

УДК 669.15-194

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.48.632

ВАКАНСІЇ ЯК ЛЕГУВАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ У МЕТАЛАХ

ГУЛЬ Ю. П.¹, канд. техн. наук, доц.,
 ЧМЕЛЬОВА В. С.², канд. техн. наук, доц.,
 СОБОЛЕНКО О. В.³, канд. техн. наук, доц.,
 ПЕРЧУН Г. І.^{4*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

² Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

³ Кафедра прикладної математики та обчислювальної техніки, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 917-88-95, e-mail: avsobol.1651@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7813-6819

^{4*} Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: perchun_galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

Анотація. *Мета дослідження* – вивчення і розроблення способів нового виду екологічно чистого легування металів контрольованою нерівноважною концентрацією вакансій. *Методика.* Системний аналіз способів легування металів нерівноважною концентрацією вакансій і механізмів впливу цього легування на структуру і властивості металів. *Результати.* Розроблено теоретичні основи легування нерівноважною концентрацією вакансій шляхом вакансійного гарту, гідростатичного стиснення, циклічної деформації, спеціальної деформаційно-термічної обробки за типом швидкісного рекристалізаційного відпалу холоднотермічного металу, а також комбінацією зазначених методів. *Наукова новизна.* Визначено процеси, внаслідок яких відбувається взаємодія вакансій з рухомими дислокаціями, що істотно змінює траєкторії руху дислокацій і формує дислокаційну субструктуру з особливими квазірівноважними межами, близькими за властивостями до меж, що формуються під час високотемпературної термомеханічної обробки. *Практична значимість.* Вказано принципи регламентації параметрів вакансійного легування, що забезпечують його ефективність і контрольовані параметри способів легування.

Ключові слова: *вакансійний гарт; гідростатичне стиснення; дислокаційна субструктура; деформаційно-термічна обробка; нерівноважна концентрація вакансій; циклічна деформація; швидкісний рекристалізаційний відпал*

ВАКАНСИИ КАК ЛЕГИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ В МЕТАЛЛАХ

ГУЛЬ Ю. П.¹, канд. техн. наук, доц.,
 ЧМЕЛЕВА В. С.², канд. техн. наук, доц.,
 СОБОЛЕНКО А. В.³, канд. техн. наук, доц.,
 ПЕРЧУН Г. И.^{4*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

² Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

³ Кафедра прикладной математики и вычислительной техники, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 917-88-95, e-mail: avsobol.1651@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7813-6819

^{4*} Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: perchun_galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

Аннотация. *Цель исследования* – изучение и разработка способов нового вида экологически чистого легирования металлов контролируемой неравновесной концентрацией вакансий. *Методика.* Системный анализ способов легирования металлов неравновесной концентрацией вакансий и механизмов влияния этого легирования на структуру и свойства металлов. *Результаты.* Разработаны теоретические основы легирования неравновесной концентрацией вакансий путем вакансионной закалки, гидростатического сжатия, циклической деформации, специальной деформационно-термической обработки по типу скоростного

рекристаллізаційного отжига холоднодеформованого металу, а також комбінацією вказаних методів. **Научна новизна.** Определены процессы, в результате которых происходит взаимодействие вакансий с подвижными дислокациями, что существенно изменяет траектории движения дислокаций и формирует дислокационную субструктуру с особыми квазиравновесными границами, близкими по свойствам к границам, которые формируются при высокотемпературной термомеханической обработке. **Практическая значимость.** Указаны принципы регламентации параметров вакансионного легирования, обеспечивающие его эффективность и контролируемые параметры способов легирования.

Ключевые слова: вакансионная закалка; гидростатическое сжатие; дислокационная субструктура; деформационно-термическая обработка; неравновесная концентрация вакансий; циклическая деформация; скоростной рекристаллизационный отжиг

VACANCIES AS A METAL ALLOYING ELEMENT

GUL Yu.P.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
 CHMELEVA V.S.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
 SOBOLENKO O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
 PERCHUN G.I.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-57, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

² Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 320-92-67, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

³ Department of Applied Mathematics and Computing Engineering, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 917-88-95, e-mail: avsobol.1651@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7813-6819

^{4*} Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave. 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: perchun_galina@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

