

PACS numbers: 07.90.+c, 61.82.Bg, 62.20.Fe, 68.35.Dv, 89.20.Bb

Вплив технології прокатування на властивості трансформаторної сталі

А. А. Нестер, О. С. Дробот, О. О. Нікітін

*Хмельницький національний університет,
вул. Інститутська, 11,
29016 Хмельницький, Україна*

На металургійних заводах трансформаторну сталь одержують переважно методом дворазового чи триразового прокатування. Для спрощення технології одержання сталі можна використовувати одноразове прокатування. Електромагнетні властивості готового листа трансформаторної сталі залежать від структури після первинної рекристалізації. Однак технологія проведення такого процесу вимагає експериментальних досліджень. В зв'язку з цим виникла потреба дослідити вплив стабілізації матриці після одноразового прокатування слябів з попереднім томленням слябів на формування ребрової текстури. Досліджені зразки трансформаторної сталі з слябів, які не проходили гомогенізацію та такі, що піддавались гомогенізаційному відпалу. Аналіза мікроструктури холоднодеформованих зразків після первинної рекристалізації показала, що гомогенізуючий відпал сприяє формуванню більш однорідної та дрібнозернистої структури сталі. Зразки, які піддавали одноразовому прокатуванню мають менший розмір зерна, ніж після дво- та триразового прокатування. Згідно проведених досліджень можна рекомендувати одноразове прокатування для отримання готового листа трансформаторної сталі.

Ключові слова: трансформаторна сталь, прокатування, рекристалізація, сляби, гомогенізаційний відпал, зерно.

At metallurgical plants, transformer steel is produced mainly by double or

Corresponding author: Anatoliy Antonovych Nester
E-mail: nesteranatol111@gmail.com

*Khmelnyskyi National University,
11 Instytutska Str., UA-29016 Khmelnytskyi, Ukraine*

Citation: A. A. Nester, O. S. Drobot, and O. O. Nikitin, Influence of Rolling Technology on the Properties of Transformer Steel, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 4: 471–481 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.04.0471](https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0471)

triple rolling. One-time rolling can be used to simplify the technology of steel production. The electromagnetic properties of the finished transformer steel sheet depend on the structure after primary recrystallization. However, the technology of such a process requires experimental research. Therefore, there is a need to investigate the effect of matrix stabilization after a single rolling of slabs with previous slacking of slabs on the formation of rib texture. Samples of transformer steel from slabs that did not undergo homogenization and those that are subjected to homogenization annealing are studied. Analysis of the microstructure of cold-deformed samples after primary recrystallization shows that homogenizing annealing promotes the formation of a more homogeneous and fine-grained structure of steel. Samples that have been rolled once have a smaller grain size than after two and three rolls. According to research, it is possible to recommend a single rolling to obtain a finished sheet of transformer steel.

Key words: transformer steel, rolling, recrystallization, slabs, homogenization annealing, grain.

(Отримано 11 січня 2022 р.)

1. ВСТУП

Україна має декілька потужних трансформаторних заводів (Запоріжжя, Хмельницький), які постачають свою продукцію як в Україну, так і за кордон. Для виготовлення магнетопроводів електротехнічного обладнання використовується спеціальна електротехнічна сталь з товщиною 0,23, 0,28, 0,3, 0,35 мм з особливою структурою, що дозволяє забезпечити при відповідній технології високі характеристики (особливо це важливо для потужних трансформаторів). Постачальниками таких сталей для підприємств України є заводи Росії, Польщі, ФРН, Південної Кореї, Китаю.

Для виготовлення ефективних та з мінімальними втратами холодного ходу трансформаторів електротехнічній промисловості потрібні сталі високої якості, які дозволяють забезпечити ці мінімальні втрати холодного ходу. Однією з основних вимог, що висуваються до властивостей електротехнічної сталі, є мінімальна величина суми втрат, віднесена до одиниці маси електротехнічної сталі. Ці втрати вимірюють у Вт/кг і їх називають питомими або ватними втратами. Виготовлення магнетопроводів (сердечників) з рафінованих сталей з чітко текстурованою структурою та усунення наклепу після складальних робіт дозволяє значно зменшити габарити та масу трансформаторів, а також зменшити втрати та підвищити коефіцієнт корисної дії.

