

В.Г. Раздобреєв, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

Д.Г. Паламар, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГАРЯЧОЇ НЕСИМЕТРИЧНОЇ СОРТОВОЇ ПРОКАТКИ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ, МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СЛУЖБОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОТОВОГО ПРОКАТУ

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу процесу гарячої несиметричної прокатки на структурний стан, механічні властивості і експлуатаційні характеристики сортового прокату простої форми з рядової вуглецевої сталі. Для моделювання процесу несиметричної сортової прокатки у раніше розроблену в ПЧМ математичну модель були додані можливості урахування випадків прокатки у парі валків різного діаметра, прокатки у парі валків з різного матеріалу, прокатки з одним привідним та одним непривідним валками, прокатка з різними швидкостями у парі валків і ін. Розрахунки показали зниження сили прокатки до 10 % при несиметричному процесі прокатки у порівнянні з традиційним процесом прокатки. Дослідження особливостей процесу гарячої несиметричної прокатки (прокатка із зсувом) в порівнянні з традиційним процесом прокатки проводили в промислових умовах при виробництві квадратного профілю 12x12 мм з рядової низьковуглецевої сталі СтЗсп. Встановлено, що середні значення HRB , σ_B і σ_T в досліджених зразках практично не відрізняються, а середні показники δ_5 вище на 8 % (абс.) або на ~ 27 % (відн.) в зразках, що були прокатані за технологією несиметричної прокатки, ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки. Оцінка щільності дислокацій за допомогою рентгеноструктурного методу показала, що під час гарячої несиметричної прокатки фіксується менша на ~ 46 % щільність дислокацій внаслідок активного протікання процесів полігонізації і рекристалізації *in-situ* в ході деформації. При цьому середні значення мікропоршень кристалічної ґратки фериту на 21 % нижче в зразках, отриманих способом несиметричної прокатки ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою. Вперше встановлено зниження сумарної швидкості атмосферної корозії у зразках, що були прокатані за технологією способом несиметричної прокатки (0,39 г/м²хгод) в порівнянні з зразками, які були прокатані за технологією традиційної прокатки (0,445 г/м²хгод).

Ключові слова: несиметрична сортова прокатка, традиційна прокатка, мікроструктура, мікротвердість, твердість, механічні властивості, швидкість атмосферної корозії.

Ссылка для цитирования: *Раздобрев В.Г., Паламар Д.Г.* Дослідження впливу гарячої несиметричної сортової прокатки на формування мікроструктури, механічних властивостей та службових характеристик готового прокату.

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Вступ. Використання пластичної деформації для формування структури і комплексу механічних та експлуатаційних характеристик металів є доволі поширеним прийомом. Однак, незважаючи на великий обсяг наукової та технологічної інформації в даній області, проблему не можна вважати повністю вивченою, так як в основі багатьох технологій лежать емпіричні закономірності. Розширення теоретичних і модельних уявлень про природу формування властивостей металевих матеріалів в процесі деформації є актуальним і представляє не тільки науковий, але і практичний інтерес, оскільки відкриває можливості для оптимізації існуючих та створення нових науково обґрунтованих технологічних процесів отримання матеріалів з підвищеним комплексом властивостей.

Мета роботи. Встановлення впливу гарячої несиметричної прокатки на формування структурного стану, механічних властивостей та експлуатаційних характеристик при виробництві сортового прокату простої форми з рядової вуглецевої сталі.

Сучасний стан питання. Підвищення якості готової продукції, а також скорочення витрат на її виробництво є одним з актуальних напрямків у сучасній металургії. Сучасні вимоги до виробників полягають в необхідності забезпечення виробництва готового прокату широкого розмірного і марочного сортаменту з високим рівнем механічних і службових властивостей при зниженні енерго-, матеріало- і трудомісткості виробництва. Крім того, споживачі висувають високі вимоги до точності профілю, станом поверхні і товарного вигляду.

Безперервна прокатка є основним способом отримання масової металопродукції: листів, сорту, катанки і ін. Підвищення якісних характеристик (міцності, пластичності і ін.) стало можливим при комплексному підході до розробки технологічних режимів виробництва сортового прокату і катанки на безперервних станах з урахуванням температурно-швидкісних і деформаційних параметрів, а також умов формозміни і післядеформаційного охолодження, які безпосередньо впливають на формування дрібнозернистої мікроструктури під час гарячої деформації. У той же час в пошуках способів отримання ультрадрібнозернистої структури сталі і сплавів, яке забезпечує підвищення міцності сталей при підвищенні або збереженні високих пластичних властивостей, підвищення корозійної стійкості і ударної в'язкості перспективним видається використання специфічних способів деформаційного впливу – здійснення інтенсивної пластичної деформації (деформація в умовах високих всебічних тисків): прокатка-пресування,

гідроекструзія, квазігідроекструзія, газоекструзія, несиметрична прокатка та ін.

