

УДК 669.1.017:620.18

- Куницька І. М. канд. техн. наук, старший науковий співробітник Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут спеціальних сталей, сплавів та феросплавів (ДП «УкрНДІспецсталь»), e-mail: yaispector@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5408-2326
- Ястребова О. Я. старший лаборант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kafedra_fm@zntu.edu.ua
- Рубан В. Т. старший викладач кафедри охорони праці навколишнього середовища Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: rubanopns@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2339-1035
- Джус А. В. асистент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kafedra_fm@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6474-0732
- Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olshan@zr.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9485-4896

ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЗЕРНА АУСТЕНІТУ В КОНСТРУКЦІЙНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ

Мета роботи. Встановлення ефективних та коректних методик виявлення зеренної структури в конструкційних середньовуглецевих сталях з урахуванням рекомендацій сучасних стандартів (ДСТУ ISO, ASTM, ГОСТ) з метою достовірного визначення величини аустенітного зерна, здавання в експлуатацію металу з відомою та необхідною, згідно нормативно-технічної документації (технічних вимог, креслень), якістю.

Методи дослідження. Проведено металографічний аналіз мікроструктури та оцінювання зерна шляхом порівняння зображення, виявленого на полірованих і травлених з використанням різних хімічних реактивів мікрошліфах термopolішуваної сталі 40XH2MA-III з еталонами шкал стандартів.

Отримані результати. Дослідженнями конструкційної легованої сталі 40XH2MA-III встановлено, що найбільш ефективним реактивом, який найкраще виявляє межі вихідних аустенітних зерен в середньовуглецевих легованих сталях є стандартний реактив – насичений водний розчин пікринової кислоти. В результаті травлення у цьому реактиві формується видиме зображення зеренної структури у вигляді чіткого контрасту світлих ділянок тіла зерна та темних ліній меж зерен, що дозволяє виконати коректне порівняння структури із зображеннями еталонів на шкалах.

Наукова новизна. На прикладі термopolішуваної сталі 40XH2MA-III розглянуто шляхи з подальшого розвитку уявлень щодо вибору ефективного хімічного реактиву з метою виявлення та формування видимої, згідно вимог методичних стандартів зеренної структури в конструкційних середньовуглецевих сталях, належного і достовірного оцінювання величини аустенітного зерна з використанням еталонів шкал стандартів.

Практична цінність. Запропонована коректна методика виявлення вихідного аустенітного зерна, яка дозволяє достовірно визначити величину зерна та якість з цього параметру різних конструкційних сталей, у тому числі для виготовлення відповідальних деталей повітряних та космічних літальних апаратів.

Ключові слова: конструкційні леговані сталі, відповідальні деталі, повітряні літальні апарати, розмір аустенітного зерна, межі зерен, мікроструктура, шкали, методика, стандарти, реактиви, розчин пікринової кислоти.

Вступ

Сучасна металографія являє собою комплекс якісних і кількісних методів аналізу структури металевих матеріалів, з використанням сучасного металографічного обладнання, засобів комп'ютерної техніки та математичного оброблення експериментальних даних.

Важливим етапом металографічного дослідження мікроструктури будь-яких спеціальних сталей та сплавів з метою вивчення впливу хімічного впливу, тер-

мічної обробки на будову металу є підготування зразків. Зразок повинен адекватно відображати стан структури матеріалу. Підготовка зразка включає, насамперед, створення ідеальної дзеркальної поверхні. Наступною окремою операцією, що дозволяє виявити структури матеріала зразка, є металографічне травлення. На полірованій поверхні нетравлених зразків визначають наявність неметалевих включень, які мають забарвлення, деяких карбідів, тріщин. Але для виявлення

структурних складових, чіткого їх розташування в мікроструктурі, отримання зображення зеренної структури проводять металографічне травлення. Зазвичай операція травлення починається з вибору метода травлення (хімічне, електролітичне травлення у розчинах, іонне). Найбільш розповсюдженим є хімічне травлення. Отримання належного зображення мікроструктури в оптичному мікроскопі досягається за рахунок обрання відповідного реактиву. Травлення у розчинах полягає у зануренні зразка в обраний розчин або методом втирання реактиву за допомогою ватного тампону. Операція травлення завершується промивкою і сушінням зразка.

