

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.785:669.15-194.2

© Ткаченко І.Ф.¹, Ткаченко Ф.К.², Ткаченко К.І.³,
Мірошніченко В.І.⁴

ВПЛИВ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПРИ НАГРІВАННІ ТА ОХОЛОДЖЕННІ НА СТРУКТУРИ І СПРОТИВ УДАРНОМУ РУЙНУВАННЮ ЛЕГОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Досліджували леговані конструкційні сталі: 35ХМЛ у щойно литому та Е36 і 30ХГСА у щойно гаряче деформованому станах. Показано можливість досягнення повної перебудови відповідних початкових мікроструктур в сталях 35ХМЛ та Е36, в той час як в сталі 30ХГСА помітні зміни мікроструктури в аналогічних умовах не відбуваються. Встановлено значне підвищення спротиву ударному руйнуванню, не менше ніж вдвічі, сталей Е36 і 35ХМЛ та практична незмінність цієї характеристики сталі 30ХГСА після оптимальних умов охолодження за розробленим режимом. Встановлено формування високо однорідних мікроструктур із збільшеним розміром зерна в сталях Е36 і 35ХМЛ після термічної обробки, що включає до себе ізотермічну витримку за оптимальних умов під час нагрівання для високотемпературної аустенізації.

Ключові слова: леговані конструкційні сталі, фазові перетворення при нагріванні та охолодженні, щойно литий структурний стан, щойно гаряче деформований стан, розмір зерна, подрібнення мікроструктури, спротив ударному руйнуванню.

Ткаченко И.Ф., Ткаченко Ф.К., Ткаченко К.И., Мирошниченко В.И. Влияние особенностей фазовых превращений при нагреве и охлаждении на структуры и сопротивление ударному разрушению легированных конструкционных сталей. Исследовали легированные конструкционные стали: 35ХМЛ в литом и Е36, 30ХГСА в горячедеформированном состояниях. Показана возможность полной перестройки исходных микроструктур в сталях 35ХМЛ и Е36, в то время как в стали 30ХГСА заметные изменения микроструктуры в аналогичных условиях не происходят. Установлено значительное повышение сопротивления ударному разрушению, не менее чем вдвое, для сталей Е36 и 35ХМЛ и практическая неизменность этой характеристики стали 30ХГСА после охлаждения по разработанному режиму. Показано формирование высоко однородных микроструктур с повышенным размером зерна в сталях Е36 и 35ХМЛ после термической обработки, которая включает в себя изотермическую выдержку при оптимальных условиях во время нагревания для высокотемпературной аустенитизации.

Ключевые слова: легированные конструкционные стали, фазовые превращения при нагреве и охлаждении, литое и горячедеформированное структурные состояния, размер зерна, измельчение микроструктуры, сопротивление ударному разрушению.

I.F. Tkachenko, F.K. Tkachenko, K.I. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko. Effects of the phase transformation in alloy structural steels at heating and cooling on their microstructure and impact resistance. The effects of the revealed phase transformation in alloy steels during isothermal soaking either at heating or cooling on their microstructures and impact resistance were experimentally investigated. The alloy Steel 35HML in as

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, м. Маріуполь

³ канд. техн. наук, м. Київ

⁴ асистент, ДВНЗ «Приазовський технічний університет», м. Маріуполь

cast state as well as Steel E36 and Steel 30HGSA both in as hot rolled state were used for the research. Grain size refinement as well as elimination of the typical micro- and meso-structural nonuniformities, formed in the just crystallized and just hot deformed steels, was reached as a result of optimal isothermal soaking during the subsequent cooling. practically full restructuring of the initial steel states is shown for Steel E36 and Steel 35HML meanwhile in Steel 30HGSA visible microstructure changes do not take place under the above mentioned heat treatment conditions. Considerable, not less than 2 fold increase in impact resistance of Steel E36 and Steel 35HML is also reached as a result of optimal heat treatment, contrary to Steel 30HGSA where the resistance is practically constant. Formation of highly homogeneous microstructures but having however increased grain size is reached in Steel E36 and Steel 35HML after the proposed heat treatment, which includes isothermal soaking during austenitizing heating. The effects observed in the investigated steels as a result of the proposed heat treatment were explained in terms of the grain and dislocation subgrain boundary influences on chemical element diffusional redistribution between the structure components and new phase nucleation process. The specific behavior of Steel 30HGSA was attributed to the silicon influence on the above processes.