Останнім часом у світовій металургії спостерігається тенденція до реалізації так званих складних випадків прокатки (несиметричних процесів прокатки). До них слід віднести прокатку в валках нерівного діаметра, прокатку з різними окружними швидкостями валків, прокатку з різними умовами тертя на контакті з верхнім і нижнім валками і т.п.

Розглядом питань несиметричних процесів прокатки займаються досить давно [1], оскільки на практиці не існує «ідеально симетричного» процесу прокатки. Діаметри валків (а значить і їх окружні швидкості) завжди різняться хоча б в невеликій мірі.

У практиці прокатного виробництва часто спостерігаються ситуації, коли умови зовнішнього тертя на верхньому і нижньому валках не однакові. Є безліч причин, що викликають цю різницю. Наприклад, при прокатці нагрітих заготовок пічна окалина з їх нижньої сторони легко обсапється, а на верхній поверхні зберігається протягом декількох проходів (до кантування).

У всіх випадках, коли коефіцієнти тертя на валках різні, процес прокатки набуває рис несиметричного процесу. Це знаходить відображення в нерівності деформаційних параметрів процесу.

Виходячи з вищесказаного, виникає необхідність визначення основних підходів відносно розробки технологічних рішень, які дозволять реалізовувати отримання прокату з підвищеним рівнем механічних властивостей та експлуатаційних характеристик (міцність і пластичні властивості, ударна в'язкість, корозійна стійкість і ін.).

Подібним питанням присвячені роботи українських вчених і науковців з ближнього зарубіжжя [2-13].

Так, наприклад, автори роботи [14] прийшли до висновку, що прокатка з різними окружними швидкостями валків дозволяє домогтися істотного зменшення розмірів зерен за рахунок значних зсувних деформацій. Результати експериментів по прокатці кременистої сталі показали можливість отримання зерна розміром 10-50 нм. В даному випадку мова йде про так звану поверхневу нанокристалізацію, яка істотно змінює механічні та службові властивості матеріалів, а так само підвищує опір втомі, зносу і корозії.

В роботі [15] показано, що найбільш керованим параметром несиметричною прокатки є співвідношення лінійних швидкостей валків. Експериментальні дослідження, проведені в умовах товстолистового стану 3000 Маріупольського металургійного комбінату, показали, що за допомогою різних швидкостей валків можна домогтися зниження сили прокатки на 10 %.

Необхідно підкреслити, що переважна частина досліджень, які стосуються вивчення несиметричних випадків прокатки, присвячена виробництву листового прокату.

У той же час слід зазначити, що у випадку сортової прокатки звичайні показники деформації стають змінними по ширині калібру і відрізняються для різних елементів профілю. Перш за все, відрізняється величина абсолютного і відносного обтиску в калібрі. Крім того, важливою особливістю деформації в калібрах є неодноразність початку обтиснень всіх елементів перерізу розкату при його вході в калібр.

Що стосується процесу сортової прокатки, в літературі наводяться окремі відомості про вплив деяких факторів, властивих несиметричного процесу прокатки, на розмір зерна деформованого металу.

Матеріал та методика досліджень. Дослідження особливостей гарячої несиметричної прокатки (прокатка із зсувом) в порівнянні з традиційною схемою прокатки проводили в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» при виробництві квадратного профілю. Матеріалом досліджень були зразки промислового виробництва (квадрат розміром 12x12 мм з граничними відхиленнями + 0,3/ - 0,5 мм звичайної точності групи В1 за ДСТУ 4746:2007 або за ГОСТ 2591-2006) після гарячої деформації рядової вуглецевої сталі марки СтЗсп за ДСТУ 2651:2005 або за ГОСТ 380-2005. Механічні властивості для даного виду прокату за ДСТУ 4484:2005 або за ГОСТ 535-2005 повинні відповідати вимогам, наведеним в табл. 1.

Таблиця 1 – Механічні властивості сортового і фасонного прокату із сталі вуглецевої звичайної якості для квадрату 12x12 мм за ДСТУ 4484: 2005/ГОСТ 535-2005

Марка сталі	Механічні властивості			
	Тимчасовий опір розриванню, $\sigma_B, Н/мм^2$	Границя плинності, $\sigma_T, Н/мм^2$, не менш	Відносне видовження, $\delta_5, \%$ не менш	Згинання до паралельності сторін в холодному стані (a – товщина зразка, мм; d – діаметр оправки, мм.)
СтЗсп	370-480	245	26	$d = a$

Сталь прокатувалася в умовах безперервного дрібносортового стану ДС 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за традиційною технологією, що зазвичай використовуються при прокатці такої сталі в заводських умовах, і за технологією несиметричної прокатки (прокатка із зсувом (ПЗ)). Технологічний процес виробництва сортового прокату в умовах усіх сортових станів ПАО «АрселорМіттал Кривий Ріг» передбачає використання ліній прискореного охолодження готового прокату з

рядових низьковуглецевих марок сталей. Після прокатки за діючою технологією та за дослідницькою технологією відбирали зразки довжиною 400 мм для проведення подальших досліджень.