В представленій роботі наводяться результати з дослідження найбільш ефективного хімічного реактиву для виявлення зеренної мікроструктури конструкційних легованих сталей.

Аналіз досліджень та публікацій

Багатолітній досвід металознавчої науки з виявлення мікроструктури відображений в довідниковій літературі із зазначенням складу та кількості реактивів для травлення [1, 2]. Під час травлення полірованих металевих поверхонь хімічними реактивами відбувається диференціація структурних складових, яка є результатом неоднакової швидкості розчинення фаз та створення рельєфу. При збільшенні часу процесу хімічного травлення рельєф стає більш різко вираженим. Завдяки вибору часу травлення, концентрації реактиву можна змінювати його хімічну активність та розчинність металу та регулювати ступінь рельєфу, що забезпечить оптимальні умови спостереження виявлених об'єктів мікроструктури при заданому збільшенні. Реактиви для травлення мікроструктури досить різноманітні. Так, для одного і того ж матеріалу можуть бути використані декілька розчинів, які здатні виявити усі або ж залишити невидимими деякі структурні складові, надати їм різного кольору та ін.

Реактиви для виявлення мікроструктури не завжди можуть витравити межі зерен. Найбільш розповсюдженими реактивами, які використовуються для виявлення розміру вихідного аустенітного зерна, дрібнозернистих структур у середньовуглецевих легованих сталях та інших сталях є розчини з вмістом у складі пікринової кислоти – жовтих кристалів $(\text{NO}_2)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{OH}$ [3–12]. Ефективним також вважають змінне використання двох реактивів, один з яких містить пікринову кислоту [3]. Реактиви для витравлення границь зерен наводяться у найбільш вживаних методичних стандартах з оцінювання зерна, таких як ASTM E112, ДСТУ ISO 643:2009, ГОСТ 5639 [13–16]. Отримані зображення зеренної структури повинні забезпечити коректне порівняння розмірів зерен досліджуваного зразка металу з еталонами на шкалах, що і являє собою процедуру оцінювання зерна згідно цих стандартів. Отже, операція травлення мікрошліфа – це відповідальна операція, від якої залежить результат дослідження, контролю металу та встановлення відповідності якісних характеристик структури вимогам тех-

нічних умов, креслень, що є важливим для особливо відповідальних деталей (першої групи контролю) авіаційної та вертолітної техніки, оборонної, транспорту та інших відповідальних галузей промисловості.

Мета роботи

Основною метою цієї роботи є уточнення особливостей та розроблення коректної методики виявлення і оцінювання зеренної мікроструктури конструкційних легованих сталей на прикладі середньовуглецевої сталі 40ХН2МА-Ш.

Матеріал і методика досліджень

Досліджували зразки сталі 40ХН2МА-Ш, відібрані від матеріалу поковки та деталі «Наконечник» на половинках зразків після випробування на ударний згин при кімнатній температурі. Поковки приходили на підприємство «Мотор Січ» термічно обробленими. Режим термічної обробки у стані поставлення: нормалізація, 920 °С та відпуск при 670 °С. Термічну обробку деталі проводили в умовах термічного цеху АТ «Мотор Січ» за режимом: гартування, 850 °С, відпуск, 580 °С. Також, досліджували зразки після термічної обробки в умовах Управління Головного металурга АТ «Мотор Січ», проведеної за наступними експериментальними режимами:

- нормалізація, 920 °С, 1 год 15 хв (три рази), відпуск при 670 °С, 1 год 15 хв, повітря;

- гартування 850 °С, масло, відпуск, 620 °С, повітря.

