

УДК 629.4.027.4:669.14.018.294

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ І ВЕЛИЧИНИ ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА РОЗМІР ЗЕРНА АУСТЕНІТУ СТАЛІ СУЦІЛЬНОКАТАНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО КОЛЕСА

І. О. Вакуленко¹, О. М. Перков², Д. М. Болотова³

¹ Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

² Інститут чорної металургії НАН України

³ Дніпропетровський професійний залізничний ліцей

Використання прискореного охолодження в процесі гарячого обтискування ободу при виготовленні залізничного колеса приводить до зменшення розміру зерна аустеніту, що сприяє підвищенню рівня пластичних властивостей і ударної в'язкості металу

Использование ускоренного охлаждения в процессе горячего обжатия обода при изготовлении железнодорожного колеса приводит к уменьшению размера зерна аустенита, что способствует повышению уровня пластических свойств и ударной вязкости металла

The use a speed-up of cooling at hot deform rim at produce railway wheel lead to decrease of grain size of austenite, that is promote increase level of plastic properties and impact toughness of metal

Вступ

При термомеханічному зміцненні підвищення густини дефектів кристалічної будови при гарячій пластичній деформації і фазовий наклеп вуглецевої сталі в процесі прискореного охолодження визначають структурний стан і зв'язаний з ним комплекс властивостей металу. Підвищення температури пластичної деформації аустеніту прискорює розвиток процесів дифузійного масопереносу, що сприяє пом'якшенню аустеніту після гарячого наклепу. Формування визначеної субструктури в зернах аустеніту (виникнення полігональних угруповань з дислокацій, в тому числі меж з малими кутами разорієнтації), повинне гальмувати розвиток процесів анігіляції дефектів кристалічної будови [1]. Керування процесами, що спрямовані на збереження структурних змін в аустеніті при гарячому пластичному деформуванні, дозволить змінювати комплекс властивостей вуглецевої сталі у достатньо широкому інтервалі [2,3].

Постановка задач дослідження

Визначення впливу температури і ступеня гарячої пластичної деформації на розмір зерна аустеніту при формуванні ободу суцільнокатаного залізничного колеса.

Методика проведення експериментів

Матеріалом для дослідження була вуглецева сталь 60 із змістом вуглецю 0,56 %, зразки якої досліджували на етапі виготовлення ободу залізничного суцільнокатаного колеса. Температура і ступінь гарячого обтискування змінювалися в діапазоні 950-1150 °С і 10-35 % відповідно. Дослідження структури металу здійснювали під світловим мікроскопом. Розмір зерна аустеніту визначали використовуючи методики кількісної металографії [4].

Результати досліджень

За умов незмінного ступеню деформації, зниження температури обтискування на прокатному стані супроводжується зменшенням швидкості зростання зерна аустеніту з неодмінним підвищенням опору металу деформації. На підставі цього, підстужуючи метал в інтервалах між проміжними обтискуваннями при формуванні ободу колеса стає можливим підвищити ступінь деформації в його центральних об'ємах. Після підстужування, метал поблизу з поверхнею тепловідводу, повинен мати підвищений опір деформації. Таким чином, внутрішні об'єми металу з більш високою температурою будуть піддаватися підвищеним ступеням пластичної деформації. В результаті використання операції проміжного прискореного охолодження можна отримати більш дисперсну структуру аустеніту в центральних об'ємах ободу залізничного колеса після кінцевої формоутворюючої деформації.

В порівнянні з температурою 1250 °С, зниження температури обтискування заготовки при виготовленні залізничного колеса до 1150 °С повинне мати цілком обґрунтований відбиток на комплексі властивостей металу елементів колеса.

З аналізу експериментальних даних, по механічним властивостям можна визначити, що незалежно від відстані досліджуваних об'ємів металу від поверхні кочення, за всіма показниками комплекс властивостей вище при зниженні температури обтискування. В порівнянні з властивостями міцності, характеристики пластичності зростають достатньо суттєво. Наприклад, збільшення відносних видовження і звуження досягає понад 1,5 разів. Аналогічний характер впливу спостерігається і на величині ударної в'язкості (*KCU*). Випробування зразків металу після обтискування при температурі 1250 °С показали значення *KCU* (при температурі +20 °С)

$0,8-1,0 \frac{K\sigma M}{cm^2}$, в той час, як після деформації при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, вказана характеристика досягає $2,0-3,0 \frac{K\sigma M}{cm^2}$. Враховуючи достатньо високу чутливість ударної в'язкості руйнування до розміру зерна аустеніту (d_A) [3], зменшення d_A повинне цілком обгрунтовано сприяти підвищенню величини KCU [2].