Для проведення досліджень застосовували такі методи: світлову мікроскопію, кількісну металографію з використанням аналізатора Epiquant, механічні випробування для визначення твердості, мікротвердості, характеристик міцності і пластичності, рентгеноструктурний аналіз та корозійні випробування. Вимірювання мікротвердості фериту та перліту проводили в периферійних (середні значення по 20 вимірам в різних зонах – чисельник) і центральних (середні значення по 10 вимірам в центрі – знаменник) зонах.

Рентгеноструктурні дослідження проводили зйомкою зі шліфа в дифрактометрі ДРОН-3 і апараті УРС-2.0.

Прискоренні корозійні випробування проводили в штучно створених та контрольованих корозійно-активних середовищах і умовах, що імітують вплив корозійних факторів при атмосферній корозії [16]. Для дослідження атмосферної корозії (з кисневою деполяризацією) використовували лабораторну установку типу «Корозійне колесо» зі змінним зануренням зразків в електроліт (3 % розчин NaCl). Корозійний процес здійснювали чергуванням занурення зразків у агресивне середовище і висушуванням їх на повітрі. Цикл «змочування-висихання» становив 26 хв. (5 хв. занурення в електроліт, решту часу – на повітрі). Повне висихання зразків після змочування забезпечували застосуванням вентилятора. Мінімальна тривалість корозійних випробувань становила 750 циклів змінного занурення (сталій процес). Оцінювання корозійної стійкості зразків, що досліджувались проводили по зміні маси зразків відповідно з ГОСТ 9. 308-85 [16]. При цьому фіксували величину поверхні зразків та час її контакту з агресивним середовищем. При проведенні корозійних випробувань та оцінки корозійної стійкості по втраті маси зразки до випробувань піддавали шліфуванню, знежирювали органічними розчинниками (спиртом, ацетоном та ін.). На кожную експериментальну точку відбирали по 5-7 зразків. Продукти корозії після завершення корозійних випробувань видаляли за ГОСТ 9.907-83 [17] механічним засобом м'якими абразивами (чорнильна та олівцева гумки). Після видалення продуктів корозії зразки промивали проточною водою, обробляли спиртом і/або ацетоном, висушували 24 години в ексикаторі та зважували. Надавали також візуальну оцінку результатів при дослідженні корозії: наявність та характер поверхневих продуктів корозії (рівномірне, нерівномірне, виразкові, щільні, пухкі та ін.).

Результати досліджень. Для моделювання процесу несиметричної сортової прокатки у раніше розроблену в ІЧМ математичну модель [18, 19] були додані можливості урахування випадків прокатки у парі валків

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

різного діаметра, прокатки у парі валків з різного матеріалу, прокатки з одним привідним та одним непривідним валками, прокатка з різними швидкостями у парі валків і ін.

Розрахунки показали зниження сили прокатки до 10 % при несиметричному процесі прокатки у порівнянні з традиційним процесом прокатки. За методикою роботи [20] оцінили деформацію, яка накопичується при гарячій прокатці із зсувом. Так, при прокатці із зсувом деформацію можна розкласти на деформацію прокатки і деформацію зсуву. Для визначення ступеню деформації прокатки в робочій кліті використовували формулу:

$$e = \ln\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (1)$$

де e – ступінь деформації;
 S – площа розкату після деформації, мм²;
 S_0 – площа розкату до деформації, мм².

Розрахунок показав, що одинична ступінь деформації при прокатці становить $e = 0,36$. Деформацію зсуву розраховували по формулі, яка використовується при визначенні деформації при рівноканальному кутовому пресуванні (РККП) [20]:

$$e = 2 \frac{\cot\theta}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

де e – ступінь деформації;
 θ – кут каналу при рівноканальному кутовому пресуванні, градус.

Після спрощення та усереднення деформації, що накопичується, отримали оцінку середнього значення деформації, що накопичується у калібрі робочої кліті при зсуві $e = 0,14$. Таким чином, загальна деформація, що накопичується буде дорівнювати: $e = 0,36 + 0,14 = 0,5$, що на 40 % більш ніж у випадку прокатки без зсуву. Дані оцінювання задовільно узгоджуються з експериментальними вимірюваннями потужності, яка споживається двигунами валків робочої кліті [20]. Як відомо, потужність прямо пропорційна зв'язана з тиском на робочій інструмент та деформацією, що накопичується. В роботі [21] встановлена експериментально різниця потужності, яка споживається складає 30 %, що на 10 % менш, чим зміна деформації у наших оцінках. Таким чином, оцінка ступеню деформації, яка виконана розрахунковим шляхом, різниться на 10 % з експериментально встановленим значенням та є

цілком допустимим з урахуванням того, що для її оцінки скористалися формулою для розрахунку деформації при РККП.