Зеренну структуру сталі 40ХН2МА-Ш виявляли шляхом хімічного травлення. Порівнювали ефективність двох реактивів. По-перше, використовували підігрітий до 60–70 °С насичений водний розчин пікринової кислоти, тривалість травлення складала 15–20 хв. Потім травлену поліровану поверхню очищували содою, промивали під проточною водою, просушували фільтрувальним папером. Також досліджували вплив другого реактиву – проводили занурення на 3–5 с полірованої поверхні зразка у 7 %-й розчин азотної кислоти в спирті, промивали зразок під проточною гарячою водою та сушили фільтрувальним папером.

Досліджували також сталі 30ХН2ВФМА-Ш, 18ХН4МА-Ш.

Металографічні дослідження зразків проводили за допомогою спостереження зразків у оптичному мікроскопі AxioObserver D1M («Carl Zeiss») при збільшеннях 100–500 крат в умовах Бюро металографічних досліджень Управління Головного металурга АТ «Мотор Січ». Оцінювання розміру зерна відбувалося шляхом порівняння зображення поверхні травлених мікрошліфів з еталонами на шкалах 1 і 2 ГОСТ 5639.

Результати досліджень та їх обговорення

В результаті травлення в розчині пікринової кислоти та наступним оглядом всієї травленої поверхні зразків сталі 40ХН2МА-Ш встановлено, що відбулося виявлення зеренної структури (рис. 1). В металографічному мікроскопі спостерігали чіткі темні меж зерен

на фоні більш світлого тіла аустенітного зерна. Отримана картина відповідає зображенням зерен стандартної шкали 1 ГОСТ 5639 (рис. 2), також основним вимогам стандартів з оцінювання зерна, а саме – оцінювання зерна проводиться на зображеннях з видимими межами зерен [14–16]. Порівняння виявленої структури з еталонними зображеннями шкали 1 ГОСТ 5639 дозволило оцінити величину зерна такою, що відповідає номеру 8–9, тобто середній діаметр зерна дорівнює 15–22 мкм.

Ефективність травлення у використаному реактиві корелює із рекомендаціями стандартів з металографічного методу оцінювання зерна середньовуглецевих сталей. Так, успіх використання пікринової кислоти насамперед залежить від наявності фосфору у

сталі (не менше 0,005 % Р). Результати травлення можна покращити відпусканням сталі для виділення атомів фосфору на межі зерен. Досліджувана в представленій роботі сталь 40ХН2МА-Ш, отримана методом шлакового переплаву, є достатньо чистою за фосфором, вміст якого в хімічному складі, все ж таки, достатній для декорування меж зерен загартованого та відпущеного мартенситу. Отже, використання пікринової кислоти для сталі 40ХН2МА-Ш виявилось ефективним з огляду на створення дефектної структури меж зерен – за рахунок викривлення кристалічної ґратки дислокаціями та розташування у цих ділянках атомів фосфору.

Навпаки, травлення зразків сталі 40ХН2МА-Ш в 7 %-му розчині азотної кислоти не призвело до виявлення зеренної структури, межі зерен залишилися невидимі (рис. 3).

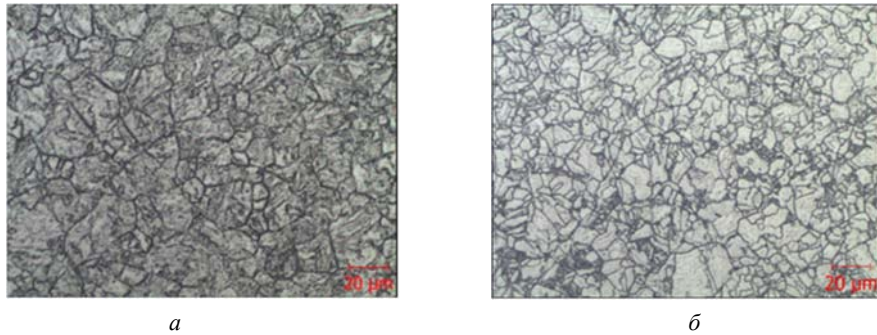


Рисунок 1. Аустенітне зерно в сталі 40ХН2МА-Ш: гартування, 850 °С, відпуск 580 °С (а), нормалізація, 920 °С, 1 год 15 хв (три рази), відпуск, 670 °С, 1 год 15 хв, повітря (б). Травлення в насиченому розчині пікринової кислоти, $\times 500$