Abstract. Purpose. The study and development of methods for a new type of environmentally friendly alloying of metals with a controlled nonequilibrium concentration of vacancies. **Methodology.** System analysis of methods of alloying metals with a nonequilibrium concentration of vacancies and the mechanisms of the influence of this alloying on the structure and properties of metals. **Results.** The theoretical foundations of doping with a nonequilibrium concentration of vacancies by means of vacancy hardening, hydrostatic compression, cyclic deformation, special deformation-heat treatment according to the type of high-speed recrystallization annealing of cold-deformed metal, as well as a combination of these methods are developed. **Originality.** The processes that result in the interaction of vacancies with moving dislocations, which significantly changes the trajectories of the dislocations and forms a dislocation substructure with special quasi-equilibrium boundaries that are close in properties to the boundaries formed during high-temperature thermomechanical processing. **Practical value.** The principles of regulating the parameters of vacancy doping, ensuring its effectiveness and the controlled parameters of doping methods, are indicated.

Keywords: *vacancy hardening; hydrostatic compression; dislocation substructure; deformation-heat treatment; nonequilibrium concentration of vacancies; cyclic deformation; high-speed recrystallization heating*

Традиційні способи легування металів вимагають введення в них матеріальних носіїв легування – атомів легувальних елементів. У той же час можливе легування металів вакансіями, які є, за Шотткі, елементарними носіями «порожнечі». Урахування інших характеристик вакансій допускає, ймовірно, їх розгляд як елементарних частинок іншої, особливої речовини [1].

Порівняно давно відомо про роль вакансій як легувальних компонентів у твердих розчинах віднімання, особливо інтерметалідах і фазах упровадження [2].

Є спроби побудувати діаграму стану «метал – вакансія» [3]. Розглянуто можливості легування чистих металів нерівноважною концентрацією вакансій (НКВ) шляхом їх гарту з подальшим гартівним старінням або механіко-термічною обробкою типу деформаційного старіння [4]. Відомі ефекти знеміцнення деформованих металів за циклічної деформації [5], фактично також пов'язані з легуванням НКВ. Вказується на можливість значного підвищення пластичності металів шляхом насичення НКВ [6].

У статті наведено результати системного аналізу способів легування металів НКВ і механізмів впливу цього легування на структуру і властивості металів. Легування НКВ може здійснюватися шляхом вакансійного гартування (ВГ), гідростатичного стиснення (ГС), циклічної деформації (ЦД), спеціальної деформаційно-термічної обробки за типом швидкісного рекристалізаційного відпалу холодно-деформованого на значний ступінь металу (ШРВ), а також комбінацією зазначених методів. Метод ВГ заснований на відомій температурній залежності рівноважної концентрації вакансій (РКВ) і визначенні можливості фіксації необхідної концентрації вакансій (НКВ) в реальних перетинах. Рівнянням (1) визначається вихідна концентрація вакансій за температури нагріву під загартування T_0 , якщо відомі значення: енергії утворення вакансій U_B , тиску P і релаксованого атомного об'єму θ_a .

$$C_{BP} \approx \exp\left(-\frac{U_B}{kT_0}\right) \exp\left(-\frac{P\theta_a}{kT_0}\right). \quad (1)$$

За атмосферний тиск значенням другої експоненти можна знехтувати.

На фіксовані в результаті ВГ значення НКВ впливають значення T_0 та режим гартувального охолодження. Останній визначається швидкістю відпалу вакансій за відомим рівнянням:

$$dC_B/d\tau = -C_\tau (av/\bar{r}) \exp(-U_m/kT_\tau), \quad (2)$$

де C_τ – концентрація вакансій до часу охолодження τ , a – параметр кристалічної ґратки, v – дебаївська частота теплових коливань, \bar{r} – середня відстань до місця стоку вакансій, U_m – енергія міграції вакансій, T_τ – поточна температура, k – постійна Больцмана.