Основні результати досліджень, отримані в роботі, зведені в табл. 2 та 3, з яких випливає наявність різниці механічних і корозійних властивостей сталі, а також внутрішньої будови зразків, які були прокатані за традиційною технологією і з використанням несиметричної прокатки.

Таблиця 2 – Результати досліджень механічних властивостей та корозійних випробувань зразків квадрату 12x12 мм зі Ст3сп, що були отримані традиційною та несиметричною прокаткою

Характеристика	Спосіб гарячої сортової прокатки	
	Традиційна прокатка	Несиметрична прокатка
Твердість, HRB	67	67
Тимчасовий опір розриванню, $\sigma_B, H/mm^2$	435	432
Границя плинності, $\sigma_T, H/mm^2$	313	315
Відносне видовження, $\delta_5, \%$	30,0	38,0
Згинання до паралельності сторін в холодному стані при $d = a$	задовільно	задовільно
Швидкість атмосферної корозії, $K, г/м^2 \cdot год$	<u>0,43-0,46*</u> 0,445	<u>0,38-0,40</u> 0,39

Примітка. * – У чисельнику значення мінімальної і максимальної швидкості корозії; в знаменнику – середні швидкості корозії.

Таблиця 3 – Результати досліджень металографічного та рентгенографічного аналізів зразків квадрату 12x12 мм зі Ст3сп, що були отримані традиційною та несиметричною прокаткою

Характеристика	Спосіб гарячої сортової прокатки	
	Традиційна прокатка	Несиметрична прокатка
Структура, кількість Ф/П, %	Ф+П (64/36)	Ф+П (75/25)
Мікротвердість фериту периферія/центр, H/mm^2	1560/1360	1520/1580
Мікротвердість перліту периферія/центр, H/mm^2	3170/3150	3090/3110
Бал зерна фериту в центрі зразка	10	11
Бал колоній перліту в центрі зразка	10	11
Щільність дислокацій $\rho, см^{-2}$	$1,6 \times 10^{10}$	$0,85 \times 10^{10}$
Мікропорушення кристалічної ґратки $\Delta a/a, мкрад$	0,19	0,15

З аналізу даних, наведених в табл. 2 можна відмітити наступне. Не дивлячись на те, що середні значення HRB , σ_B і σ_T в цих зразках практично не відрізняються, середні показники δ_5 вище на 8 % (абс.) або на ~ 27 % (відн.) в зразках, що були прокатані за способом несиметричної прокатки, ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки. За даними корозійних випробувань вперше встановлено, що сумарна швидкість атмосферної корозії (корозія з кисневою деполяризацією) знижується на ~ 12,5 % у зразках, що були прокатані за способом несиметричної прокатки, ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки. Причини цього буде надано нижче, після аналізу результатів металографічного дослідження зразків квадрату 12x12 мм зі СтЗсп, які були отримані традиційною та несиметричною прокаткою.

З аналізу даних, наведених в табл. 3 визначено, що мікроструктура зразків, виготовлених зі сталі марки СтЗсп за традиційною технологією з подальшим прискореним охолодженням водою та після гарячої несиметричної прокатки з подальшим прискореним охолодженням водою складається з фериту та перліту. Співвідношення кількості фериту до кількості перліту в зразках, які отримали за традиційною технологією дорівнювало 64 % Ф і 36 % П, а в зразках, які отримали за способом гарячої несиметричної прокатки дорівнювало 75 % Ф до 25 % П. При визначенні розмірів перліту і фериту методами світлової мікроскопії використовували стандартну шкалу. Значення розмірів в балах для центральних зон поперечних зрізів квадрату 12x12 мм, отриманих за традиційною технологією дорівнювало для зерна фериту – 10 та колоній перліту – 10. Значення розмірів в балах для центральних зон поперечних зрізів квадрату 12x12 мм, отриманих за способом гарячої несиметричної прокатки дорівнювало для зерна фериту – 11 та колоній перліту – 11. Таким чином мікроструктура центральних зон поперечних зрізів квадрату 12x12 мм, отриманих за способом гарячої несиметричної прокатки більш дрібнозерниста ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки.

Зниження сумарної швидкості атмосферної корозії у зразках, що були прокатані способом несиметричної прокатки в порівнянні з зразками, які були прокатані за технологією традиційної прокатки, обумовлено тим, що зменшення розміру дійсного зерна фериту, внаслідок чого електрохімічна активність границь його зерен зменшується за рахунок зниження на них концентрації розчинених в сталі домішок (кисню, азоту, фосфору та ін.), викликаної в свою чергу, зростанням протяжності границь. При цьому збільшення кількості перліту в структурі сталі з 25% (несиметрична прокатка) до 36 % (традиційна прокатка) підвищує не тільки твердість та міцнісні властивості, але й корозійну активність готового прокату.