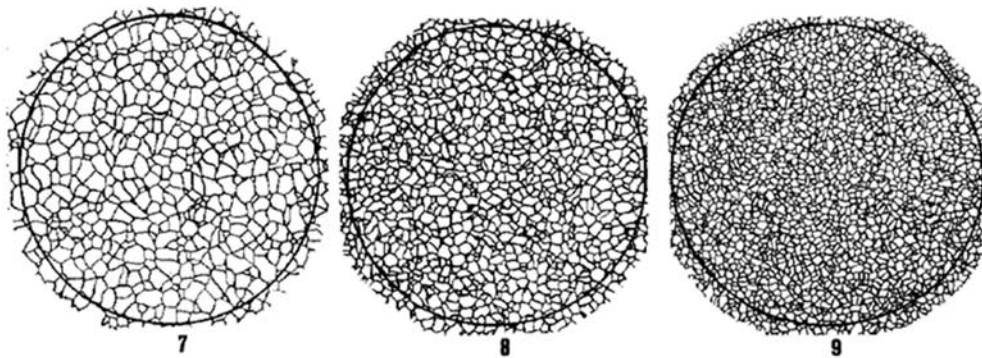


Рисунок 2. Зображення зерна з номером 7–9 на еталонах шкали 1 ГОСТ 5639-82, $\times 100$

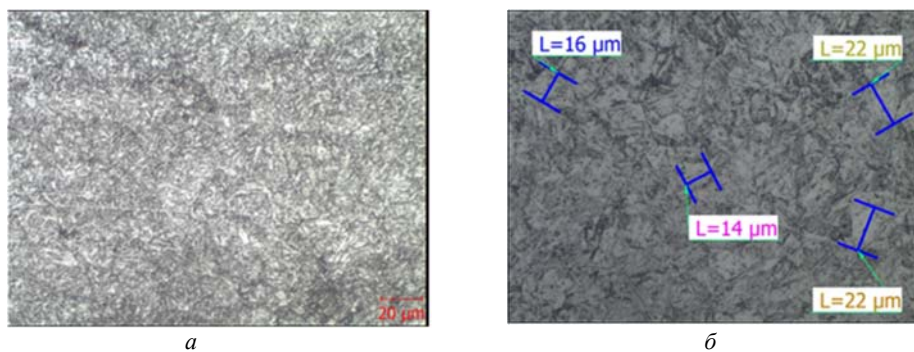


Рисунок 3. Мікроструктура в сталі 40ХН2МА-Ш після травлення в 7 %-му розчині азотної кислоти (зерна та межі зерен не виявлені), $\times 500$

Таким чином, отримані результати підтверджують відомі дані, що розчин азотної кислоти добре виявляє мікроструктуру з відпущеним мартенситом та не витравлює межі зерен в середньовуглецевих сталях. Межі зерен в мартенситній структурі при спостереженні в мікроскопі залишаються невидимі. У цьому разі неможливо виконати належне оцінювання розміру зерна, оскільки відсутня можливість порівняти отримане зображення з еталонами на стандартних шкалах.