При одержанні трансформаторної сталі будь-яким способом (в електропечах, мартенівських печах, чи кисневих конверторах) має бути забезпечений хемічний склад сталі, яка повинна містити мі-

німальну кількість домішок. Корисним елементом трансформаторної сталі є тільки Силіцій, вміст якого знаходиться в межах 2,9–3,3%.

Важливими чинниками технології плавлення сталі є використання шихтових матеріалів з низьким вмістом Хрому, Ніклю, Купруму, одержання металу з низьким вмістом Карбону (менше 0,035%), Нітрогену, Фосфору, Мангану та інших елементів, а також ретельне розкислення сталі. В готовому листі трансформаторної сталі вміст домішок мінімальний: 0,003–0,010% Карбону (C), менше 0,12 (0,05–0,10)% Мангану (Mn), менше 0,003–0,005% Сульфур (S), менше 0,010% Фосфору (P), менше 0,04% Хрому (Cr), менше 0,001–0,002% Нітрогену (N), менше 0,002–0,003% Оксигену (O) [1].

Існують різні варіанти технології виробництва трансформаторної сталі, але незалежно від варіанту сприятливо впливають на електромагнетні властивості такі фактори: висока чистота готового металу від шкідливих домішок і неметалевих включень, висока температура нагрівання злитків і слябів (1300–1350°C) при тривалому нагріванні 3–4 години і томлення більше 1 години.

Томлення сприяє гомогенізації металу та покращенню його властивостей в листі. Під час гомогенізуючого відпалу концентрація Силіцію (ліквація якого може сягати 250%) в прокаті вирівнюється швидше ніж в литій сталі. Після такої обробки питомі втрати зменшуються, а індукція збільшується. Гомогенізація відбувається швидше при високих температурах нагрівання слябів (1280–1300°C і вище), тому збільшення тривалості витримки та підвищення температури під час томлення при нагріванні слябів сприяє покращенню електромагнетних властивостей.

Підвищена температура стрічки при прокатуванні з температурою змотування рулонів біля 600°C, високий ступінь знеуглецювання в прохідних печах в атмосфері зволоженого Гідрогену чи зволоженої азотно-водневої суміші при 800–900°C також сприяють покращенню його властивостей [2, 3].

Особливу увагу потрібно приділяти отриманню досконалої ребрової текстури (110) [001], що залежить від достатнього ступеня деформації при першому та другому прокатуванні (50–70%), тривалою витримкою при первинній (450–550°C) і вторинній рекристалізації (900–1000°C). Для одержання досконалої ребрової структури потрібно забезпечити в сталі перед високотемпературним відпалом вміст Карбону не більше 0,010%, а вміст Карбону в готовому листі має бути близько 0,005%.

Високотемпературний відпал потрібно проводити в ковпакових електричних печах в чистому сухому Гідрогені з точкою роси 50–60°C чи в глибокому вакуумі ($p_{\text{зал}} = 10^{-3}$ мм рт. ст.) при температурах та тривалості, які забезпечують достатньо повне видалення Нітро-

гену, Сульфур та інших елементів. З метою прискорення нагрівання стрічки та процесів, які відбуваються під час високотемпературного відпалу, доцільно використовувати розпушені рулони.

Перед відпалом і нанесенням покриття на стрічку обов'язково потрібно проводити очистку поверхні від окислів, окалини, жирів, бруду, а перед фосфатуванням — від надлишків окису Магнію. Перелічені рекомендації дозволять одержати сталь з високими електромагнетними властивостями [3].

Високі електричні характеристики сталь має, якщо лист текстурований і має орієнтацію кристалітів в напрямку (100) [001]. Така текстура утворюється під час первинної і вторинної рекристалізації та визначається вихідною структурою металу. Такі чинники як склад сталі, ступінь деформації листа при холодному прокатуванні, а також вплив домішок суттєво впливають на критичну температуру рекристалізації. Як свідчать дослідження для утворення досконалої ребрової текстури в процесі вторинної рекристалізації необхідним є наявність дисперсних включень другої фази. Роль включень проявляється в тім, що вони перешкоджають під час вторинної рекристалізації нормальному росту зерен вихідної структури, за рахунок якої ростуть окремі зерна з орієнтацією (100) [001], що утворюються під час первинної рекристалізації.