Під час аналізу даних, наведених в табл. 3 встановлено, що середні значення мікротвердості фериту на периферійних ділянках і перліту, як на периферії так і у центрі мало відрізняються у зразках, що досліджувались. Однак середнє значення мікротвердості фериту у центрі зразків, отриманих способом несиметричної прокатки вище на 220 Н/мм^2 , ніж в зразках, отриманих традиційною прокаткою. Оскільки довірчі інтервали вимірювань середніх значень мікротвердості фериту значно менш у зразках, отриманих способом несиметричної прокатки ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою, то можна констатувати, що зразки, які отримані способом несиметричної прокатки більш структурно однорідні і менш напружені. Це підтверджується рентгеноструктурними дослідженнями. При гарячій несиметричній прокатці формується велика кількість дрібнодисперсних зерен з висококутовими границями і малою щільністю дислокацій. Середнє значення щільності дислокацій (ρ , см^{-2}) в зразках, отриманих при традиційній гарячій сортовій прокатці дорівнювало $1,6 \times 10^{10}$, а в зразках, які були прокатані при несиметричній прокатці – $0,85 \times 10^{10}$. При цьому середні значення мікропорушень кристалічної ґратки ($\Delta a/a$, мкрад) в зразках, які були отримані традиційною прокаткою дорівнювали 0,19, а в зразках, що отримали несиметричною прокаткою – 0,15. Більш низький рівень напруженості кристалічної ґратки і сприяє підвищенню пластичності. Таким чином рівень мікропорушень в зразках, отриманих способом несиметричної прокатки на 21 % та щільність дислокацій на ~ 46 % нижче, ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою.

В результаті гарячої прокатки з використанням як валків однакового так і різного діаметру здійснюється динамічна рекристалізація, яка полягає в зміні розмірів і форми зерен і їх орієнтації в процесі деформації. Відомо [22-26], що в металах і сплавах з невисокою енергією дефекту упаковки, зокрема Cu, Ni, γ -Fe, динамічна рекристалізація проходить по переривчастому механізму. Зародками нових зерен стають ділянки, обмежені великокутовими границями, які можуть сформуватися з субзерна при збільшенні кута розорієнтування в процесі деформації. Таким чином, нові зерна утворюються практично без міграції великокутових границь, і динамічна рекристалізація здійснюється шляхом зародження центрів з великокутовими границями [27, 28]. Надалі відбувається їх міграція в напрямку ділянок з більшою щільністю дислокацій.

Наші дані показують, що зерна, сформовані після несиметричної прокатки, незважаючи на невеликий розмір і малу щільність дислокацій усередині зерна, не схильні до швидкого зростання. У матеріалі не спостерігається розвитку бурхливої збиральної рекристалізації. Це свідчить про рівноважні границі, що утворилися при несиметричній

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

прокатці. Тому схильність до збиральної рекристалізації нижче, а значить, рушійна сила менше.

Проведені дослідження показують, що в ході деформації з використанням способу гарячої несиметричної прокатки утворюється структура, що відрізняється кількістю дефектів всередині зерна, а також характеризується наявністю рівноважних висококутових границь зерен, в той час як прокатка з використанням технології традиційної гарячої сортової прокатки призводить до формування дрібнодисперсної структури з великою кількістю дефектів і розвиненими субграницями. Отримані експериментальні результати показують, що формується аустенітна структура, яка на різних етапах деформації, характеризується різним перебігом процесів гарячого зміцнення і знеміцнення.

Таким чином, за допомогою проведених комплексних досліджень показано, що використання способу гарячої несиметричної сортової прокатки, формує більш досконалу і однорідну суб- і мікроструктуру рядової сталі марки СтЗсп після її прокатки й охолодження в сортові профілі простої форми. Найбільш простим способом здійснення комбінованої пластичної деформації зі зсувом в умовах діючих прокатних станів українських підприємств є прокатка з використанням валків різного діаметру. Проте, для відповіді на питання якою повинна бути різниця між діаметрами верхнього та нижнього валків у кожному конкретному випадку, потрібно проведення додаткових досліджень.

Висновки.

1. Досліджені закономірності формування структури, механічних властивостей і експлуатаційних характеристик зразків квадратного профілю 12x12 мм зі сталі Ст.Зсп, отримані під час гарячої несиметричної сортової прокатки та прокатки за традиційною технологією з подальшим прискореним охолодженням.
2. Встановлено, що спосіб гарячої несиметричної сортової прокатки характеризується великими разовими обтисканнями за прохід, що викликає значну гарячу деформацію аустеніту і сприяє активному розвитку рекристалізації. Підтвердженням цього є більші середні значення мікротвердості фериту в центрі зразків готового прокату (на 220 Н/мм²), отриманого за способом гарячої несиметричної сортової прокатки.
3. Визначено підвищення пластичних характеристик на ~ 27 % (відн.) у готовому прокаті, який було отримано за способом гарячої несиметричної сортової прокатки в порівнянні з прокатом, що були отримані за традиційною технологією. При цьому показники міцності та твердості знаходяться приблизно на однаковому рівні.
4. Оцінка щільності дислокацій за допомогою рентгеноструктурного методу показала, що під час гарячої несиметричної прокатки фіксується

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып. 33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

менша на $\sim 46\%$ щільність дислокацій внаслідок активного протікання процесів полігонізації і рекристалізації *in-situ* в ході деформації. При цьому середні значення мікропоршень кристалічної ґратки фериту на 21% нижче в зразках, отриманих способом несиметричної прокатки ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою. Тобто ґратка фериту у зразках, отриманих традиційною прокаткою більш деформована ніж у зразках, отриманих способом несиметричної прокатки.