Слід зазначити, що деякі дослідники вважають травлення в розчині пікринової кислоти досить тривалим і використовують травлення в розчині азотної кислоти, в результаті, зерно залишається невидимим. Нажаль, оцінювання розміру такого невидимого зерна проводять, необгрунтовано, вимірюванням довжини будь-якої голки мартенситу. Вважають, що розмір мартенситної голки відповідає розміру зерна. Але ж дисперсність мартенситу не завжди характеризує розмір зерна. Наприклад, дрібнодисперсний мартенсит може утворитися на фоні розвинутої субструктури в крупному зерні, наприклад, після гарячої регульованої де-

формації. З металографічної точки зору, описане оцінювання є некоректним, особливо у випадку здавального контролю відповідальних деталей, а результати «оцінювання» не можна вважати достовірними.

Необхідно відмітити, що спеціальне травлення в розчині пікринової кислоти, показало ефективність для виявлення меж зерен в інших легованих сталях, наприклад 30X2H2BFMA-Ш (рис. 4), 30XГСНА, 42ХНМА [3, 6].

Як показано в роботі [3], для низьковуглецевих сталей та сплавів, наприклад МЖ, виявлення меж зерен фериту краще відбувається після багатократного полірування і травлення в суміші з двох частин соляної кислоти HCl і однієї частини H₂O₂ (рис. 5a). Аустенітне ж зерно у сплаві МЖ виявляли методом окислення.

На зображеннях рис. 5 чітко спостерігаються витравлені темні межі феритних і аустенітних зерен.

В даній роботі встановлено, що для виявлення аустенітного зерна в сталі 18X2H4MA-Ш ефективним є травлення у розчині азотної кислоти.

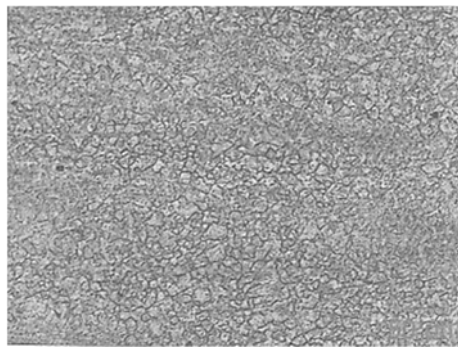
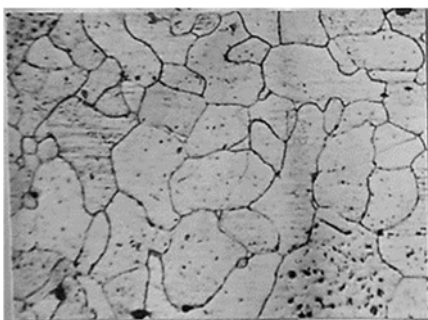
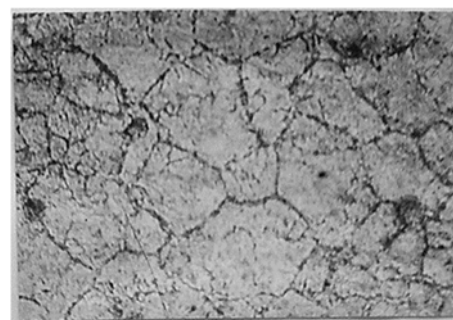


Рисунок 4. Зображення аустенітного зерна в сталі 30X2H2BFMA-Ш після гартування та низького відпуску, травлення в насиченому розчині пікринової кислоти, $\times 100$



a



б

Рисунок 5. Феритне зерно в сплаві МЖ (*a*), аустенітне зерно в сталі 30XГСНА (*б*), $\times 500$ [3]

Отже, отримані практичні результати металографічного дослідження сталей 40ХН2МА-Ш, 30X2H2BFMA-Ш, також 30XГСНА, 42ХНМА тісно корелюють з наведеною в стандартах ГОСТ 5639, ДСТУ ISO 643:2009 металографічною методикою оцінювання величини вихідного аустенітного зерна. Доведено успішність використання розчину пікринової

кислоти для створення видимого зображення меж зерен в термополішуваній середньовуглецевій сталі 40ХН2МА-Ш. Ефективність реактиву (його хімічна активність, швидкість розчинення структурних складових) залежить від хімічного складу сталі та покращується відпусканням після гартування згідно рекомендацій методичних стандартів.