Основне призначення високотемпературного відпалу (при 1100–1150°C) — одержання досконалої ребрової текстури та рафінування сталі від шкідливих домішок (Карбону, Нітрогену, Оксигену, Сульфур тощо).

Внаслідок деформації стрічки після другого холодного прокатування формується текстура (111) <112>, з якої після первинної (500–600°C) і вторинної (900–950°C) рекристалізації та витримки металу при більш високих температурах одержують реброву текстуру (110) [001].

На металургійних заводах трансформаторну сталь одержують переважно методом дворазового чи триразового прокатування. Для спрощення технології та зменшення витрат одержання сталі можна використовувати одноразове прокатування. Однак технологія проведення такого процесу вимагає експериментальних досліджень, які недостатньо описані в літературі. В літературі не обґрунтовані причини погіршення досконалості текстури при одноразовому прокатуванні, автори не дають відповіді на питання, що є причиною цього: ступінь деформації, чи попередні та наступні після прокатування технологічні операції, яким піддають метал. Можливо погіршення досконалості текстури після одноразового прокатування спричинене не самим процесом прокатування, а залежить від попередньої обробки, якій піддавали метал [4, 5].

Значна кількість експериментів показала, що досконала реброва текстура в трансформаторній сталі утворюється в тих випадках,

коли після первинної рекристалізації метал має дрібнозернисту однорідну структуру. Отже, структура первинної рекристалізації визначає електромагнетні властивості готового листа трансформаторної сталі.

Формуванню однорідної дрібнозернистої структури сприяє високотемпературне томлення слябів і зменшення вмісту Карбону в литому мартенівському металі [6].

На основі викладеного виникла потреба дослідити вплив стабілізації матриці після одноразового прокатування слябів з попереднім томленням на формування ребрової текстури.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для визначення текстури рекристалізації трансформаторної сталі після різних варіантів прокатування були досліджені зразки двох плавок — мартенівської та електроплавки з вихідною товщиною металу 2,5 мм. Зразки в лабораторних умовах піддавали холодному прокатуванню одноразовому, дворазовому та триразовому для одержання товщини сталі 0,35 мм. Відпал після прокатування проводили при температурі 820–860°C в лабораторній вакуумній печі.

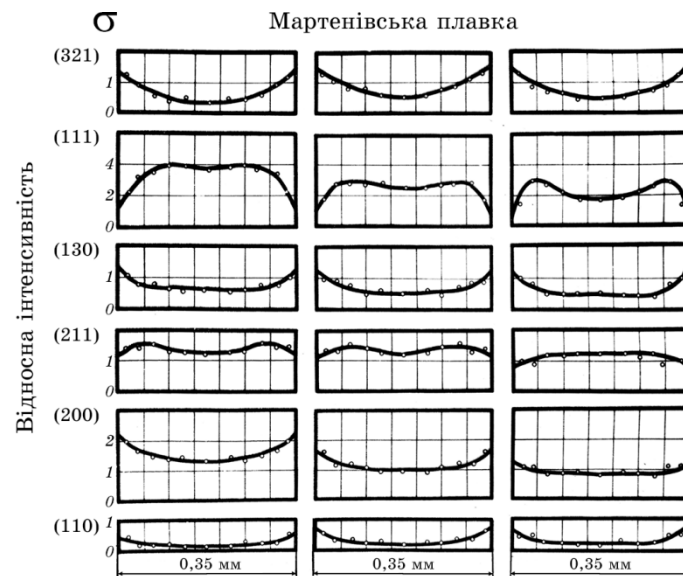


Рис. 1. Текстурні криві, зняті з зразків металу, виплавленого в мартенівській печі.

Fig. 1. Texture curves are taken from samples of metal smelted in an open-hearth furnace.

Для металографічних досліджень готували поверхню шліфа, яка перпендикулярна до площини і напрямку прокатування.

Аналіза мікроструктури холоднодеформованих зразків після первинної рекристалізації, які попередньо піддавали гомогенізуючому відпалу та без відпалу, показала, що метал після відпалу має більш однорідну структуру, ніж без відпалу. Зразки, які піддавали одноразовому прокатуванню, мають після первинної рекристалізації середній розмір зерен менший ніж після дворазового і триразового прокатування. Слід зауважити, що розмір зерен в поверхневому шарі менший, ніж в середині листа.