Спільне рішення рівнянь (1) і (2) показує, що як абсолютні значення НКВ при ВГ – C_B' , так і ступінь пересичення вакансіями твердого розчину за температури кінця загартування – C_B'/C_{BP} у функції від T_0 описуються екстремальними залежностями [7]. Якщо режимом обробки після ВГ передбачено пластичну деформацію або поліморфне перетворення за мартенситним

типом, основний вплив на формівну дислокаційну субструктуру чинить зведене відносно пересичення аустеніту (A), яке визначає відношення осмотичної сили F_S та яке сприяє швидкому переповзанням крайової компоненти дислокації до значення сили F_P , що перешкоджає переповзанням [8]:

$$A = \frac{F_S}{F_P} = (kT/U_B) \ln(C_B'/C_{BP}). \quad (3)$$

Аби отримати необхідний ефект для формування дислокаційної субструктури в умовах пересичення вакансіями, що забезпечується ВГ, необхідне отримання значення $A \geq 0,5$ [7]. Значення A можна обчислити як міру вакансійної загартованості металу. Важливо, що необхідна величина C_B' значно (на кілька порядків) менша значення рівноважної концентрації вакансій за температури гарту T_0 . Це знімає теоретичні обмеження на практичну реалізацію ВГ [9].

У загальному вигляді середня критична швидкість загартування $\bar{V}_{кр}$ в інтервалі $T_0...T$ як швидкість охолодження, що забезпечує легування металу необхідної НКВ, визначається з виразу:

$$\bar{V}_{кр} = \frac{n-1}{[(n-1)/n]-A} \cdot \frac{kT^2}{U_B} \cdot \frac{v \cdot a}{\bar{r}} \exp\left[-\frac{2U_m}{k(nT+77)}\right], \quad (4)$$

де $n = \frac{T_0}{T}$.

Розрахункові й експериментальні оцінки для технічного заліза і сплавів на залізній основі показали, що значення $\bar{V}_{кр}$ знаходяться в інтервалі 100...1 000 град/с, а наскрізна вакансійна прогартованість забезпечується в перетинах до 10 мм. Значення поточної швидкості V_T в підінтервалі температур $T_1 - T_2$, на які розбивається загальний інтервал охолодження $T_0...T$, можна обчислити за рівнянням:

$$V_T = \frac{T_1 - T_2}{\beta(T)} \cdot \frac{av \exp\left(-\frac{U_m}{kT}\right)}{\bar{r} \left\{1 - \exp\left[\frac{U_B}{k} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right)\right]\right\}}, \quad (5)$$

де $\beta(T)$ – коефіцієнт «вакансійної прогартованості», який залежить від середньоінтервального значення температури \bar{T} .

Для здійснення ВГ перспективне охолодження швидко рухомими потоками диспергованого охолоджувача в турбулентному режимі, де закономірності температурної залежності поточних швидкостей охолодження близькі до вказаних вище [10].

Використання отриманої регламентованої НКВ для формування особливої дислокаційної субструктури в процесі подальшої деформації забезпечується: 1) обмеженням часу між закінченням ВГ і початком деформації і 2) регламентацією швидкості деформації $\dot{\epsilon}$.

Значення останнього параметра обчислюється рівнянням:

$$\dot{\epsilon} \geq \frac{\epsilon \cdot v \cdot \exp(-U_m/kT_B)}{f(\epsilon)[1 - \exp(U_B/kT_B) \cdot (0,5 - A)]} \quad (6)$$

де ϵ – ступінь деформації, T_B – температура деформації, $f(\epsilon)$ – середня відстань до місця стоку вакансій, яка залежить від ступеня деформації.

Експериментально показано, що ефекти легування НКВ сплавів на залізній основі методом ВГ стійко фіксуються у разі післягартівної деформації за кімнатної температури зі швидкостями $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ c}^{-1}$ в діапазоні $\epsilon = 0,05 \dots 0,25$.

Легування НКВ методом ВГ може бути ефективним і, так би мовити, в чистому вигляді, коли післягартівна обробка полягає у післягартівному вилежуванні, своєрідному гартівному старінні, механізмом якого постає взаємодія вакансій між собою і (або) зі стаціонарними дислокаціями, що існують у металі після ВГ. Про наявність таких ефектів є досить багато відомостей в літературі, переважно для ГЦК-металів [8; 11; 12]. Взаємодія між нерівноважними вакансіями зумовлює утворення дислокаційних петель і тетраєдрів дефектів упаковки, пов'язаних із формуванням «сидячих» дислокацій Франка в щільноупакованих кристалографічних площинах, а також утворення субмікропор [8; 11; 12].