Висновки

1. На основі попереднього багатолітнього досвіду з вивчення впливу хімічних розчинів на виявлення зеренної структури, рекомендацій стандартів з вибору реактивів та за результатами даної роботи встановлено, що для витравлення і формування видимого зображення меж вихідних аустенітних зерен у середньовуглецевих конструкційних сталях найбільш ефективним є водний розчин пікринової кислоти.

2. Успішність використання розчину пікринової кислоти для створення видимого зображення меж аустенітних зерен в термополіпшуваних легованих сталях залежить від хімічного складу сталі і покращується термічною обробкою.

3. Застосування рекомендованого ГОСТ 5639, ДСТУ ISO 643:2009 та іншими сучасними стандартами розчину пікринової кислоти робить видимим зображення зеренної структури в сталі 40ХН2МА-Ш та можливим оцінювання величини вихідного аустенітного зерна шляхом порівняння зображення з еталонами шкал. Результати оцінювання з позицій металографії у цьому випадку можна вважати достовірними.

4. Оцінювання величини вихідного аустенітного зерна, проведене в роботі для сталі 40ХН2МА-Ш з використанням запропонованої методики дозволяє достовірно визначити якість конструкційної сталі з цього параметру, що є особливо важливим для виготовлення відповідальних деталей повітряних та космічних літальних апаратів.

Список літератури

1. Металлографія заліза. Основи металлографії (с атласом мікрофотографій) / Под ред. Ф. Н. Тавадзе. – М.: Металлургия, 1972. – 240 с.
2. Металлографические реактивы [Текст]. Справочник: Коваленко В. С. – М.: Металлургия, 1970. – 133 с.
3. Спектор Я. И. Склонность стали к хрупкому разрушению в связи с состоянием альфа-фазы [Текст]: дисс. ... кандидата техн. наук / Я. И. Спектор. – М., 1965. – 131 с.
4. Wang J. Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Q1030 Steel. Materials Sciences and Applications [Текст] / J. Wang, Y. Kang, Hao Yu, W. Ge // Materials Sciences and Applications. – 2019. – № 10. – Vol. 10. – P. 665–675. <https://doi.org/10.4236/msa.2019.1010047>.
5. Романов И. Д. Структура и свойства низкоуглеродистой мартенситной стали, закаленной с ковочного нагрева [Текст] / И. Д. Романов, А. А. Шацов,

М. Г. Закирова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 2 (104). – С. 206–212.

6. Влияние горячей деформации аустенита на кинетические параметры и морфологию выделения феррита в доэвтектоидной стали [Текст] / В. А. Займовский, О. В. Самедов, Л. П. Соркин и др. // ФММ. – 1986. – № 2. – Т. 61. – С. 348–353.

7. Особенности кинетики распада и структурообразования в хромомолибденованадиевой стали при непрерывном охлаждении от различных температур аустенитизации [Текст] / В. А. Луценко, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко, Н. А. Глазунова // Литье и металлургия. – 2016. – 3 (84). – С. 82–86.

8. Jiatao Zhang. Austenite Grain Ultra-refinement of 42CrMo Steel Induced by Electropulsing Treatment [Текст] / АЕМСМЕ. – 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 563 022017. doi:10.1088/1757-899X/563/2/022017.

9. Луценко В. А. Влияние температуры аустенитизации на структурообразование при непрерывном охлаждении хромомолибденовой стали [Текст] / В. А. Луценко, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко // Литье и металлургия. – 2017. – 3 (88). – С. 13–16.

10. Costa L. L. Microstructure evolution of 42CrMo4 during hot forging process of hollow shafts for wind turbines [Текст] / L. L. Costa, A. M. G Brito, A. Rosiak, L. Schaeffer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – № 106. – P. 511–517.