Дослідження розміру зерна після одноразового, дворазового та триразового прокатування свідчить, що друге прокатування проведене з малими ступенями сумарного обтискання (менше 22%) сприяє формуванню дрібного зерна — 0,3–0,5 мм і великому куту розсіювання текстури (12,6–13°), внаслідок чого сталь має низькі електромагнетні властивості ($P_{15} = 2,02$ Вт/кг, $B_{25} = 1,65$ Гс) [3]. Ступінь обтискання під час другого прокатування в межах 36–59% забезпечує крупне зерно 6–11 мм та найменший кут розсіювання текстури (5–6°). Сталь з такою структурою має дуже високі електромагнетні характеристики ($P_{15} = 1,39$ Вт/кг, $B_{25} = 1,92$ Гс). Різниця

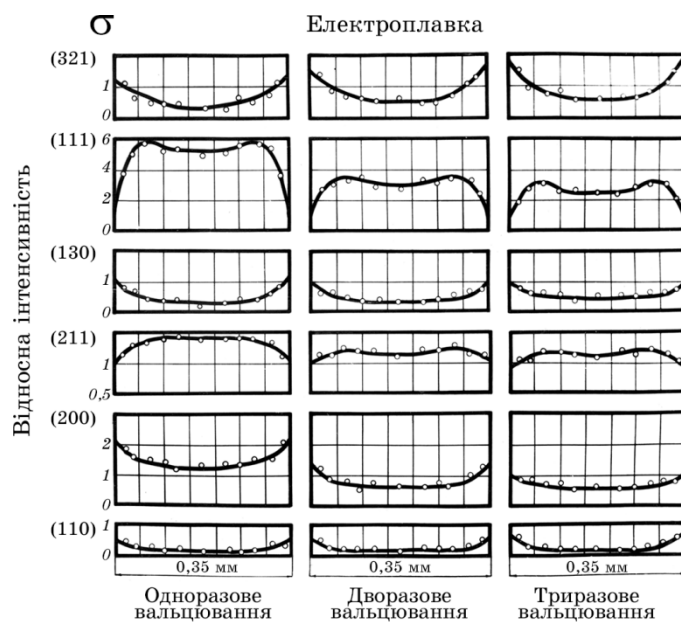


Рис. 2. Текстурні криві, зняті з зразків металу, виплавленого електроплавкою.

Fig. 2. Texture curves are taken from samples of metal smelted by electric melting.

середнього розміру зерен по товщині листа має значний вплив на процеси текстуроутворення.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для вивчення текстури первинної рекристалізації були зняті з холоднодеформованих зразків текстурні криві інтерференції (100), (200) у випромінненні FeK_{α} на рентгенівському дифрактометрі УРС-50 ИМ з використанням текстурної приставки ГП-2.

Текстурні криві зняті з зразків металу виплавленого в мартенівській печі та в індукційній електричній печі. Зміна інтенсивності дифракційного відбивання від зразків трансформаторної сталі по товщині листа після різних видів прокатування — одноразового, дворазового та триразового представлена на рис. 1, 2.

Зйомка цих самих зразків на просвічування на установці ДРОН-1 у випромінненні MoK_{α} уможливила побудувати повні полюсні фіг-

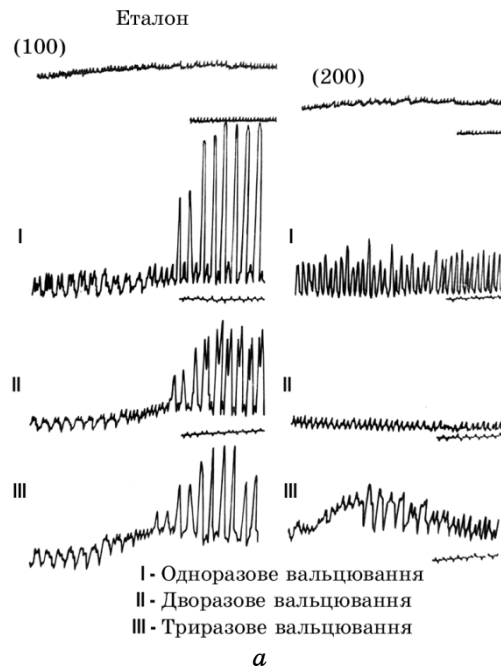
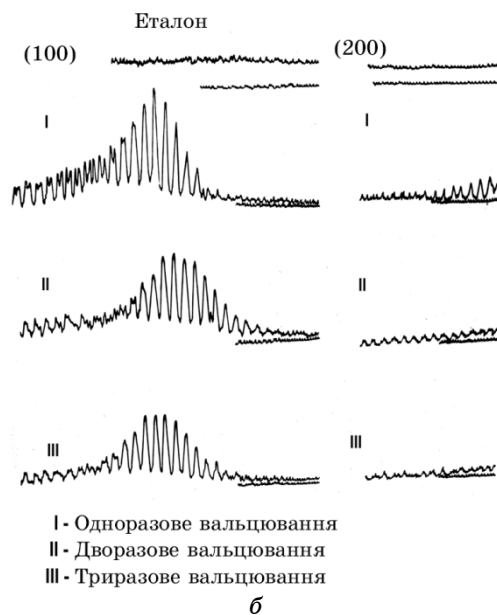