Keywords: *alloy structural steels, phase transformations at heating and cooling, as cast structural state, as hot rolled condition, grain size, microstructure refinement, impact resistance.*

Постановка проблеми. Головні закономірності фазових перетворень (ФП) при нагріванні та охолодженні сталей вважаються такими, що є детально вивченими та добре відомими з багатьох робіт. Головними джерелами відомостей про вказані перетворення є діаграми відповідних ФП в ізотермічних умовах або під час безперервної зміни температур. Проте в низці робіт [1, 2] показано в загальному вигляді, що за умов ізотермічної витримки при певних температурах в легованих сталях як при нагріванні, так і під час охолодження, є можливим утворення високодисперсних мікроструктур з однорідним просторовим розподіленням структурних складових специфічної морфології, а також хімічних елементів. Проте на теперішній час відсутнє точне визначення особливостей вказаних структурних станів для литих та гарячедеформованих конструкційних сталей в умовах окремо охолодження та нагрівання, а також вплив цих особливостей на спротив сталей ударному руйнуванню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування в сталях дисперсних та однорідних мікроструктур залишається важливою невирішеною проблемою металознавства протягом тривалого часу. На теперішній час запропоновано декілька підходів до її вирішення [3-5], які передбачають використання достатньо складних технологій попередньої обробки сталей, у зв'язку з чим вони не отримали промислового застосування. Обнадійливі перспективи вирішення вказаної проблеми пов'язані з застосуванням певних умов нагрівання та охолодження сталей [1, 2, 6], що забезпечують утворення кристалів нових фаз у всіх потенційних центрах їхнього зародження. Однією з важливих переваг такого підходу, який й було застосовано у поточній роботі, є можливість його широкого застосування за діючих промислових умов до широкого кола існуючих сталей.

Мета роботи. Визначити особливості структурних станів та спротиву ударному руйнуванню, що формуються за оптимальних, раніше встановлених, умов нагрівання та охолодження в гаряче деформованих та литих легованих конструкційних сталях.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили з використанням заготовок ударних зразків зі сталей 35ХМЛ, Е36 та 30ХГСА розмірами 15×15×55 мм. Попередня обробка всіх заготовок полягала у відпалі при $T_B = 1100^\circ\text{C}$, 40 хв. з охолодженням у печі. Мікроструктури досліджених сталей до та після відпалу показано на рис. 1. Подальша обробка виконувалась за двома режимами відповідно до схем, наведених на рис. 2. Температури та тривалості вказаних ізотермічних витримок є об'єктами «know how» і були встановлені згідно з результатами робіт [1, 2] задля отримання найбільш сприятливих мікроструктур в досліджених сталях. Охолодження заготовок здійснювалось повільніше, ніж на повітрі, для наближення його умов до промислових показників. Світлини мікроструктур після термічної обробки за різними режимами наведено на рис. 3, 4 та 5.