Відомості про кількісне регулювання зазначених ефектів шляхом зміни режимів із позицій, описаних вище, у відомій

літературі відсутні. У той же час таке регулювання цілком можливе.

Умова утворення дислокаційних петель визначається ступенем відносного пересичення вакансіями [8]:

$$\ln \frac{C'_B}{C_{BF}} \geq 0,125 \frac{G \cdot b^3}{kT}, \quad (7)$$

де G – модуль зсуву, b – вектор Бюргерса.

Права частина рівняння (7) для сплавів на залізній основі і кімнатній температурі близько 10^0 C . Отже, умова (7) виконується, якщо забезпечується необхідне значення A згідно з рівняннями (3) і (4). Однак одержувані кількісні ефекти з точки зору зміни властивостей залежать, у даному випадку, від абсолютного значення НКВ, тобто від величини C'_B . Щоб забезпечити щільність вакансійних утворень в інтервалі $10^{12} \dots 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, значення C'_B має бути в межах відповідно $10^{-8} \dots 10^5$. Розрахунок необхідних параметрів режиму ВГ може бути проведений за допомогою рівняння (4) з урахуванням того, що, згідно з рівнянням (3):

$$\ln C'_B = \frac{AV_B}{kT} + \ln C_{BF}. \quad (8)$$

Зазначена вище об'ємна щільність вакансійних утворень достатня для отримання помітного зміцнення за аналогією зі зміцненням дисперсійно твердіючих сплавів зонами або когерентними виділеннями: наприклад, за об'ємної щільності дислокаційних петель порядку 10^{15} cm^{-3} межа плинності чистого алюмінію зростає в 5 разів [12], що рівноцінно легуванню кількома відсотками міді.

У разі легування металу НКВ за допомогою ГС враховуються обидва експоненти в рівнянні (1). Підвищення тиску за тієї самої температури робить раніше РКВ нерівноважною і, таким чином, робить можливим за тиску не менше певного P_{\min} досягти ступеня пересичення металу вакансіями, що допускає швидке переповзання дислокацій за Фріделем, так само як розглянуте вище легування методом ВГ.

Таким чином, на нашу думку, досягається відомий ефект «барополігонізації» за ГС, механізм якого раніше, наприклад, авторами роботи [13] уявлявся дещо іншим. Якщо виходити з одних позицій впливу НКВ на прискорену полігонізацію в деформованих металах як після ВГ, так і за ГС, значення P_{\min} для «барополігонізації» обчислюється виразом:

$$P_{\min} \geq 0,5 \frac{U_B}{\vartheta_a} \quad (9)$$

Розрахунок за цим виразом для різних металів дає цілком порівняльні значення тисків із використовуваними на практиці. Значення використовуваних за ГС тисків досить великі, а ефект «барополігонізації» досягається не для всіх металів зі зменшенням значення енергії дефектів упаковки (ЕДУ). Останнє робить у низці випадків процес обробки нестабільним, що супроводжується стрибками тиску, що, зокрема, позбавляє процес однієї з важливих переваг: високої точності розмірів і низької шорсткості поверхні.

Комбінування легування шляхом гідростатичного стиснення (ГС) з попереднім легуванням НКВ методом ВГ дозволяє отримати переваги для обох способів:

$$P_{\min} = \frac{kT}{\vartheta_a} \ln \frac{c'}{\beta} - \frac{U_B}{\vartheta_a} \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad (10)$$

де c' – ступінь пересичення вакансіями в результаті ВГ, β – те саме – в результаті ГС.

Як впливає з рівняння (10), попереднє легування НКВ шляхом ВГ дозволяє знизити необхідний тиск і отримати ефект «барополігонізації». При цьому може бути досягнутий ефект неконсервативного ковзання дислокацій навіть для металів із низькою $E_{\text{дп}}$.

Легування НКВ шляхом циклічної деформації (ЦД) засноване на експериментально встановленому і потім теоретично обґрунтованому ефекті отримання істотно великих значень НКВ порівняно з активною деформацією [5; 14]. Доцільне використання легування НКВ шляхом ЦД для металів із високою щільністю місць стоку вакансій, особливо

для деформованих металів із високою щільністю дислокацій, що є характерною особливістю отримання позитивних ефектів за вакансійного легування шляхом ЦД.