5. Вперше встановлено, що значення швидкості атмосферної корозії (з кисневою деполяризацією) менше у зразках, які були піддані способу гарячої несиметричної сортової прокатки ($0,39 \text{ г/м}^2\text{хгод}$) ніж у зразках, які були піддані традиційній гарячій сортової прокатці ($0,445 \text{ г/м}^2\text{хгод}$).

Библиографический список

1. Грудев А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов // М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
2. Васильев М.А., Прокопенко Г.И., Филатова В.С. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации // Успехи физ. мет. – 2004. – Т.5. – №3. – С. 345-399. <https://doi.org/10.15407/ufm.05.03.345>
3. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов // М.: Изд-во ЭЛИЗ, 2007. – 148 с.
4. Васильев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией // М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. Лесюк Е.А. Технология получения нанокристаллической структуры в поверхностных слоях массивных деталей из конструкционных и инструментальных сталей // Технология металлов. – 2008. – №7. – С. 29-35.
6. Забелин С.Ф. Технологии поверхностной нанокристаллизации металлов и сплавов / С.Ф. Забелин, А.А. Васильев, А.А. Дорожков, А.А. Фефанов // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2015. – №2. – С. 36-44.
7. Никитенко О.А. Формирование ультрамелкозернистой структуры углеродистой стали в процессе горячей пластической деформации / О.А. Никитенко, Ю.Ю. Ефимова, М.С. Жеребцов, Е.С. Селиванова // Инновационные технологии в машиностроении и материаловедении: сб. тезисов 2-ой научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 29 сен.-3 окт., 2014. – С. 96-100.
8. Kawalek Anna, Henrik Duja Анализ изменений сил и моментов несимметричной плоской прокатки // Вестник МГТУ. – 2013. – № 5. – С.28-33.
9. Найзабеков А.Б. О реализации интенсивных пластических деформаций при прокатке в калибрах / А.Б. Найзабеков, Б.Б. Быхин, К.А. Ногаев, М.Б. Быхин // Sci. and world. – 2014. – №10. – Ч. 1. – С. 45-49.
10. Mekhtiev A.D. Влияние несимметричной прокатки в конических валках на микроструктуру низкоуглеродистой стали / A.D. Mekhtiev, E.M. Azbanbaev,

- A.Z. Sagulov [et al.] // *Metalurgija* (Zagreb). – 2015. – Vol. 54. – №4. – S. 623-626.
11. Пат. 25313337. Российская Федерация, МПК В21В 1/00 (2006.01). Способ асимметричной прокатки металла / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, Н.А. Горкин, заявитель и патентообладатель ЧерметИнформСистемы. – №2013111708/02; заявл. 15.03.2013; опубл. 20.10.2014.
 12. Пат. 2518028. Российская Федерация, МПК В21В 13/10 (2006.01). Рабочая клетка стана для прокатки профилей в калибре / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, В.В. Курбан, заявитель и патентообладатель ЧерметИнформСистемы. – №2013104893/02; заявл. 05.02.2013; опубл. 10.06.2014.
 13. Пат. 2518358. Российская Федерация, МПК В21В 13/10 (2006.01). Рабочая клетка стана для прокатки профилей в калибре / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, В.В. Курбан, заявитель и патентообладатель ЧерметИнформСистемы. – №2013104846/02; заявл. 05.02.2013; опубл. 10.06.2014.
 14. *Liu Gang*. Нанокристаллизация поверхности кремнистой стали в зависимости от параметров несимметричной прокатки / Liu Gang, Ma Ye, Zhang Ruijun, Wang Xiaolan [et al.] // *Acta met. sin.* – 2014. – Vol. 50. – №9. – PP. 1071-1077.
 15. *Скляр В.О.* Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие. // Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
 16. *Покрyтия* металлические и неметаллические. Методы ускоренных коррозионных испытаний: ГОСТ 9.308-85. // М.: Изд-тво стандартов, 1986. – 20 с.
 17. *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний* : ГОСТ 9.907-2007 (ISO 8407:1991). // М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 19 с.
 18. *Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В.* Оптимизация расхода энергии при непрерывной сортовой прокатке // К.: Наукова думка, 2008. – 191 с.
 19. *Жучков С.М., Кулаков Л.В., Лохматов А.П.* Управление температурным режимом непрерывной сортовой прокатки (Теоретические и технологические основы) // М.: Теплотехник, 2008. – 144 с.
 20. *Пашинская Е.Г., Завдоев А.В.* Применение прокатки со сдвигом и традиционного волочения для формирования структуры и свойств малоуглеродистых сталей // *Физика и техника высоких давлений.* – 2012. – Т.22. – №3. – С. 1-12.
 21. *Паламар Д.Г.* Розробка спрощеного методу оцінки деформаційного опрацювання центральних зон перерізу розкату з безперервною заготовки при прокатці у калібрах / Д.Г. Паламар, С.О. Воробей, С.В. Єршов, В.Г. Раздобреєв, І.Ю. Приходько // *Зб. наукових праць Дніпровського Державного Технічного Університету. Кам'янське: ДДТУ, 2018.* – С. 74-83.
 22. *Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я.* Прочность и пластичность холоднодеформированной стали // К.: Наукова думка, 1974. – 232 с.