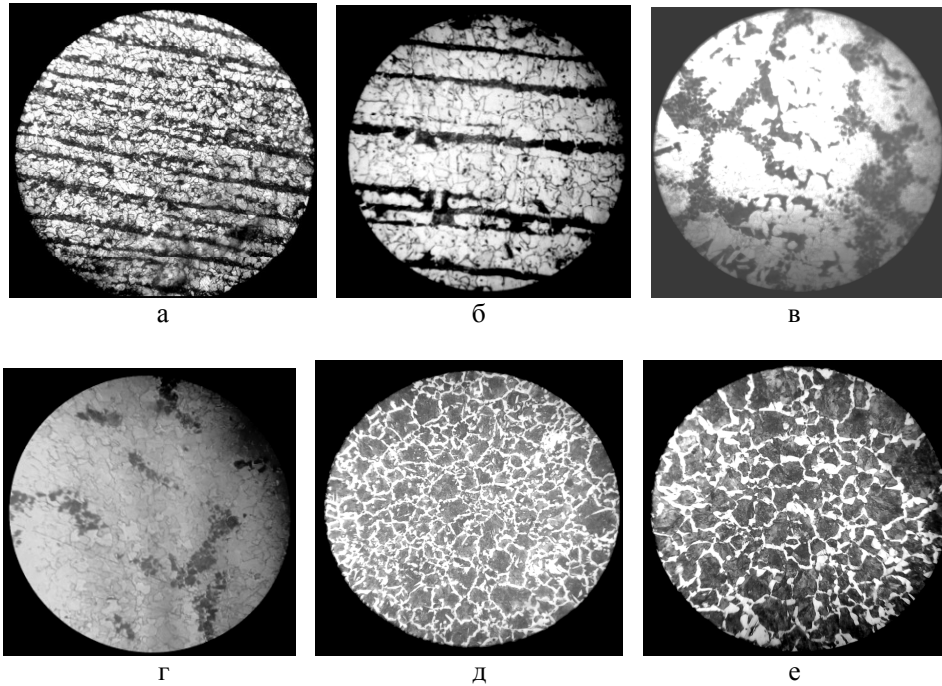


Рис. 1 – Мікроструктури досліджених зразків сталей Е36 (а, б), 35ХМЛ (в, г) та 30ХГСА (д, е) до (а, в, д) та після (б, г, е) високотемпературного відпалу (див. текст); $\times 100$

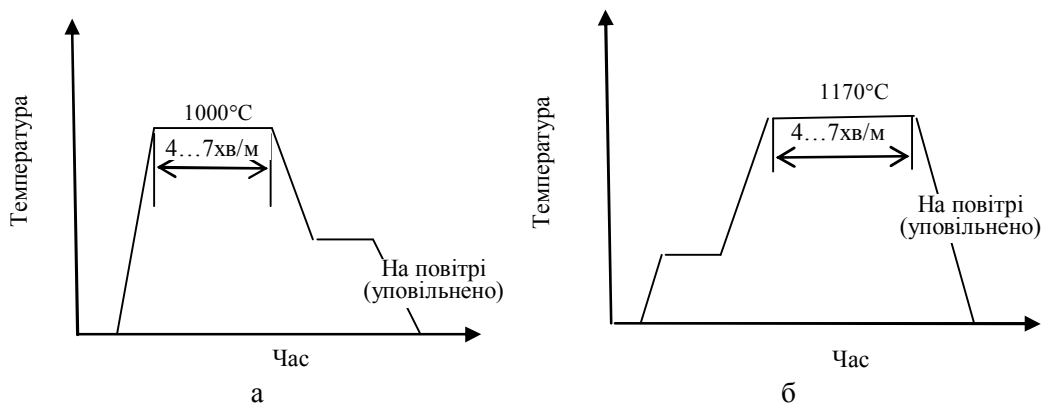


Рис. 2 – Схеми випробуваних в роботі режимів термічної обробки для формування сприятливих мікроструктур в досліджених сталях: а – при охолодженні; б – при нагріванні

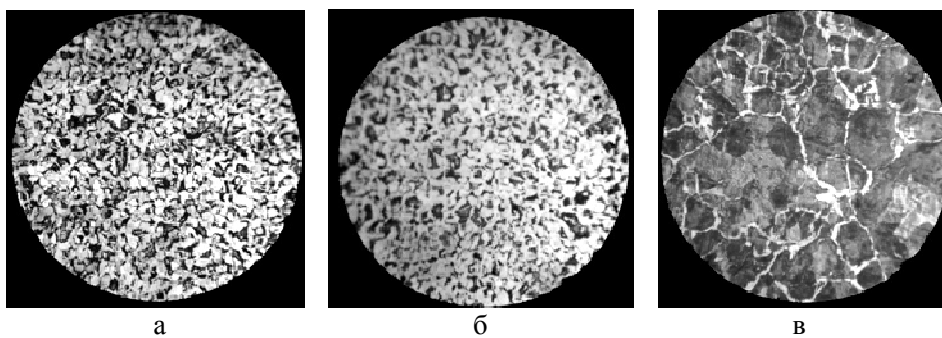


Рис. 3 – Мікроструктури досліджених сталей після термічної обробки за режимом, наведеним на рис. 2, а: а – сталь Е36; б – сталь 35ХМЛ; в – сталь 30ХГСА; $\times 200$

