

УДК 669.017:621.78:539.4:621.771.29  
DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.18.100

## ЗАЛЕЖНІСТЬ РОЗМІРУ ЗЕРНА АУСТЕНИТУ ВІД УМОВ ГАРЯЧОГО ОБТИСКУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

ВАКУЛЕНКО І. О.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
ЧАЙКОВСЬКИЙ О. О.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*,  
ВАКУЛЕНКО Л. І.<sup>3</sup>, *к. т. н.*,  
БОЛОТОВА Д. М.<sup>4</sup>, *аспір.*,  
ЧАЙКОВСЬКА А. О.<sup>5</sup>, *к. т. н., наук. співроб.*

<sup>1\*</sup> Кафедра прикладної механіки і матеріалознавства, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49000, Україна, тел. + 38 (056)370 54 88, e-mail: [dnyzt\\_textmat@ukr.net](mailto:dnyzt_textmat@ukr.net), ORCID ID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (0562)47-59-51, e-mail: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID 0000-0001-8284-7448

<sup>3</sup> Управління Придніпровської залізниці, пр. Яворницького, 108, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (056)793-00-59, e-mail: [vakulenko\\_leonid@mail.ru](mailto:vakulenko_leonid@mail.ru), ORCID ID 0000-0003-2616-740X

<sup>4</sup> Кафедра прикладної механіки і матеріалознавства, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49000, Україна, тел. + 38 (056)370-54-88, e-mail: [dnyzt\\_textmat@ukr.net](mailto:dnyzt_textmat@ukr.net), ORCID ID 0000-0001-6947-3963

<sup>5</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (0562)47-59-51, e-mail: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID 0000-0001-6707-0159

**Анотація. Мета роботи** – дослідження впливу температури і ступеня гарячого обтискування на розмір зерна аустеніту вуглецевої сталі. **Матеріал і методика досліджень.** Як матеріал для досліджень використана вуглецева сталь фрагмента залізничного колеса з умістом вуглецю 0,61 %. Температурний інтервал гарячого обтискування складав 950...150 °С, зі ступенями деформації 10...50 %. Дослідження мікроструктури сталі проводилися із застосуванням світлового мікроскопу. Підготовку об'єкта для досліджень, виявлення структури аустеніту і розрахунок розміру зерна аустеніту виконано у відповідності з методиками кількісної металографії. **Результати.** За отриманими залежностями визначено, що за витримки 1,5 хв після завершення гарячої деформації розвиток процесів динамічної і статичної рекристалізації викликає незначне зростання зерна аустеніту. Для більшості виробів, що виготовляються гарячим пластичним деформуванням указаної витримки достатньо, щоб зберегти частково гарячий наклеп аустеніту перед прискореним охолодженням для термічного зміцнення. **Наукова новизна.** На основі аналізу внутрішньої будови вуглецевої сталі залежно від параметрів гарячого обтискування визначено вплив тривалості витримки після завершення деформації на характер зміни розміру зерна аустеніту. Зменшення ступеня гарячої деформації сприяє підвищенню впливу температури обтискування на дисперсність аустенітної структури. **Практична цінність.** Характер впливу ступеня, температури гарячого обтискування і тривалості витримки після завершення деформації може бути використаний для удосконалення режимів високотемпературних формувальних операцій вуглецевих сталей.

*Ключові слова:* сталь; структура; розмір зерна; аустеніт; температура; деформація

## ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРА ЗЕРНА АУСТЕНИТА ОТ УСЛОВИЙ ГОРЯЧЕГО ОБЖАТИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

ВАКУЛЕНКО И. А.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
ЧАЙКОВСКИЙ О. А.<sup>2</sup>, *к. т. н., доц.*,  
ВАКУЛЕНКО Л. И.<sup>3</sup>, *к. т. н.*,  
БОЛОТОВА Д. М.<sup>4</sup>, *аспир.*,  
ЧАЙКОВСКАЯ А. О.<sup>5</sup>, *к. т. н., науч. сотр.*