За діючою технологією виготовлення залізничних суцільнокатаних коліс температура нагріву заготовки для обтискування на пресах і прокатному стані складає значення на рівні $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Величина зерна аустеніту в центральних об'ємах металу ободу після виготовлення залізничного колеса приблизно відповідає 0 або 1 балу, а поблизу з поверхнею кочення до 2-3 балу за класифікацією ГОСТ 5639. Обумовлене це залежністю розміру зерна аустеніту від ступеня пластичної деформації, яка досягається при формуванні визначеного елемента колеса. Так, в [3,5] показано, що в центральних об'ємах ободу ступінь пластичної деформації складає значення на рівні 5-10 %, а поблизу з поверхнею кочення – до 50-60 %. Наведена різниця в ступені деформації має визначений відбиток на розвиток процесів збіркової рекристалізації. При незмінній температурі обтискування пропорційно ступеню деформації (за умов перевищення її критичного значення [6,7]) розмір зерна аустеніту буде неухильно зменшуватися. Одним із напрямків підвищення ступеню пластичної деформації аустеніту в центральних об'ємах ободу може бути зниження температури металу на поверхні кочення колеса. На підставі цього, зниження температури обтискування сталі для умов постійного ступеню пластичної деформації, сприяючи розвитку процесів збіркової рекристалізації, приведе до подрібнення зерна аустеніту. Обумовлене наведене положення уповільненням процесів дифузійного масопереносу, які в свою чергу знижують швидкість розвитку анігіляції дефектів кристалічної будови, що вводяться в матрицю при деформації [1]. В наслідок цього, чим у більшому ступені буде збережена густина дефектів кристалічної будови до моменту початку розвитку процесу збіркової рекристалізації, тим більш дрібна буде сформована зеренна структура аустеніту після завершення рекристалізації [2].

Мікроструктурними дослідженнями було підтверджено, що знижуючи температуру обтискування, досягається подрібнення структури аустеніту (рис. 1). Результати оцінки розміру зерна аустеніту, в залежності від температури і ступеню гарячої деформації (ε), без витримки металу після закінчення обтискування, наведені на рис. 2. Враховуючи, що величина критичного ступеню деформації для вуглецевих сталей складає значення на рівні 6-10 % [6,7], максимальні значення d_A відповідають умовам

розвитку процесів рекристалізації для вказаного інтервалу деформацій. За цих умов, в сталі формується структура аустеніту з дуже великими за розміром зернами при одночасно високій структурній неоднорідності. При підвищенні ступеня пластичної деформації, незалежно від температури нагріву металу, характер зміни d_A залишається незмінним. Так, після ступеня пластичної деформації 10 % при підвищенні температури обтискування вуглецевої сталі від 950 до 1150 °С спостерігається збільшення d_A від 60 до 110 мкм (рис. 2). Аналогічний характер впливу визначається і для інших досліджуваних ступенів деформації.

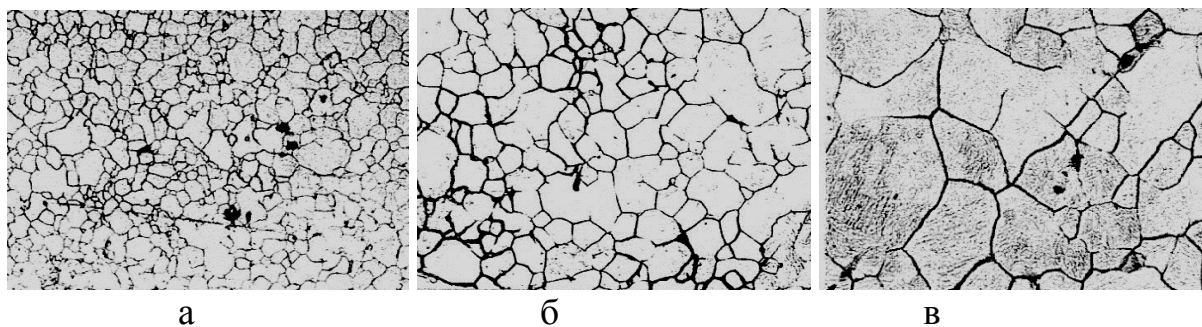


Рис. 1 Вплив температури гарячої деформації 850 – (а), 900 – (б) і 950 °С на структуру аустеніту досліджуваної сталі. Збільшення 75