11. Влияние термического передела на величину действительного зерна конструкционной цементуемой стали 20ХН3А [Текст] / С. П. Руденко, А. Л. Валько, А. А. Шипко, А. Н. Чичин // Литье и металлургия. – 2016. – № 3 (84). – С. 87–93.

12. Чертов В. М. Выявление действительного аустенитного зерна в конструкционной стали [Текст] / Чертов В. М. // Металлург. – 2010. – № 3. – С. 55–56.

13. Журавель І. М. Підвищення точності обчислення усередненого діаметра зерен конструкційних сталей [Текст] / І. М. Журавель // Український журнал інформаційних технологій. – № 1. – Т. 1. – С. 17–21. doi.org/10.23939/ujit2019.01.017.

14. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

15. ДСТУ ISO 643:2009. Сталі. Мікрографічний метод визначення видимого розміру зерна.

16. ASTM E112-13(2021). Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

Одержано 24.03.2023

PECULIARITIES OF REVEALING AND ESTIMATION OF AUSTENITIC GRAIN IN STRUCTURAL ALLOYED STEELS

- Kunyc'ka I. Candidate of technical science, scientific researcher of the State enterprise «Ukrainian Scientific-Research Institute of Special Steels, Alloys and Ferroalloys (DP «UkrNDIspetsstal»), e-mail: yaispector@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5408-2326
- Yastrebova O. Senior laboratory assistant of the Department of Physical Material Science, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kafedra_fm@zntu.edu.ua
- Ruban V. Senior teacher of the Department of Labor and Environmental Protection, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: rubanopns@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2339-1035
- Dszus A. Assistant of the Department of Physical Material Science, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kafedra_fm@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6474-0732
- Ol'shanetskii V. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physical Material Science, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: olshan@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9485-4896

Purpose. Establishing effective and correct techniques for detecting the grain structure in structural medium-carbon steels taking into account the recommendations of modern standards (ДСТУ ISO, ASTM, ГОСТ) with the aim of reliably determining the austenitic grain size and putting into operation of metal with the well-known and required, according to the normative technical documentation (technical requirements, drawings) quality.

Research methods. Metallographic analysis of microstructure and evaluation of the austenitic grain size were carried out by comparing the image revealed on polished and etched using various chemical reagents microsections of heat-treatable steel 40KH2MA-III with etalon of scale of standard.

Results. Studies of structural alloyed steel 40XH2MA-III found that the most effective etchant reagent, which best detects initial austenitic grain boundaries in medium-carbon alloyed steels, is a standard reagent - a saturated aqueous solution of picric acid. As a result of etching in this reagent, a visible image of the grain structure is formed in the form of a clear contrast of light areas of the grain body and dark lines of the grain boundaries, which allows a correct comparison of the structure with the images of the standards on the scales.

Scientific novelty. On the example of heat-treatable steel 40XH2MA-III, the ways of further development of ideas regarding the choice of an effective chemical reagent are considered for the purpose of detecting and forming a visible grain structure in accordance with the requirements of methodical standards in structural medium-carbon steels, proper and reliable estimation of austenitic grain size using standard scale.

Practical value. A correct procedure for detecting the initial austenite grain is proposed, which allows to reliably determine the grain size and quality from this parameter of various structural steels including for the production of responsible parts of aircraft and spacecraft.

Key words: structural alloyed steels, responsible parts, aircraft, austenitic grain size, grain boundaries, microstructure, scales, methods, standards, reagents, picric acid solution.