<sup>1\*</sup> Кафедра прикладной механики и материаловедения, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, 49000, Украина, тел. + 38 (056) 370 54 88, e-mail: [dnyzt\\_textmat@ukr.net](mailto:dnyzt_textmat@ukr.net), ORCID ID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднпировская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днипро, 49600, Украина, тел. + 38 (0562) 47-59-51, e-mail: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID 0000-0001-8284-7448

<sup>3</sup> Управление Приднепровской железной дороги, пр. Яворницкого, 108, Днепро, 49600, Украина, тел. + 38 (056) 793-00-59, e-mail: [vakulenko\\_leonid@mail.ru](mailto:vakulenko_leonid@mail.ru), ORCID ID 0000-0003-2616-740X

<sup>4</sup> Кафедра прикладной механики и материаловедения, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, 49000, Украина, тел. + 38 (056) 370-54-88, e-mail: [dnyzt\\_textmat@ukr.net](mailto:dnyzt_textmat@ukr.net), ORCID ID 0000-0001-6947-3963

<sup>5</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. + 38 (0562) 47-59-51, e-mail: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID 0000-0001-6707-0159

**Аннотация.** *Целью работы* является исследование влияния температуры и степени горячего обжатия на размер зерна аустенита углеродистой стали. *Материал и методика исследований.* В качестве материала для исследований использована углеродистая сталь фрагмента железнодорожного колеса с содержанием углерода 0,61 %. Температурный интервал горячего обжатия составлял 950...1150 °C, при степенях деформации 10...50 %. Исследование микроструктуры стали проводилось с использованием светового микроскопа. Подготовка объекта для исследований, выявление структуры аустенита и оценка его размера зерна выполнялись с использованием методик количественной металлографии. *Результаты.* Из полученных зависимостей определено, что после выдержки 1,5 мин после завершения горячей деформации, развитие процессов динамической и статической рекристаллизации не приводит к значительному росту зерна аустенита. Для большинства изделий, изготавливаемых горячим пластическим деформированием, указанной выдержки достаточно, чтобы сохранить частично горячий наклеп аустенита перед ускоренным охлаждением при термическом упрочнении. *Научная новизна.* На основе анализа внутреннего строения углеродистой стали в зависимости от параметров горячего обжатия определено влияние продолжительности выдержки после завершения деформации на характер изменения размера зерна аустенита. Уменьшение степени горячей деформации способствует повышению влияния температуры обжатия на дисперсность аустенитной структуры. *Практическая ценность.* Определенный характер влияния степени, температуры горячего обжатия и продолжительности выдержки после завершения деформации может быть использован для совершенствования режимов высокотемпературных формообразующих операций углеродистых сталей.

*Ключевые слова:* сталь; структура; размер зерна; аустенит; температура; деформация

## THE DEPENDENCE OF GRAIN SIZE AUSTENITE FROM THE CONDITION OF HOT DEFORMATION CARBON STEEL

VAKULENKO I.A.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
CHAYKOVSKY O.A.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.*,  
VAKULENKO L.I.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
BOLOTOVA D. M.<sup>4</sup>, *Postgraduate Student*,  
CHAYKOVSKAYA A.O.<sup>5</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Reseach Assoc.*

<sup>1\*</sup> Department of applied mechanics and materials, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana str., 2, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (056)370-54-88, e-mail: [dnyzt\\_textmat@ukr.net](mailto:dnyzt_textmat@ukr.net), ORCID ID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup> Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. + 38(0562)47-59-51, e-mail: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID 0000-0001-8284-7448

<sup>3</sup> Management of the Dnieper railway, Yavornitzskogo av., 108, Dnipro, 49600, Ukraine, + 38 (056) 793-00-59, e-mail: [vakulenko\\_leonid@mail.ru](mailto:vakulenko_leonid@mail.ru), ORCID ID 0000-0003-2616-740X

<sup>4</sup> Department of applied mechanics and materials, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana str., 2, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. + 38(056)370-54-88, e-mail: [dnyzt\\_textmat@ukr.net](mailto:dnyzt_textmat@ukr.net), ORCID ID 0000-0001-6947-3963

<sup>5</sup> Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38(0562)47-59-51, e-mail: [lab120@mail.pgasa.dp.ua](mailto:lab120@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID 0000-0001-6707-0159