Значення НКВ, що вводиться у метал за високочастотної ЦД, можна оцінити за виразом [15]:

$$C'_B \approx \frac{f \cdot Q^{-1} \cdot \varepsilon_A}{m D_B}, \quad (11)$$

де f – частота коливань, Q^{-1} – добротність коливального контуру, ε_A – амплітудна деформація, m – щільність дислокацій, D_B – коефіцієнт дифузії вакансій.

Зі зміною частоти ЦД і значення ε_A ця залежність зберігається. Загалом можна прийняти, що значення $C'_B = f(N_A \cdot \varepsilon_A)$, N_A – число циклів деформації з амплітудою ε_A , якщо щільність дислокації (вихідна) і значення D_B – приблизно постійні.

Можливість легування металів НКВ за допомогою швидкісного рекристалізаційного відпалу (ШРВ) вперше була показана, мабуть, у праці [16]. Пізніше запропоновано вираз для кількісної оцінки значення НКВ при цьому [6]:

$$C'_B \approx \frac{m \rho_M}{b \rho N_A}, \quad (12)$$

де ρ_M – мольна маса, ρ – щільність металу, N_A – число Авогадро.

За щільність дислокацій, які анігілюють у процесі ШРВ $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$, величина C'_B досягає $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ см}^{-2}$, тобто дуже великих значень. Таке легування НКВ може бути використане безпосередньо за температури кінця рекристалізації, а також шляхом часткової фіксації за більш низької температури методом ВГ. В останньому випадку відкривається можливість знизити оптимальну температуру нагрівання під ГЗ із фіксацією тієї ж або вищої НКВ у разі знижених швидкостей гартування.

Висновок. Розглянуто та обґрунтовано способи нового виду легування металів – вакансійного. Як такі способи запропоновано: вакансійне гартування, гідростатичне стиснення, циклічна деформація і швидкісний рекристалізаційний відпал, як кожен окремо, так і в комбінації. Вказані принципи регламентації параметрів вакансійного легування

забезпечують його ефективність і контрольовані параметри способів легування.

Вакансійне легування належить, в основному, до структурного типу легування і його вплив на властивості пов'язаний зі зміною структурного стану металу на рівні тонкої структури. Структурні зміни, що викликаються вакансійним легуванням у поєднанні з подальшими діями – тимчасовими або деформаційними, фактично можна описати як процеси своєрідного гартувального, статичного деформаційного і динамічного деформа-

ційного старіння. При цьому гартівне старіння пов'язане із взаємодією нерівноважних вакансій між собою, статичне деформаційне – із взаємодією цих вакансій зі стаціонарними, а динамічне деформаційне – з рухомими дислокаціями.

Особливий інтерес і новизну становить останній процес, в ході якого істотно змінюються траєкторії руху дислокацій і формується дислокаційна субструктура з особливими квазірівно-важними межами, близькими за властивостями до меж, що формуються під час високотемпературної термомеханічної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Владимиров В. И. Физическая теория прочности и пластичности металлов : учеб. пособ. Ленинград : ЛПИ, 1975. 224 с.
2. Physical metallurgy. Edited by R. W.Cahn; chapters XII–XX. North-Holland Publishing Co, Amsterdam, 1965.
3. Габидуллин Р. М., Колачев Б. А. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. 1976, № 4. С. 87–91.
4. Камышанченко Н. В. Влияние механико-термического воздействия на структуру и свойства закаленных чистых металлов : монография. Белгород, 1984. 197 с. Деп. ВИНТИ № 5979-84.
5. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. Москва : Металлургия, 1979. 576 с.
6. Колбасников Н. Г. О роли вакансий в формировании свойств металлов. *Металлы*. 1998. № 6. С. 80–90.
7. Гуль Ю. П., Лещенко А. Н., Пилипченко В. Ю. Роль вакансионной закалки при термопластическом упрочнении сталей аустенитного класса. *Известия АН СССР. Металлы*. 1990, № 4. С. 77–83.
8. Фридель Ж. Дислокации. Москва : Мир, 1967. 644 с.
9. Бюрен Ван. Дефекты в кристаллах. Москва : Изд-во иностр. лит., 1962. 574 с.
10. Гуль Ю. П., Чмелева В. С., Кириченко В. В. Современные аспекты закалочного охлаждения стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1989, № 9. С. 2–6.
11. Такамура Д. И. Точечные дефекты. Под ред. Р. У. Кана. *Физическое металловедение*. Вып. 3. Москва : Мир, 1968. С. 87–105.
12. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. Москва : Мир, 1972. 408 с.
13. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. Москва : Атомиздат, 1972. 600 с.
14. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. Москва : Металлургиздат, 1965. 432 с.
15. Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. Москва : Мир, 1966. 291 с.
16. Блантер М. Е., Горелик С. С. Образование вакансий при рекристаллизации. *Известия АН СССР. Металлы*. 1982. № 2. С. 90–93.