References

1. Metallografija zheleza. Osnovy metallografii (s atlasom mikrofotografij) [Metallography of iron Structure of steels (with atlas of microphotographs)] (1972). Moscow, Metallurgija, 240.
2. Kovaljenko V.S. (1970) Metallograficheskiye reaktivy [Metallographic reagents]. Moscow, Metallurgiya, 133.
3. Spektor Ya. I. (1965). Sklonnost' stali k hrupkomu razrusheniyu v svyazi s sostoyaniem al'fa-fazy [The tendency of steel to brittle fracture due to the state of the alpha phase]. Moscow, 131.
4. Wang J. Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Q1030 Steel. Materials Sciences and Applications [Текст] / J. Wang, Y. Kang, Hao Yu, W. Ge // Materials Sciences and Applications. – 2019. – № 10. – Vol. 10. – P. 665–675. <https://doi.org/10.4236/msa.2019.1010047>.
5. Romanov I. D., Shacov A. A., Zakirova M. G. (2014) Структура и свойства низкоуглеродистой мартенситной стали, закаленной с ковочного нагрева [Structure and Properties of Low-Carbon Martensitic Steel Hardened from Forging Heating]. Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University. R. E. Alekseeva, 2 (104), 206–212.
6. Zaymovskiy V. A., Samedov O. V., Sorkin L. P., Gurevich Ya. B., Spektor Ya. I. (1986) Vliyanie goryachey deformacii austenita na kineticheskie parametry i morfologiyu vydeleniya ferrite v doevtektoidnoy stali [Influence of hot deformation of austenite on kinetic parameters and morphology of ferrite precipitation in hypoeutectoid steel]

Physics of metals and metal science, 61 (2), 348–353.

7. Lutsenko V. A., Golubenko T. N., Lutsenko O. V., Glazunova N. A. (2016) Osobennosti kinetiki raspada i strukturoobrazovaniya v hromomolibdenovanadievoi stali pri nepreryvnom ohlazhdenii ot razlichnykh temperatur austenitizatsii [Features of the kinetics of decay and formation of structure in chromo-molibdenum-vanadium steel at continuous cooling from different temperatures of austenitization]. Foundry production and metallurgy, 3, 82–86.

8. Jiatao Zhang. Austenite Grain Ultra-refinement of 42CrMo Steel Induced by Electropulsing Treatment [Текст] / AEMCME. – 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 563 022017. doi:10.1088/1757-899X/563/2/022017.

9. Lutsenko V. A., Golubenko T. N., Lutsenko O. V., Shehurdin S. N. (2017). Vliyanie temperatury austenitizatsii na strukturoobrazovaniye pri nepreryvnom ochlazhdenii hromomolibdenovoi stali [Effect of austenitization temperature on structure formation during continuous cooling of chromium-molybdenum steel] Foundry production and metallurgy, 3 (88), 13–16.

10. Costa L. L. Microstructure evolution of 42CrMo4 during hot forging process of hollow shafts for wind turbines [Текст] / L. L. Costa, A. M. G Brito, A. Rosiak, L. Schaeffer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – № 106. – P. 511–517.

11. Rudenko S.P., Valko A.L., Shipko A.A., Chichin A.N. (2016). Vliyanie termicheskogo peredela na velichinu deystvitelnogo zerna konstruktsionnoy cementuemoi stali 20ChN3A [Influence of the thermal process stage on the size of valid grain of constructional carburized steel grade 20ChN3A] Foundry production and metallurgy, 3 (84), 87–93.

12. Chertov V. M. (2010) Vyyavlenie deystvitelnogo austenitnogo zerna v konstruktsionnoi stali [Identification of actual austenite grain in structural steel] Metallurgist, 3, 55–56.

13. Zhuravel I. M. (2019) Pidvysennya tochnosti obchyslennya userednenogo diametra zeren konstruktsiynykh staley [Increasing the accuracy of calculation of the average diameter of grains of structural steels], Ukrainian Journal of Information Technology, 1 (1), 17–21. <https://doi.org/10.23939/ujit2019.01.017>.

14. GOST 5639-82. Stali i splavy. Metody vyavleniya i opredeleniya velichiny zerna [Steels and alloys. Methods for identifying and determining grain size].

15. DSTU ISO 643:2009. Stali. Mikrografichnyy metod vyznachennya vydymogo rozmiru zerna [Steels. Micrographic determination of the apparent grain size].

16. ASTM E112-13(2021). Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.