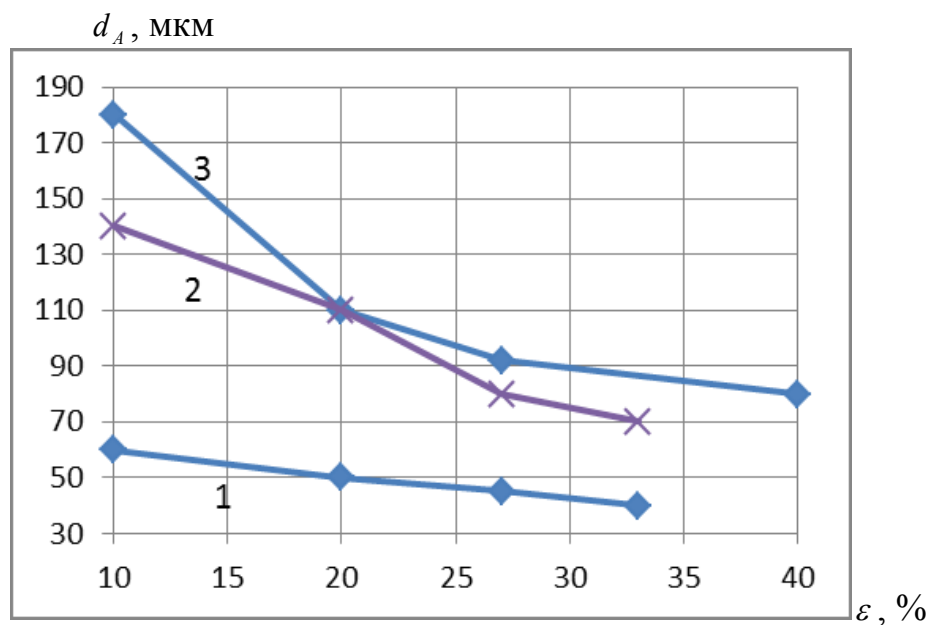


Рис. 2 Залежність середнього розміру зерна аустеніту вуглецевої сталі залізничного колеса від ступеня (ε) і температури (1)-950; (2)-1100 і (3)-1150 °С деформації без витримки після її закінчення

Таким чином, можна з впевненістю вважати, що ступінь пластичної деформації 10 % для вуглецевих сталей, які використовуються для виготовлення залізничних коліс є значенням, яке перебільшує критичну величину.

Порівняльний аналіз зміни розміру зерна аустеніту свідчить, що за умов відсутності витримки металу (після закінчення останньої формоутворюючої деформації) збільшення ступеня деформації від 10 до 33% при температурі 950 °С супроводжується зменшенням d_A на 20 мкм. Для більш високих температур нагріву 1100 і 1150 °С вказана характеристика значно більша і відповідно дорівнює 80 і 90 мкм.

З метою оцінки ступеню впливу температури і величини ε вуглецевої сталі на розмір зерна аустеніту, для спрощення апроксимуємо співвідношення $d_A = f(\varepsilon)$ прямою лінією. Тоді кутовий коефіцієнт співвідношення ($d_A = f(\varepsilon)$), який має вигляд $\frac{dd_A}{d\varepsilon}$, дозволить визначити ступінь впливу деформації на d_A при конкретній температурі. За умов відсутності витримки металу після деформації, для температур обтискування 950, 1100 і 1150 °С величина $\frac{dd_A}{d\varepsilon}$ склала значення 0,8; 2,0 і 2,25 $\frac{\text{мкм}}{\%}$ відповідно. На основі проведеної оцінки можна визначити, що швидкість зменшення розміру зерна аустеніту при зростанні деформації на 1% лише при підвищенні температури обтискування на 150 °С (від 950 до 1100 °С) зростає приблизно в 2,5 разів, а в порівнянні з температурою 1150°С вказана характеристика має ще більше значення. Проведений аналіз кінетики процесу рекристалізації аустенітної структури, при відсутності паузи після завершення деформації, можна вважати відповідним до умов розвитку динамічної рекристалізації в процесі самого обтискування. Найбільший вплив на $\frac{dd_A}{d\varepsilon}$ обумовлений зростанням розміру зерна аустеніту в області мінімальних рівнів обтискування металу. Дійсно, для деформації 10 % при температурах 950, 1100 і 1150 °С d_A дорівнює 60, 140 і 180 мкм відповідно. Таким чином, незначне зниження температури обтискування на етапі формування залізничного колеса дозволить суттєво зменшити розмір зерна аустеніту, а це буде мати позитивний відбиток на комплексі властивостей металу і, в першу чергу, ободу залізничного колеса після кінцевої зміцнюючої обробки.