Рис. 3. Текстурні криві інтерференції холоднодеформованих зразків при відбиванні від площин (100) та (200) для листів, що піддавались томленню (а) та без томлення (б).

Fig. 3. Texture interference curves of cold-deformed samples when reflected from planes (100) and (200) for sheets subjected to languor (a) and without languor (b).



Продовження рис. 3.

Continuation of Fig. 3.

ури (рис. 4).

Дифрактометричні криві інтерференції (200) та (110) рекристалізованих зразків знято після 1-разового, 2-разового та 3-разового прокатування з використанням фокусування за Бреґгом–Брентано в випромінненні MoK_α (рис. 3). Дослідження зміни текстури по перерізу листа трансформаторної сталі проводили з дифрактометричних кривих інтерференції (200), (211), (321), (111), (130), (110) рекристалізованих зразків після одноразового, дворазового та триразового прокатування.

На рисунку 3 показано результати пошарового дослідження відношення інтегральної інтенсивності відбитків від досліджуваних площин зразків рекристалізованої сталі до інтенсивності відповідних ліній відпаленого порошку карбонільного заліза (безструктурного еталону).

За умовами експерименту зразки стравлювали по 0,02 мм і по 0,03 мм з одного боку до середини. Для запобігання травлення зворотної сторони зразки покривали спеціальним лаком. Для щавлення зразків використовували розчин такого складу: перекис Гідрогену — 4,0 ч., плавикова кислота — 1,0 ч., вода — 5,0 ч.

Співставлення інтенсивності цих ліній з інтенсивністю відповідних ліній безструктурного еталону дозволяє виявити розподіл по

товщині листа кристалів, у яких площини (100), (112), (110), (310), (111), (321) орієнтовані паралельно площині прокатування.

Кількість кристалів, орієнтованих площиною (321) паралельно поверхні листа, змінюється по перерізу листа від 120% на поверхні листа до 40% в середній його частині.

Для кристалів, орієнтованих площиною (111) паралельно поверхні листа виявлена така залежність: на поверхні кількість кристалів з таким орієнтуванням сягає 40%, на відстані 0,04 мм від поверхні листа — 300%, в середині листа — 250%.

Кількість кристалів, орієнтованих площиною (130) змінюється по перерізу листа не так суттєво (від 100% на поверхні листа та до 50% до середини).

Аналіза повних полюсних фігур, побудованих для зразків, що піддавались одноразовому, дворазовому та триразовому прокатуванню, показав, що після дворазового прокатування максимум поблизу напрямку прокатування розщеплюється надвоє, наближаючись до полюсів (111) [112]. Компонент текстури (111) [112] прояв-