**Abstract. Purpose.** The aim of the paper is to investigate the effect of temperature and the degree of hot reduction on the grain size of austenite carbon steel. **Material and methods of research.** As a material for research, the carbon steel of the fragment of a railway wheel with a carbon content of 0.61 % was used. The temperature range of hot reduction was 950...1150 °C, with deformation degrees of 10...50 %. Investigation of the microstructure of the steel was carried out using a light microscope. Preparation of the object for the studies, identification of the structure of the austenite and evaluation of its grain size were carried out using quantitative metallography techniques. **Results.** Depending on the received dependencies, it is determined that for exposures of 1,5 minutes after the completion of the hot deformation, the development of processes of dynamic and static recrystallizations leads to a slight increase in the grain of austenite. For most products made by hot plastic deformation of this exposure it is enough to preserve a partially hot austenite slander before accelerating cooling with thermal strengthening. **Scientific novelty.** On the basis of the analysis of the internal structure of carbon steel, depending on the parameters of hot reduction, the effect of the duration of aging after completion of the deformation on the character of the change in the grain size of the austenite was determined. The decrease in

the degree of hot deformation promotes an increase in the effect of the reduction temperature on the dispersion of the austenite structure. **Practical value.** The definite nature of the influence of the degree, the temperature of the hot reduction and the duration of aging after the completion of the deformation can be used to improve the regimes of high temperature shaping operations of carbon steels.

**Keywords:** steel; structure; grain size; austenite; temperature; deformation

### Вступ

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. Це зумовлено це високими температурами обтискування металу, складністю форм і різною товщиною окремих елементів залізничного колеса.

Дослідженнями мікроструктури [1] встановлено, що в центральних об'ємах обода колеса ступінь пластичної деформації не перебільшує 10 %, а поблизу з поверхнею катання може досягати рівня 50...60 %. Розходження в ступені пластичної деформації за зазначених температур гарячого обтискування чинить певний вплив на розвиток процесів рекристалізації аустеніту.

За даними [2; 3] за незмінної температури нагріву, пропорційно ступеня пластичної деформації вище критичного значення (за різними оцінками від 6 до 10 % [4; 5]), розмір зерна аустеніту буде зменшуватися. На підставі цього величина зерна аустеніту ( $d_0$ ) в центральних об'ємах обода залізничного колеса після завершення гарячого обтискування і, за необхідності окремого нагріву для термічного зміцнення і відпуску, становить приблизно 0 або 1 бал (рис. 1), а поблизу з поверхнею кочення не перевищує 2–3 балів за шкалою ДСТУ 5639 [6].

### Мета

Мета роботи – дослідження впливу температури і ступеня гарячого обтискування на розмір зерна аустеніту вуглецевої сталі.

### Матеріал і методика досліджень

Як матеріал для досліджень використано вуглецеву сталь фрагмента залізничного колеса з вмістом вуглецю 0,61 %. Температурний інтервал гарячого обтискування складає 950...1 150 °С, зі ступенями деформації 10...50 %. Дослідження мікроструктури сталі проводилися із застосуванням світлового мікроскопа.

Підготовка об'єкта для досліджень, виявлення структури аустеніту і розрахунок розміру зерна аустеніту проводилися у відповідності з методиками кількісної металогрії.

### Результати досліджень

У процесі витримки металу за температурами, що перевищують початок розвитку збіркової рекристалізації, прискорення процесів дифузійного

масопереносу, з одночасним зростанням стимулу зниження накопиченої поверхневої енергії [2], сприяє збільшенню середнього розміру зерна аустеніту. Присутність у структурі аустеніту за температур нагріву 950 °С решток границь зерен із великими кутами розорієнтації може розглядатися як свідчення розвитку рекристалізації аустеніту за механізмом розчинення границь зерен [8].