Враховуючи, що технологічно достатньо складно здійснити прискорене охолодження елементів залізничного колеса зразу після завершення гарячої деформації (без витримки металу після її закінчення),

представляє визначений інтерес оцінити характер зміни розміру зерна аустеніту в залежності від тривалості витримки. На рис. 3. представлена залежність розміру зерна аустеніту від ступеню пластичної деформації і витримки металу тривалістю 1хв після завершення прокатки ободу залізничного колеса. Аналіз характеру залежності d_A від ε для досліджуваного інтервалу температур вказує на його незмінність. З іншого боку, порівняльний аналіз з кінетикою процесу рекристалізації аустенітної структури за умов відсутності паузи після завершення деформації (рис.2), має деякі відмінності. Річ у тому, що до впливу від розвитку процесів динамічної рекристалізації (відсутність паузи після деформації) отримуємо додатковий внесок від розвитку рекристалізації за статичних умов [1,7]. З порівняльного аналізу абсолютних значень розміру зерна аустеніту (рис. 2 і 3) можна визначити цілком очікуване збільшення d_A при всіх температурах і ступенях деформації під час паузи тривалістю 1хв по завершенню обтискування. З іншого боку, використання величини $\frac{dd_A}{d\varepsilon}$ дає змогу оцінити вплив після деформаційної витримки (тривалість 1хв) на кінетику розвитку процесів рекристалізації аустеніту. За 1 хв після завершення гарячої деформації при температурах 950, 1100 і 1150 °С відбувається, на фоні незначного підвищення середнього розміру зерна аустеніту, суттєве зниження різниці між максимальними (при $\varepsilon=10\%$) і мінімальними (при $\varepsilon=40-50\%$) значеннями d_A . Значення величини $\frac{dd_A}{d\varepsilon}$ є додатковим підтвердженням наведеного положення. Так, при підвищенні температури гарячого обтискування для вказаного температурного

інтервалу, кутовий коефіцієнт залежності $d_A = f(\varepsilon)$ для металу з витримкою після завершення деформації 1хв дорівнює 1,6; 1,5 і 2,0 $\frac{мкм}{\%}$.

Порівняльний аналіз з аналогічними значеннями величини $\frac{dd_A}{d\varepsilon}$ для металу без витримки вказує на досягнення деякого вирівнювання структури аустеніту після відповідних ступенів гарячої деформації.

Як показали дослідження мікроструктури, подальше збільшення витримки металу після завершення деформації до 1,5хв, привело до збільшення розміру зерна аустеніту лише для температури обтискування 950 °С. Для більш високих температур гарячої деформації максимальні (при $\varepsilon = 10\%$) і мінімальні (при $\varepsilon = 40 - 50\%$) розміри зерна аустеніту залишаються практично незмінними.

Таким чином можна вважати, що для температури обтискування 950°С починаючи від ступеня деформації 20% і більше, розвиток процесів

динамічної і статичної рекристалізації за термін витримки до 1,5 хв практично завершується. В результаті середній розмір зерна аустеніту стає практично незалежним від тривалості витримки після завершення гарячої деформації металу залізничного колеса. Для більш високих температур гарячого деформування вказане «критичне» значення ступеню деформації зсувається у бік більш малих величин. Так, для температури 1100 °С ступеня деформації 15 % вже достатньо для практично повного завершення процесів збіркової рекристалізації аустеніту. Розмір зерна залишається практично незалежним від температури гарячого обтискування (рис. 2, 3) і визначається впливом виключно від ступеня деформації.