23. *Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З.* Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов // М.: Наука, 2002. – 438 с.
24. *Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. и др.* Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов // К.: Наукова Думка, 1989. – 256 с.
25. *Кайбышев О.А.* Научные основы, достижения и перспективы сверхпластической деформации // Уфа: Гилем, 2000. – 150 с.
26. *Добаткин С.В., Капуткина Л.М.* Карты структурных состояний для оптимизации режимов горячей деформации сталей // Физика металлов и металловедение. – 2001. – Т. 91. – № 1. – С. 79-89.
27. *Костина М.В., Дымов А.В., Блинов В.М.* Влияние пластической деформации на структуру и свойства высокоазотистых сплавов системы Fe-Cr // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 1. – С. 1-7.
28. *Ahmonri A., Torizuka S., Nagai K.* Evolution of ultrafine-grained ferrite structure through multi-pass warm caliber rolling // Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 2003. – Vol. 89. – № 7 – P. 781-788. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.89.7_781

References

1. Grudev A.P. (1988). *Teoriya prokatki: Uchebnik dlya vuzov [Rolling theory: Textbook for universities]*. Moskva: Metallurgiya, 1988, 240 p. (In Russian).
2. Vasil'yev M.A., Prokopenko G.I. & Filatova V.S. (2004). Nanokristallizatsiya metallicheskikh poverkhnostey metodami intensivnoy plasticheskoy deformatsii [Nanocrystallization of metal surfaces by methods of severe plastic deformation]. *Uspekhi fiz. met. [Progress in Physics of Metals]*, 2004, Vol.5, 3, 345-399. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/ufm.05.03.345>
3. Lyakishev N.P. & Alymov M.I. (2007). *Polucheniye i fiziko-mekhanicheskiye svoystva ob'yemnykh nanokristallicheskikh materialov [The preparation and physico-mechanical properties of bulk nanocrystalline materials]*. Moskva: Izd-tvo ELIZ, 2007, 148 p. (In Russian).
4. Valiyev R.Z. & Aleksandrov I.V. (2000). *Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey [Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation]*. Moskva: Logos, 2000, 272 p. (In Russian).
5. Lesyuk Ye.A. (2008). Tekhnologiya polucheniya nanokristallicheskoy struktury v poverkhnostnykh sloyakh massivnykh detaley iz konstruksionnykh i instrumental'nykh staley [Technology of obtaining a nanocrystalline structure in the surface layers of massive parts from structural and tool steels]. *Tekhnologiya metallov [Metal technology]*, 2008, 7, 29-35. (In Russian).
6. Zabelin S.F., Vasil'yev A.A., Dorozhkov A.A. & Feofanov A.A. (2015). Tekhnologii poverkhnostnoy nanokristallizatsii metallov i splavov. [Technologies of surface nanocrystallization of metals and alloys]. *Uchenyye zapiski ZabGGPU [Scientific notes of the Transbaikalsk SU]*. 2015, 2, 36-44. (In Russian).
7. Nikitenko O.A., Yefimova Yu.Yu., Zherebtsov M.S. & Selivanova Ye.S. (2014). Formirovaniye ul'tramelkozernistoy struktury uglerodistoy stali v protsesse goryachey plasticheskoy deformatsii. [Formation of ultrafine-grained structure of