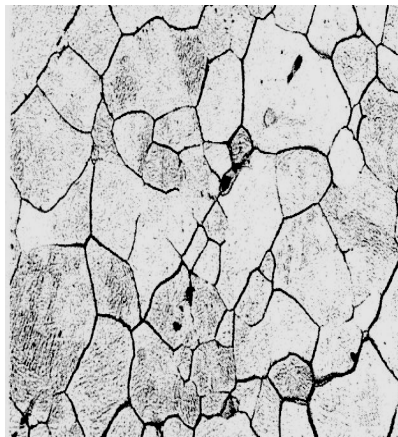
Подальше підвищення температури нагріву супроводжується відповідним прискоренням розвитку процесів рекристалізації (рис. 1 б). За таких температур характерною ознакою структурних перетворень стає підвищена чутливість до незначних відхилень від рівномірності розподілу пластичної деформації, ліквідації хімічних елементів, що входять до складу вуглецевої сталі. Внаслідок цього формується суттєва структурна неоднорідність аустеніту, різниця в розмірах сусідніх зерен може досягати декілька разів [1; 2].

На рисунку 2 наведено залежність розміру зерна аустеніту від ступеня і температури пластичної деформації ( $\epsilon$ ). Враховуючи, що величина критичного ступеня деформації для вуглецевих сталей складає значення на рівні 6...10 % [7; 8], максимальні значення  $d_0$  відповідають умовам розвитку процесів рекристалізації для вказаного інтервалу деформацій.

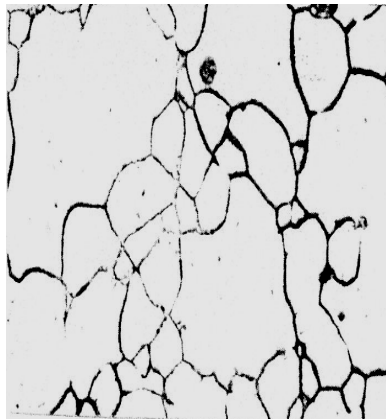
За цих умов у сталі формується структура аустеніту з дуже великими за розміром зернами й одночасно високим ступенем структурної неоднорідності. У разі підвищення ступеня пластичної деформації, незалежно від температури нагріву металу, характер зміни розміру зерна аустеніту залишається незмінним, у той час як абсолютні значення  $d_0$  визначаються великою мірою температурою нагріву [7]. Так, після гарячого характером вплив визначається і для більш високих ступенів деформації.

Таким чином, можна з упевненістю вважати, що ступінь пластичної деформації 10 % для вуглецевих сталей, які використовуються для виготовлення залізничних коліс, постає значенням, наближеним до критичної величини.

Порівняльний аналіз зміни розміру зерна аустеніту свідчить, що за відсутності витримки металу (після закінчення останньої формоутвірної деформації) збільшення ступеня обтискування від 10 до 32 % за температури 950 °С супроводжується зменшенням  $d_0$  на 20 мкм. Для більш високих температур нагріву 1 100 і 1 150 °С зростання розміру зерна аустеніту прискорюється.



а (× 100)



б (b) (× 100)

Рис. 1. Типова структура аустеніту залежно від температури нагріву (а – 950 °С, б – 1 000 °С) вуглецевої сталі / Fig. 1. The typical structure of austenite depending on the temperature of the heating (a – 950 °C, b – 1 000 °C) of carbon steel

Для вказаного інтервалу температур обтискування на величину 10 % у разі підвищення температури деформації вуглецевої сталі від 950 до 1 150 °С спостерігається збільшення  $d_0$  від 60 до 110 мкм відповідно (рис. 2). Аналогічний за приріст  $d_0$  складає значення 80 і 90 мкм відповідно (рис. 2).

З метою оцінювання ступеня впливу температури і величини гарячої пластичної деформації вуглецевої сталі на розмір зерна аустеніту, для спрощення апроксимуємо експоненціальну залежність  $d_0 = f(\epsilon)$  прямою лінією.

Кутовий коефіцієнт співвідношення ( $d_0 = f(\epsilon)$ ), який позначимо  $dd_0/d_\epsilon$ , дозволить визначити ступінь залежності  $d_0$  від величини гарячої деформації за конкретної температури обтискування.

За відсутності витримки металу після завершення пластичної деформації для температур 950, 1 100 і 1 150 °С величина  $dd_0/d_\epsilon$  складала значення 0,8; 2,0 і 2,25 мкм/% відповідно.