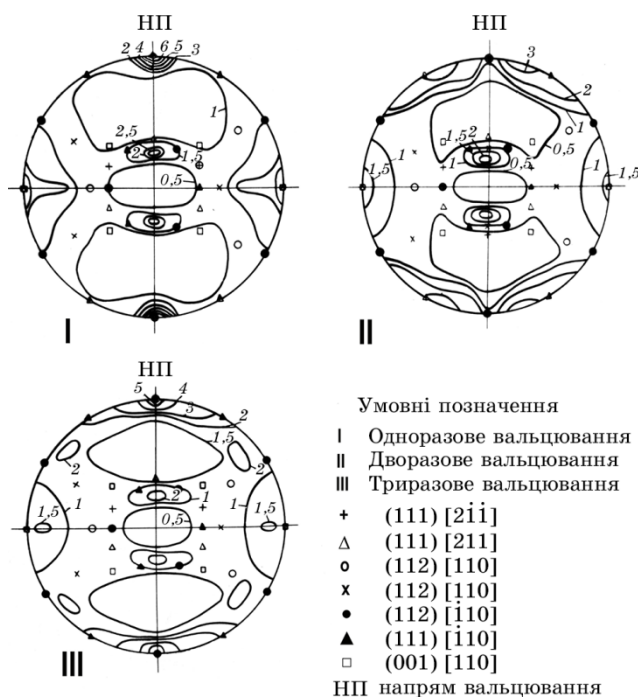


Рис. 4. Прямі полюсні фігури для зразків, одержаних одноразовим, дворазовим та триразовим прокатуванням.

Fig. 4. Straight pole shapes for samples obtained by single, double, and triple rolling.

ляється сильніше, отже кількість зерен з орієнтацією, близькою до ребрової більша (рис. 4).

На полюсних фігурах видно, що після дворазового прокатування текстурний максимум поблизу напрямку прокатування розщеплюється надвоє, наближаючись до полюсів (110) орієнтації (111) (211), а після одноразового прокатування він розміщений поблизу напрямку прокатування.

4. ВИСНОВКИ

1. Наші результати показали, що структура первинної рекристалізації є визначальною в формуванні високих електромагнетних властивостей готового листа трансформаторної сталі.

2. Згідно проведених досліджень можна рекомендувати одноразове прокатування для одержання готового листа трансформаторної сталі. В цьому випадку також формується досконала текстура так як кількість зерен з орієнтуванням близьким до ребрового є значною. Необхідною умовою формування заданої структури є проведення гомогенізуючого відпалу.

3. Гомогенізуючий відпал забезпечує виділення більш дисперсних неметалевих включень з твердого розчину. Це сприяє зменшенню середнього розміру зерен в структурі первинної рекристалізації, кращій стабілізації матриці неметалевими включеннями і формуванню більш досконалої ребрової текстури.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. А. Кудрин, *Теория и технология производства стали* (Москва: Мир, АСТ: 2003).
2. Б. В. Молотиллов, Л. В. Миронов, А. Г. Петренко, *Холоднокатаные электротехнические стали* (Москва: Металлургия: 1989).
3. Л. Б. Казаджан, *Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов* (Москва: ООО «Наука и технологии»: 2000).
4. А. Н. Иванов, *Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. Ч. 3. Конспект лекций для потока ФХ* (Москва: 2009).
5. М. Л. Лобанов, А. С. Юровских, Н. И. Кардонина, Г. М. Русаков, *Методы исследования текстур в материалах* (Екатеринбург: Издательство Уральского университета: 2014).
6. А. А. Кононов, М. А. Матвеев, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 1: 55 (2018).

REFERENCES

1. V. A. Kudrin, *Teoriya i Tekhnologiya Proizvodstva Stali* [Theory and Technology of Steel Production] (Moscow: Mir, АСТ: 2003) (in Russian).

2. B. V. Molotilov, L. V. Mironov, and A. G. Petrenko, *Kholodnokatanye Elektrotekhnicheskie Stali* [Cold Rolled Electrical Steels] (Moscow: Metallurgiya: 1989) (in Russian).
3. L. B. Kazadzhan, *Magnitnye Svoystva Elektrotekhnicheskikh Staley i Splavov* [Magnetic Properties of Electro-Technical Steels and Alloys] (Moscow: OOO 'Nauka i tekhnologii': 2000) (in Russian).
4. A. N. Ivanov, *Kristallografiya, Rentgenografiya i Elektronnaya Mikroskopiya. Vol. 3. Konspekt Lektsiy dlya Potoka FKh* [Crystallography, Radiography and Electron Microscopy. Vol. 3. Lecture Notes for the PC] (Moscow: 2009) (in Russian).
5. M. L. Lobanov, A. S. Yurovskikh, N. I. Kardonina, and G. M. Rusakov, *Metody Issledovaniya Tekstur v Materialakh* [Methods for Studying Textures in Materials] (Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo Universiteta: 2014) (in Russian).
6. A. A. Kononov and M. A. Matveev, *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, No. 1: 55 (2018) (in Russian).