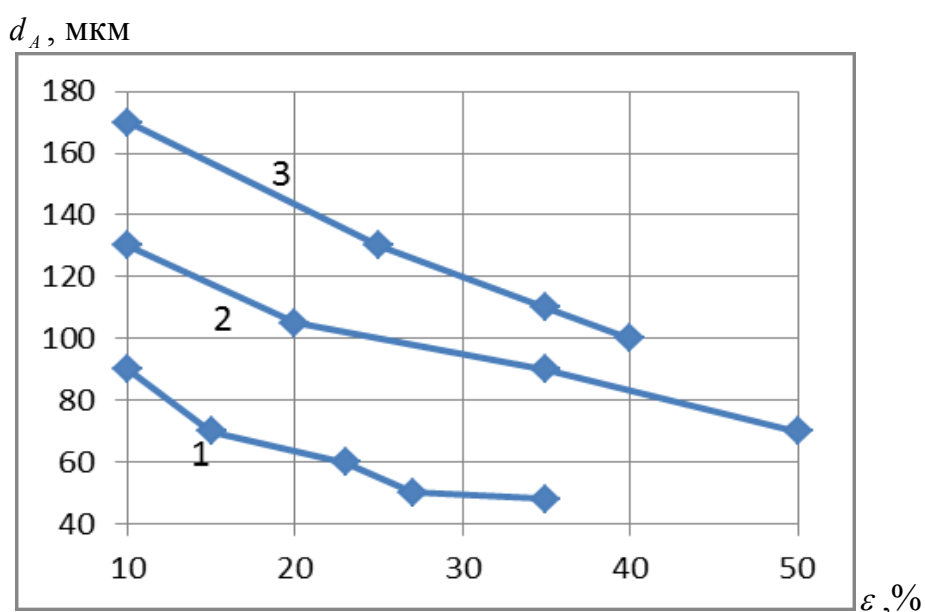


Рис. 3 Залежність середнього розміру зерна аустеніту від ступеню (ε) і температури (1)-950; (2)-1100 і (3)-1150 °С деформації з витримкою металу 1хв після її завершення

На підставі отриманих результатів можна з визначеною впевненістю вважати, що після завершення останньої формоутворюючої пластичної деформації при виготовленні залізничного колеса за витримку до 1,5 хв, зростання розміру зерна аустеніту не буде суттєвим. Після вказаної паузи, якої повинно бути достатньо для передачі колеса на пристрій охолодження, прискореним охолодженням буде припинено подальше зростання d_A . Внаслідок цього, структурні перетворення в процесі прискореного охолодження залізничного колеса будуть відбуватися в металі з попередньо сформованою дрібнозеренною будовою аустеніту. Ефект зміцнення металу буде обумовлений частковим збереженням

гарячого наклепу аустеніту під час обтискування дрібним зерном і дрібнодисперсними продуктами фазового перетворення під час прискореного охолодження.

Таким чином, здійснюючи підстужування ободу суцільнокатаного залізничного колеса в процесі його гарячої прокатки, можна розраховувати на досягнення ефекту подрібнення аустенітної структури до розмірів зерна 5-7 балів.

Література

- 1.Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали [Текст] / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск: Маковецький, 2008. – 196 с.
- 2.Садовский, В.Д. Структурная наследственность в стали [Текст] / В.Д.Садовский. - М.: Металлургия, 1973. - 255с.
- 3.Влияние условий деформирования при прокатке на величину зерна стали цельнокатаных колес [Текст] / И.Г.Узлов, Г.А. Блажнов, Ю.В.Андреев и др. // Термическая обработка металлов. – 1977. - №5. - С.106 – 108.
- 4.Вакуленко, І.О. Структурний аналіз в матеріалознавстві [Текст]/ О.І.Вакуленко . – Дніпропетровськ: Маковецький, 2010. - 124с.
- 5.Данченко, Н. И., Перков О. Н., Гладкова Т. А. Зависимость усталостной прочности и ударной вязкости колесной стали от ее структурного состояния [Текст] / Н.И.Данченко, О.Н.Перков, Т.А.Гладкова. // Теория и практика термической обработки проката. – 1984. - С. 43-45.
- 6.Gleiter, H. High – Grain Boundaries [Текст] / H. Gleiter, B. Chalmers // Progress in Materials Science. – 1972. – Vol. 16. – P. 375-381.
- 7.Бабич, В. К. Деформационное старение стали [Текст] / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.