REFERENCES

1. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya teoriya prochnosti i plastichnosti metallov* [Physical Theory of Strength and Plasticity of Metals]. Leningrad : LPI, 1975, 224 p. (in Russian).
2. Physical metallurgy. Ed. by R.W.Cahn, chapters XIII–XX. North-Holland Publishing Co, Amsterdam, 1965.
3. Gabidullin R.M. and Kolachev B.A. *Izvestiya VUZov. Zvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy. University News]. 1976, no. 4, pp. 87–91. (in Russian).
4. Kamishanchenko N.V. *Vliyanie mekhaniko-termicheskogo vozdeystviya na structure i svoystva zakalennih chistykh metallov* [The influence of mechanical and thermal effects on the structure and properties of hardened pure metals]. Belhorod, 1984, 197 p.; Dep.VINITI № 5979-84. (in Russian).
5. Herzberg R.V. *Deformaziya i mekhanika razrusheniya konstrukzionnih materialov* [Deformation and fracture mechanics of structural materials]. Moscow : Metallurgiya, 1979, 576 p. (in Russian).
6. Kolbasnikov N.G. *O roli vakansiy v formirovanii svoystv metallov* [On the role of vacancies in the formation of the properties of metals]. *Metally* [Metals]. 1998, no. 6, pp. 80–90. (in Russian).

7. Gul' Yu.P., Leschenko A.N. and Pilipchenko V.Yu. *Rol' vakansionnoy zakalki pri termoplasticheskom uprochnenii staley austenitnogo klassa* [The role of vacancy hardening in thermoplastic hardening of austenitic steels]. *Metally* [Metals]. 1990, no. 4, pp.77–83. (in Russian).
8. Fridel' G. *Dislokazii* [Dislocations]. Moscow : Mir, 1967, 644 p. (in Russian).
9. Buren Van. *Defekty v kristallah* [Crystal defects]. Moscow : Izdat. Inostr. lit., 1962, 574 p. (in Russian).
10. Gul' Yu.P., Chmeleva V.S. and Kirichenko V.V. *Sovremenniy aspekt zakalochnou ohlagdeniya staly* [Modern aspects of the quench cooling of steel]. *MiTOM* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1989, no. 9, pp. 2–6. (in Russian).
11. Takamura D.I. *Tochechnie defekty* [Point defects]. Ed. by R.U.Kana. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moscow : Mir, 1968, vol. 3, pp.87–105. (in Russian).
12. Honikomb R. *Plasticheskaya deformaciya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow : Mir, 1972, 408 p. (in Russian).
13. Hirt Dg. and Lote I. *Teoriya dislokaziy* [Dislocation theory]. Moscow : Atomizdat, 1972, 432 p. (in Russian).
14. Mak Lin D. *Mechanicheskie svoystva metallov* [The mechanical properties of metals]. Moscow : Metallurgizdat, 1965, 432 p. (in Russian).
15. Damask A. and Dins Dg. *Tochechnie defekty v metallah* [Point defects in metals]. Moscow : Mir, 1966, 291 p. (in Russian).
16. Blanter M.E. and Gorelik S.S. *Obrazovanie vakansiy pri rekristallizacii* [Vacancy formation during recrystallization]. *Izvestiya AN USSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1982, no. 2, pp. 90–93. (in Russian).

Надійшла до редакції : 08.02.2020 р.