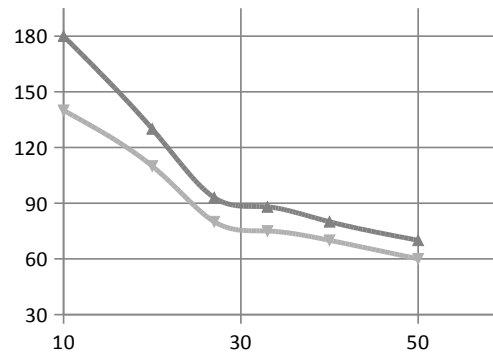


Рис. 2. Вплив ступеня і температури гарячого обтискування (◆ – 950 °С; ■ – 1 100 °С; ▲ – 1 150 °С) на розмір зерна аустеніту / Fig. 2. Influence of the degree and temperature of hot compression (◆ – 950 °C; ■ – 1 100 °C; ▲ – 1 150 °C) on the grain size of austenite

Проведеним оцінюванням можна визначити, що швидкість зменшення розміру зерна аустеніту у разі одиничного зростання деформації лише за підвищення температури обтискування на 150 °С (від 950 до 1 100 °С) зростає приблизно в 2...2,5 раза. Для температури 1 150 °С вказана характеристика набуває ще вищого рівня значень.

За відсутності паузи після завершення гарячого обтискування можна вважати, що характер зміни розміру зерна великою мірою визначається розвитком динамічних структурних перетворень під час самого обтискування. Аналіз залежності  $dd_0/d_\epsilon$  для різних інтервалів ступенів обтискування свідчить, що у разі зменшення величини гарячої деформації чутливість до зміни температури збільшується. Так, за умов обтискування на ступінь 10 % за температур 950, 1 100 і 1 150 °С величина  $d_0$  складає значення 60, 140 і 180 мкм відповідно (рис. 2). Пропорційно збільшенню  $\epsilon$  різниця в розмірах зерна аустеніту зменшується.

Таким чином, незначне зниження температури гарячого обтискування за ступенів деформації до 10 % дозволить суттєво зменшити розмір зерна аустеніту, отож слід очікувати позитивного впливу на комплекс властивостей вуглецевої сталі, у тому числі після різноманітних термічних обробок зміцненням. Враховуючи, що технологічно достатньо складно здійснити прискорене охолодження елементів залізничного колеса зразу після завершення гарячої деформації (без витримки металу після її завершення), становить певний інтерес оцінювання характеру зміни розміру зерна аустеніту залежно від тривалості витримки металу після завершення обтискування.

На рисунку 3 показано залежність розміру зерна аустеніту від ступеня пластичної деформації і витримки металу тривалістю 1 хв після закінчення деформації. Аналіз характеру співвідношення  $d_0 - \epsilon$  для досліджуваного інтервалу температур гарячого обтискування вказує на його незмінність. З іншого боку, порівняльний аналіз із кінетикою процесу

рекристалізації аустенітної структури за відсутності паузи після завершення деформації, має деякі відмінності. Справа в тому, що до внеску в загальну картину структурних перетворень за гарячого обтискування від процесів динамічної рекристалізації (відсутність паузи після деформації) повинен бути обов'язковий внесок від розвитку рекристалізації за статичних умов [4; 5; 8; 9]. Результат сумарного впливу на розмір зерна аустеніту від розвитку процесів структурних перетворень за обтискування і за термін витримки металу 1 хв, залежно від температури і ступеня пластичної деформації наведено на рисунку 3.

Так, із порівняльного аналізу абсолютних значень розміру зерна аустеніту (рис. 2, 3) можна з'ясувати цілком очікуване збільшення  $d_0$  за всіх температур і ступенів деформації під час паузи тривалістю 1 хв після завершення обтискування. З іншого боку, використання величини  $dd_0/d_\varepsilon$  дає змогу оцінити вплив після деформаційної витримки (тривалість 1 хв) на кінетику розвитку процесів рекристалізації аустеніту. За 1 хв, після завершення гарячої деформації за температур 950, 1 100 і 1 150 °C відбувається, на фоні незначного підвищення середнього розміру зерна аустеніту, суттєве зниження різниці між максимальними (за  $\varepsilon = 10\%$ ) і мінімальними (за  $\varepsilon = 40\ldots 50\%$ ) значеннями  $d_0$ . Значення величини  $dd_0/d_\varepsilon$  – додаткове підтвердження наведеного положення.

