain size of austenite was determined by the methods of quantitative metallography. **Findings.** In the case of hot compression of the railway wheel blank, increasing the concentration of carbon atoms only within the grade composition of the steel is sufficient to increase the average austenite grain size, which confirms the proposals to limit the carbon content in the metal of railway wheels. The formation of a certain degree of austenite structural heterogeneity at the cross section of the rim or hub of the railway wheel is due to a change in the development mechanism of recrystallization processes depending on the deformation value. Under conditions of the same degree of hot plastic deformation, the replacement of one-time compression by fractional one is accompanied by a violation of the conditions of formation of the recrystallization nucleus. As a result of the specified replacement of the scheme of hot plastic deformation we obtain reduction in the austenite grain size. **Originality.** Based on a study of the development of collective recrystallization processes during the hot compression of carbon steel of the railway wheel, it was determined that the increase in carbon content contributes to the austenite grain increase. After hot compression of the wheel blank, the structural inhomogeneity of austenite that occurs is determined by a change in the mechanism of recrystallization processes development. During deformations above the critical degree, the recrystallization nuclei are formed and successively grow, which leads to the structure refinement. In the case of deformations below the critical value, the growth of austenite grains occurs according to the coalescence mechanism, according to which fragments of boundaries with large disorientation angles consistently disappear. **Practical value.** For austenite grain refining in massive elements of solid-rolled railway wheel we offer to replace one-time hot compression by fractional one.

Keywords: austenite; deformation; temperature; grain size; carbon steel; railway wheel

REFERENCES

1. Vakulenko, I. A., & Bolshakov, V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnepropetrovsk: Makovetskiy Y. V. (in Russian)
2. Vakulenko, I., Perkov, O., & Stradomski, Z. (2015). Influence of Temperature and Value of Hot Deformation on Size of Grain in Austenite at Making of Railway Wheels. Copyright by Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materialow Politechniki Czestochowskiej. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: Collective monograph XVI International Scientific Conference. Czestochowa*, 48, 365-368. (in Russian)
3. Uzlov, I. G., Perkov, O. N., & Vakulenko, I. A. (2002). Vliyanie skhemy goryachey deformatsii zagotovki na svoystva metalla oboda tselnokatanykh zheleznodorozhnykh koles. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii*, 5, 196-199. (in Russian)
4. Shifrin, M. Yu., Andreev, Yu. V., & Likhoshvayj, V. A. (1970). Vliyanie deformatsii zagotovki na pressakh i v kolesoprokatnom stane na mekhanicheskie svoystva diska i oboda tselnokatanykh koles. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 8, 7-11. (in Russian)
5. Banerjee, A., Hossain, R., Pahlevani, F., Zhu Q., Sahajwalla V., & Prusty G. (2019). Strain-rate-dependent deformation behaviour of high-carbon steel in compression: mechanical and structural characterization. *Journal of Materials Science*, 54(8), 6594-6607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03301-x> (in English)
6. Hossain, R., Pahlevani, F., Quadir, M. Z., & Sahajwalla, V. (2016). Stability of retained austenite in high carbon steel under compressive stress: an investigation from macro to nano scale. *Scientific Reports*, 6, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34958> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

7. Hubbard, D. (2016). *Plastic Deformation: Processes, Properties and Applications*. USA: Nova Science Publishers. (in English)
8. Ławrynowicz, Z. (2015). Plastic deformation and softening of the surface layer of railway wheel. *Advances in Materials Science*, 15(4), 6-13. DOI: <https://doi.org/10.1515/adms-2015-0018> (in English)
9. Mirzadeh, H. (2015). Constitutive modeling and prediction of hot deformation flow stress under dynamic recrystallization conditions. *Mechanics of Materials*, 85, 66-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.02.014> (in English)
10. Qiu, C., Cookson, J., & Mutton, P. (2017). The role of microstructure and its stability in performance of wheels in heavy haul service. *Journal of Modern Transportation*, 25(4), 261-267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0143-9> (in English)
11. Ren, X., Qi, J., Gao, J., Wen, L., Jiang, B., Chen, G., & Zhao, H. (2016). Effects of Heating Rate on Microstructure and Fracture Toughness of Railway Wheel Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(2), 739-747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3264-y> (in English)
12. Shen, X., Yan, J., Zhang, L., Gao, L., & Zhang, J. (2013). Austenite grain size evolution in railway wheel during multi-stage forging processes. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20(3), 57-65. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60070-9](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60070-9) (in English)
13. Zhao, H., Qi, J., Su, R., Zhang, H., Chen, H., Bai, L., & Wang, C. (2020). Hot deformation behaviour of 40CrNi steel and evaluation of different processing map construction methods. *Journal Materials Research and Technology*, 9(3), 2856-2869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.020> (in English)
14. Wang, J., Xiao, H., Xie, H. B., & Xu, X. M. (2011). Simulation of Recrystallization Behavior and Austenite Grain Size Evolution during Hot Deformation of Low Carbon Steel Using the Flow Stress. *Advanced Materials Research*, 337, 178-183. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.337.178> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.01.2020

Прийнята до друку: 25.05.2020