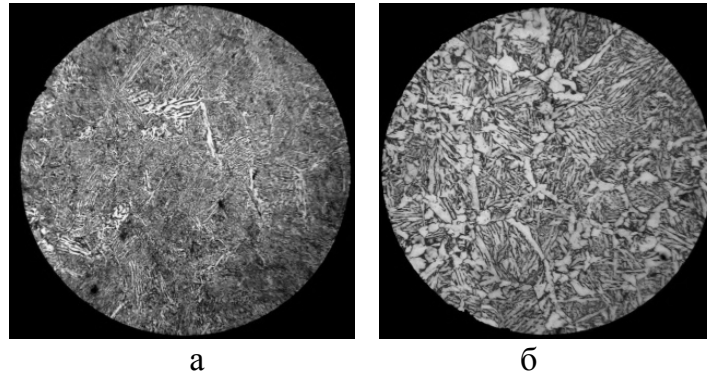


Рис. 4 – Мікроструктури досліджених сталей після термічної обробки за режимом, наведеним на рис. 2, б: а – сталь Е36; б – сталь 35ХМЛ; $\times 200$

Як можна бачити з рис. 1, мікроструктури як гаряче деформованої (Е36), так і литої (35ХМЛ) сталей, до та після високотемпературної аустенізації за відомим режимом відпалу зберігають свої характерні особливості, до яких належать, перш за все, вкрай неоднорідний просторовий розподіл структурних складових (фериту та колоній перлітоподібних структур). У

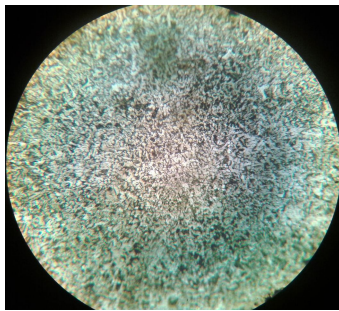


Рис. 5 – Мікроструктура сталі 35ХМЛ після оптимізованої термічної обробки; $\times 200$

випадку сталі Е36 такий розподіл має вигляд «смуг», в той час як в сталі 35ХМЛ спостерігаються великі ділянки, що складаються із значної кількості феритових зерен в оточенні «мережі» перлітових колоній. Мікроструктура сталі 30ХГСА включає до себе великі за розміром (№ 5-6 за ASTM G) колонії перлітоподібних структур з безперервною, значною завтовшки, феритовою мережею.

Рис.3 засвідчує суттєвий вплив ізотермічної витримки під час охолодження на структурний стан сталей Е36 та 35ХМЛ, але практичну відсутність такого впливу у випадку сталі 30ХГСА. Як можна бачити, у всіх випадках структури являють собою ферито-перлітові суміші. При цьому в сталях Е36 та 35ХМЛ спостерігаються практично ідентичні мікро-

структури, в яких розміри феритових зерен та колоній перлітоподібних структур, відповідно, практично співпадають і становлять № 9-10 за ASTM G. Характерною особливістю цих структур є виключно однорідний просторовий розподіл структурних складових, на відміну від початкових структурних станів (див рис. 1). Особливо слід підкреслити їхню ідентичність за практично усіма ознаками, яка досягається після проведеної термічної обробки, незважаючи на вкрай суттєві відмінності цих сталей за хімічним складом, методом виготовлення заготовок досліджених зразків (лиття та гаряча прокатка), початковими структурами (чарункова, смугаста) та характером просторових розподілів хімічних елементів внаслідок дендритової ліквідації (ізотропний мезо-неоднорідний, анізотропний мікро-неоднорідний).

В якості важливої додаткової особливості отриманих мікроструктур слід вказати також на те, що в інтер'єрі феритових зерен підвищеного розміру спостерігаються додаткові межі, які поділяють такі зерна на декілька частин, розміри яких відповідають розмірам найдрібніших зерен в мікроструктурі. Вказані внутрішньо-фазові межі значно гірше, у порівнянні із звичайними внутрішньо- та між-фазовими поверхнями розділу кристалів, виявляються в процесі звичайного металографічного аналізу, у зв'язку з чим вони не завжди спостерігаються за малих збільшень в умовах дрібного феритового зерна. Таким чином, розмір «металографічного» зерна, що вимірюють з застосуванням стандартних методів оцінювання за існуючими шкалами, може перевищувати його фактичні значення. Отримані дані підтверджуються результатами фрактографічного аналізу, які показали, що в умовах руйнування вказаних сталей сколюванням процес має виключно внутрішньо-зерений характер, а середній розмір його фасеток є меншим за середній розмір «металографічного» зерна.