Так, у разі підвищення температури гарячого обтискування для вказаного температурного інтервалу кутовий коефіцієнт залежності  $d_0 = f(\varepsilon)$  для металу з витримкою після завершення деформації 1 хв дорівнює 1,6; 1,5 і 2,0 мкм/%.

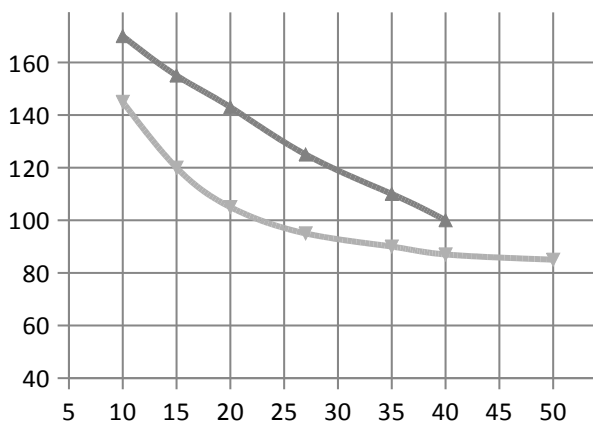


Рис. 3. Вплив ступеня і температури гарячого обтискування (♦ – 950; ■ – 1 100; ▲ – 1 150 °C) на  $d_0$  після витримки тривалістю 1 хв. / Fig. 3. Influence of the degree and temperature of hot compression (♦ – 950; ■ – 1 100; ▲ – 1 150 °C) after one minute excerpt

Порівняльний аналіз з аналогічними значеннями величини  $dd_0/d_\varepsilon$  для металу без витримки вказує на досягнення деякого вирівнювання структури аустеніту після відповідних ступенів гарячої деформації.

Подальше збільшення часу витримки металу після завершення деформації до 1,5 хв зумовило збільшення розміру зерна аустеніту лише для температури обтискування 950 °C (рис. 4). Для більш високих температур гарячої деформації максимальні значення (за  $\varepsilon = 10\%$ ) і мінімальні (за  $\varepsilon = 40\ldots 50\%$ ) залишаються практично незмінними (рис. 2–4). Отож, можна вважати, що для температури обтискування 950 °C починаючи від ступеня деформації 20 % і більше розвиток процесів динамічної і статичної рекристалізації (за термін витримки до 1,5 хв) практично завершується. У 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 ступеня деформації зсувається у бік більш малих величин. Так, для температури 1 100 °C ступеня деформації 15 % вже достатньо для практично повного завершення процесів збіркової рекристалізації аустеніту. Розмір зерна залишається малозалежним від температури гарячого обтискування (рис. 2–4) і визначається тільки впливом від ступеня деформації.

На підставі отриманих результатів можна очікувати, що після завершення останньої формоутвірної пластичної деформації під час виготовлення залізничного колеса за термін витримки до 1,5 хв зростання розміру зерна аустеніту не буде суттєвим (рис. 4).

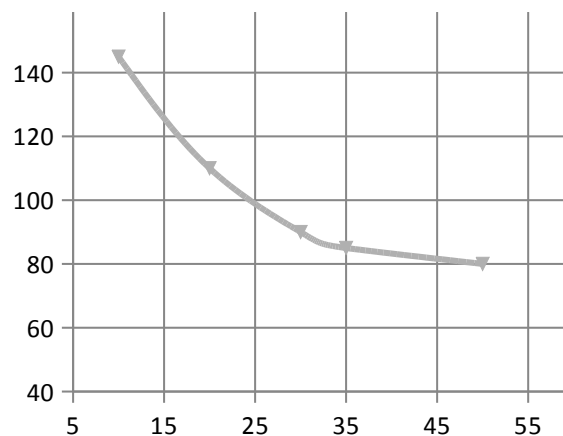


Рис. 4. Залежність середнього розміру зерна аустеніту від ступеня, температури гарячої деформації (♦ – 950; ■ – 1 100 °C) і витримки металу тривалістю 1,5 хв / Fig. 4. Dependence of the average grain size of austenite on the degree, temperature of hot deformation (♦ – 950; ■ – 1 100 °C) and time pause of 1.5 minutes

Після вказаної витримки, якої повинно вистачити для передачі колеса на пристрій охолодження, прискореним охолодженням буде припинено подальше зростання  $d_0$ .