Виходячи з наведених вище даних, можна зробити висновок про практично повну регенерацію структурних станів, що утворюються у легованих конструкційних сталях на час завершення гарячої пластичної деформації або кристалізації в процесі подальшого («регенеруючого») охолодження за розробленим режимом, що включає до себе відповідну «регенеруючу» ізотермічну витримку. Вочевидь, повністю протилежного висновку слід дійти на підставі порівняльного аналізу світлин для сталі 30ХГСА після відпалу (див. рис. 1, е) та розробленої термічної обробки (див. рис. 3, в): характер мікроструктури сталі залишається однаковим після обох вказаних режимів термічної обробки. Аналогічні результати були отримані також в процесі відповідних досліджень сталі 10ХСНД.

Результати ударних випробувань досліджених сталей після відпалу та «регенеруючого» охолодження наведено в таблиці. Можна бачити суттєве підвищення спротив ударному руйнуванню у порівнянні з відпаленим станом для сталей Е36 та 35ХМЛ, особливо для останньої – більш ніж в 3 рази.

Таблиця

Значення роботи ударного руйнування (Дж) зразків з круглим надрізом від досліджених сталей після висотемпературного відпалу та термічної обробки за режимом, наведеним на рис. 2, а

Різновид термічної обробки	Марка сталі		
	Е36	30ХМЛ	30ХГСА
Відпал	178	38	56
«Регенеруюче» охолодження	351	130	67

Мікроструктури сталей Е36 та 35ХМЛ у попередньо відпаленому стані після термічної обробки за режимом, вказаним на рис. 2, б, показано на рис. 4. Як можна бачити, після такої обробки досягається формування високо однорідних мікроструктур практично рівноважної морфології без жодних ознак попередніх, вкрай неоднорідних структурних станів (див. рис. 1). Закономірним, вочевидь, є збільшений розмір колоній перлітоподібних структур внаслідок зростання аустенітового зерна в процесі завершальної високотемпературної аустенізації.

Аналіз отриманих результатів призводить до висновків про можливість практично повної регенерації початкових структур литих та гарячекатаних легованих конструкційних сталей шляхом усунення структурних та хімічних неоднорідностей в процесі ізотермічної витримки за оптимальних умов при нагріванні, а також про збереження отриманих позитивних змін структурних станів в процесі подальшої високотемпературної аустенізації. Враховуючи аналогічний вплив на структуру досліджених сталей вказаних вище ізотермічних витримок при охолодженні та нагріванні, останній процес, вочевидь, також можна визначити як «регенеруюче» нагрівання.

Додаткові дослідження показали, що шляхом оптимізації розглянутих варіантів термічної обробки досліджених сталей є можливим отримання розміру феритового зерна та колоній перлітоподібних структур на рівні №12 за ASTM G (див. рис. 5).

Отримані в роботі результати стосовно сталей Е36 та 35ХМЛ можна пояснити розвитком загального механізму [1, 2] інтенсивної дифузії карбону та легуючих елементів по межах зерен та дислокаційних субмежах аустеніту з подальшим зародженням у відповідних центрах і зростанням кристалів фериту або колоній перлітоподібних структур. В той же час, у випадку сталі 30ХГСА, виходячи з відсутності характерних мікроструктур, подібні процеси, вочевидь, розвитку не отримують, що можна пов'язати з утворенням сегрегацій сіліцію по межах зерен аустеніту.

Висновки

1. Базуючись на результатах раніше виконаного теоретичного аналізу, досліджено вплив ізотермічних витримок за оптимальних умов під час нагрівання та охолодження литих та гарячедеформованих легованих конструкційних сталей на їх структурний стан та спротив ударному руйнуванню.
2. Підтверджено формування вкрай неоднорідних мікроструктур в промислових низьколегованих сталях Е36, 35ХМЛ та 30ХГСА в стані постачання, а також після загальноприйнятого високотемпературного відпалу.
3. Встановлено формування високодисперсних, однорідних, практично ідентичних мікроструктур в сталях Е36 та 35ХМЛ, відповідно, у гарячекатаному та литому станах, після оптима-

- льних умов охолодження за розробленим режимом.
- Показано відсутність помітних змін мікроструктури сталі 30ХГСА після всіх досліджених варіантів термічної обробки.
 - Встановлено значне підвищення спротиву ударному руйнуванню, не менше ніж вдвічі, сталей Е36 і 35ХМЛ та практична незмінність цієї характеристики сталі 30ХГСА після оптимальних умов охолодження за розробленим режимом.
 - Встановлено формування високо однорідних мікроструктур із збільшеним розміром зерна в сталях Е36 і 35ХМЛ після термічної обробки, що включає до себе ізотермічну витримку за оптимальних умов під час нагрівання для високотемпературної аустенізації.

Перелік використаних джерел:

- Some features of the heterogeneous diffusive nucleation and their use to form new type microstructures and eliminate chemical nonuniformities in bulk industrial product made of alloy structural steels : scientific work / I.F.Tkachenko, K.I. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko. – Свідоцтво № 68323 від 25.10.2016.
- Вплив рівноважної дислокаційної субструктури на морфологію структурних складових при гетерогенних фазових перетвореннях у полікристалічних металевих сплавах / І.Ф.Ткаченко [та ін.] // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь. – 2016. – Вип. 33. – С. 50-57.
- Howe A.A. Ultrafine grained steels: industrial prospects / A.A. Howe // Material Science and Technology Series. – 2000. – № 16. – P. 1264-1266.
- Furuhara T. Grain boundary engineering for superplasticity in steels / T. Furuahara, T. Maki // Journal of Material Science. – 2005. – № 40. – P. 919-926.
- Superplasticity of ultrafine grained low-alloy steels / S. Fernandez [et al.] // Memoria de Trabajos de Difusion Cientifica y Tecnica. – 2012. – № 10. – P. 45-56.
- Ткаченко І.Ф. Об особенностях образования аустенита при нагреве легированных сталей / И.Ф. Ткаченко, К.И. Ткаченко // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. праць / ПДТУ. – Маріуполь. – 2002. – Вип. 12. – С. 25-27.

References:

- Tkachenko I.F., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Scientific work «Some features of the heterogeneous diffusive nucleation and their use to form new type microstructures and eliminate chemical nonuniformities in bulk industrial product made of alloy structural steels». Certificate about registration no. 68903, 2016. (Eng.)
- Tkachenko I.F., Tkachenko F.K., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Vpliv rinvovazhnoї dislokatsiinoї substrukturі na morfologіiu strukturnikh skladovikh pri geterogennikh fazovikh peretvorenniakh u polikristalichnikh metallevikh splavakh [Influence of the equilibrium dislocation substructure on the structure component morphology during the heterogeneous phase transformations in polycrystalline metallic alloys]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu – Reporter of Priazovskiy State Technical University*, 2016, no. 33, pp. 50-57. (Ukr.)
- Howe A.A. Ultrafine grained steels: industrial prospects. *Material Science and Technology Series*, 2000, no. 16, pp. 1264-1266. (Eng.)
- Furuhara T., Maki T. Grain boundary engineering for superplasticity in steels. *Journal of Material Science*, 2005, no. 40, pp. 919-926. (Eng.)
- Fernandez S., Quintana M., García J., Verdeja L., González R., Verdeja J. Superplasticity of ultrafine grained low-alloy steels. *Memoria de Trabajos de Difusion Cientifica y Tecnica*, 2012, no. 10, pp. 45-56. (Eng.)
- Tkachenko I.F., Tkachenko K.I. Ob osobennostiakh obrazovaniia austenita pri nagreve legirovannykh stalei [Some features of the austenite formation at alloy steel heating]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu – Reporter of Priazovskiy State Technical University*, 2002, no. 12, pp. 25-27. (Rus.)

Рецензент: Л.С. Малінов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 11.04.2017