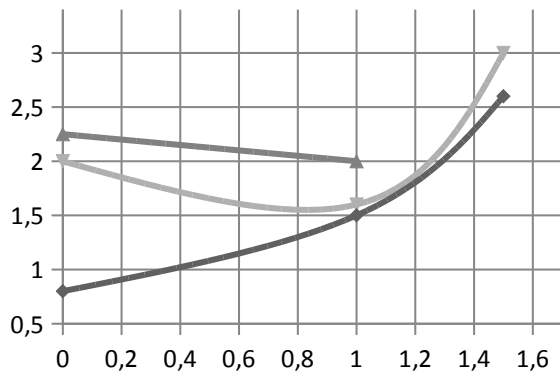


Рис. 5. Залежність  $dd_0/d_\epsilon$  від тривалості витримки і температури гарячого обтискування (♦ – 950, ■ – 1110, ▲ – 1150 °C) / Fig. 5. Dependence  $dd_0/d_\epsilon$  on the pause and the temperature of hot compression (♦ – 950, ■ – 1110, ▲ – 1150 °C)

Унаслідок цього, структурні перетворення в процесі прискореного охолодження залізничного колеса будуть відбуватися в металі з попередньо збереженою структурою подрібненого зерна аустеніту. Додаткового ефекту зміцнення металу слід очікувати від часткового збереження гарячого наклепу аустеніту і його впливу на процеси фазового перетворення під час прискореного охолодження.

Таким чином, з аналізу отриманих залежностей можна стверджувати, що за термін тривалості післядеформаційної витримки 1,5 хв розвиток процесів динамічної і статичної рекристалізації зростання зерна аустеніту буде не значним. Для більшості виробів, що виготовляються гарячим пластичним деформуванням, вказаної витримки

достатньо, щоб зберегти частково гарячий наклеп аустеніту перед прискореним охолодженням за термічного зміцнення.

### Наукова новизна

На основі аналізу внутрішньої будови вуглецевої сталі залежно від параметрів гарячого обтискування визначено вплив тривалості витримки після завершення деформації на характер зміни розміру зерна аустеніту. Зменшення ступеня гарячої деформації сприяє підвищенню впливу температури обтискування на дисперсність аустенітної структури.

### Практична цінність

Визначена характеристика впливу ступеня, температури гарячого обтискування і тривалості витримки після завершення деформації може бути використана для удосконалення режимів високотемпературних формувальних операцій вуглецевих сталей.

### Висновки

1. Диспергування структури аустеніту під час виготовлення суцільнокатаних залізничних коліс може бути досягнуте за рахунок зниження температури гарячого обтискування або її перерозподілу таким чином, щоб збільшити ступінь деформації на останніх етапах виготовлення.
2. Тривалості витримки 1,5 хв, після закінчення обтискування за температури 950 °C, достатньо для збереження частки гарячого наклепу аустеніту вуглецевої сталі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дефекти залізничних коліс : монографія / [І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв, М. А. Грищенко та ін.]. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2009. – 112 с.
2. Трошенко В. Т. Влияние цикличности нагружения на характеристики трещиностойкости сталей / В.Т. Трошенко, В. В. Покровский, Ю. С. Скоренко и др. // Проблемы прочности. – 1980. – № 11. – С. 3–10.
3. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали : монография / [И. А. Вакуленко, В. И. Большаков]. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
4. Деформационное старение стали : монография / [В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков]. – Москва : Металлургия, 1972. – 320 с.
5. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – Москва : Металлургия, 1977. – 431 с.
6. Данченко Н. И. Зависимость усталостной прочности и ударной вязкости колесной стали от ее структурного состояния / Н. И. Данченко, О. Н. Перков, Т. А. Гладкова // Теория и практика термической обработки проката. – Москва : Металлургия, 1984. – С. 43–45.
7. Вакуленко І. О. Залежність властивостей металу обода суцільнокатаного залізничного колеса від умов гарячого обтискування / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, Ю. Г. Чабак // Университетская наука–2015 : сб. матер. междунар. науч.-техн. конф. – Мариуполь, 2015. – С. 127–129.
8. Вакуленко І. О. Вплив температури і величини гарячої пластичної деформації на розмір зерна аустеніту сталі суцільнокатаного залізничного колеса / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, Д. М. Болотова // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра : матер. XIII Всеукр. наук.-практ. конф. – Київ : КПІ, 2015. – С. 184–191.
9. Ефременко В. Г. Кинетика превращения аустенита в рельсовых сталях марок М74 и 75ХГСМ при непрерывном охлаждении / В. Г. Ефременко, Ф. К. Ткаченко, С. О. Кузьмин и др. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 198–201.

### REFERENCES

1. Vakulenko I.O., Anofriev V.G., Gritszenko M.A. and oth. *Defekti zaliznichnikh kolis* [Defects of the railway wheels]. Dnipropetrovsk : Makovetskiy, 2009, 112 p. (in Ukrainian).

2. Troszhenko V.T., Pokrovskiy V.V., Skorenko Yu.S. and oth. *Vliyanie ciklichnosti nagruzheniya na kharakteristiki trethinostoykosti staley* [Effect of cyclic loading on the characteristics of crack resistance of steels]. *Problemi prochnosti* [Strength problems]. 1980, no. 11, pp. 3–10. (in Russian).
3. Vakulenko I.A. and Bolshakov V.I. *Morfologiya struktur i deformatsionnoe uprochnenie stali* [Morphology of structure and strain hardening of steel]. Dnipropetrovsk : Makovetskiy, 2008, 196 p. (in Russian).
4. Babich V.K., Gulj Yu.P. and Dolzhenkov I.Ye. *Deformatsionnoe starenie stali* [Deformation aging of steel]. Moscow : Metallurgiya, 1972, 320 p. (in Russian).
5. Bernshteyn M.L. *Struktura deformirovannikh metallov* [Structure of deformed metals]. Moscow : Metallurgiya, 1977, 431 p. (in Russian).
6. Danchenko N.I., Perkov O.N. and Gladkova T.A. *Zavisimostj ustalostnoy prochnosti i udarnoy vyazkosti kolesnoy stali ot ee strukturnogo sostoyaniya* [Dependence of fatigue strength and toughness of wheeled steel on its structural state]. *Teoriya i praktika termicheskoy obrabotki prokata* [Theory and practice of heat treatment of rolled metal]. Moscow : Metallurgiya, 1984, pp. 43–45. (in Russian).
7. Vakulenko I.O., Perkov O.M. and Chabak Yu.G. *Zalezhnistj vlastivostey metalu obodu suciljnokatanogo zaliznichnogo kolesa vid umov garyachogo obtiskuvannya*. Mariupol', 2015, pp. 127–129. (in Ukrainian).
8. Vakulenko I.O., Perkov O.M. and Bolotova D.M. *Vpliv temperaturi i velichini garyachoi plastichnoi deformacii na rozmir zerna austenitu stali suciljnokatanogo zaliznichnogo kolesa* [Influence of temperature and size of hot plastic deformation on the grain size of austenite steel of a fully coiled railway wheel]. *Specialjna metalurgiya: vchera, sjogodni, zavtra* [Special Metallurgy: yesterday, today, tomorrow]. Kyiv, KPI, 2015, pp. 184–191. (in Ukrainian).
9. Efremenko V.G., Tkachenko F.K., Kuzjmin S.O. and oth. *Kinetika prevratheniya austenita v reljsovihkh stalyakh marok M74 i 75KhGSM pri neprerivnom okhlazhdenii* [Kinetics of transformation of austenite in rail steels of M74 and 75XGSM grades under continuous cooling]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo Natsionalnogo universitetu zaliznychnogo transportu im. akad. V. Lazaryana*. [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after acad. V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, 2009, vol. 29, pp. 198–201. (in Russian).

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. А. Заблудовським (Україна), д-ром техн. наук, доц. В. М. Волчуком (Україна).*

Надійшла до редакції 13.01.2018

Прийнята до друку 20.01.2018