- carbon steel in the process of hot plastic deformation]. *Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii i materialovedenii: sb. tezisov 2-oy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (29 sen.-3 okt. 2014) [Innovative technologies in mechanical engineering and materials science: collection of articles. abstracts of the 2nd scientific-practical conference with international participation]*. Perm', 2014, 96-100. (In Russian).
8. Kawalek Anna & Henrik Dyja (2013). Analiz izmeneniy sil i momentov nesimmetrichnoy ploskoy prokatki [Analysis of changes in forces and moments of asymmetric flat rolling]. *Vestnik MGTU [Vestnik of MSTU]*, 2013, 5, S.28-33. (In Russian).
 9. Nayzabekov A.B., Bykhin B.B., Nogayev K.A. & Bykhin M.B. (2014). O realizatsii intensivnykh plasticheskikh deformatsiy pri prokatke v kalibrakh. [On the implementation of intense plastic deformations during rolling in calibers]. *Sci. and world*, 2014, Vol.10, 1, 45-49. (In Russian).
 10. Mekhtiev A.D., Azbanbaev E.M. & Sagulov A.Z. et al. (2015). Vliyaniye nesimmetrichnoy prokatki v konicheskikh valkakh na mikrostrukturu nizkouglerodistoy stali [Influence of asymmetric rolling in tapered rolls on the microstructure of low-carbon steel]. *Metallurgiya [Metallurgy]*. Zagreb, 2015, Vol. 54, 4, 623-626. (In Russian).
 11. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukov M.A., & Gorkin N.A. *Sposob asimmetrichnoy prokatki metalla [Method of asymmetric metal rolling]*. RF Patent 25313337, (2006) ChermetInformSistemy. (In Russian).
 12. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukov M.A., & Kurban V.V. *Rabochaya klet' stana dlya prokatki profiley v kalibre [Working stand of the mill for rolling profiles in caliber]*. RF Patent 2518028 (2006), ChermetInformSistemy. (In Russian).
 13. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukov M.A., & Kurban V.V. *Rabochaya klet' stana dlya prokatki profiley v kalibre [Working stand of the mill for rolling profiles in caliber]*. RF Patent 2518358 (2006), ChermetInformSistemy. (In Russian).
 14. Liu Gang, Ma Ye, Zhang Ruijun & Wang Xiaolan et al. (2014). Nanokristallizatsiya poverkhnosti kremnistoy stali v zavisimosti ot parametrov nesimmetrichnoy prokatki [Nanocrystallization of the surface of silicon steel depending on the parameters of asymmetric rolling]. *Acta met. sin.*, 2014, Vol. 50, 9, 1071-1077. (In Russian).
 15. Sklyar V.O. (2014). *Innovatsionnyye i resursoberegayushchiye tekhnologii v metallurgii. Uchebnoye posobiye [Innovative and resource-saving technologies in metallurgy. Tutorial.]*. Donetsk: DonNTU, 2014, 224 p. (In Russian).
 16. Pokrytiya metallicheskiye i nemetallicheskiye. Metody uskorennykh korrozionnykh ispytaniy [Coverings metallic and non-metallic. Accelerated corrosion test methods]. (1986). GOST 9.308-85, 1986, 20 p. (In Russian).
 17. Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally, splavy, pokrytiya metallicheskiye. Metody udaleniya produktov korrozii posle korrozionnykh ispytaniy [Unified system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, metallic coatings. Methods for removal of corrosion products after corrosion tests]. (2008). GOST 9.907-2007 (ISO 8407:1991), 2008, 19 p. (In Russian).

18. Zhuchkov S.M., Lokhmatov A.P. & Kulakov L.V. (2008). *Optimizatsiya raskhoda energii pri nepreryvnoy sortovoy prokatke [Optimization of energy consumption during continuous section rolling]*. Kiev: Naukova dumka, 2008, 191 p. (In Russian).
19. Zhuchkov S.M., Kulakov L.V. & Lokhmatov A.P. (2008). Upravleniye temperaturnym rezhimom nepreryvnoy sortovoy prokatki (Teoreticheskiye i tekhnologicheskkiye osnovy) [*Temperature control of continuous section rolling (Theoretical and technological foundations)*]. Moskva: Teplotekhnika, 2008, 144 p. (In Russian).
20. Pashinskaya Ye.G. & Zavdoveyev A.V. (2012). Primeneniye prokatki so sdvigom i traditsionnogo volocheniya dlya formirovaniya struktury i svoystv malouglerodistykh staley [Application of shear rolling and traditional drawing for the formation of structure and properties of low-carbon steels]. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy [Physics and high pressure technology]*, 2012, Vol.22, 3, 1-12. (In Russian).
21. Palamar D.H, Vorobey S.O., Yershov S.V., Razdobryeyev V.H. & Prykhod'ko I.Yu. (2018). Rozrobka sproshchenoho metodu otsinky deformatsiynoho opratsyuvannya tsentralnykh zon pererizu rozkatu z bezperervnolytoyi zahotovky pry prokattsi u kalibrakh. [Development of the deformation processing of the central zones based on the method of evaluation of the deformation processing of the central zones by rolling out the workpiece without interruption during rolling at calibers]. *Zb. naukovykh prats Dniprovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu [Collection of scientific works of the Dnieper State Technical University]*. Kamyanske: DDTU, 2018, 74-83. (in Ukrainian).
22. Gridnev V.N., Gavrilyuk V.G. & Meshkov Yu.Ya. (1974). *Prochnost' i plastichnost' kholodnodeformirovannoy stali [Strength and plasticity of cold-worked steel]*. Kiev: Naukova dumka, 1974, 232 p. (In Russian).
23. Kaybyshev O.A. & Utyashev F.Z. (2002). *Sverkhplastichnost', izmel'cheniye mikrostruktury i obrabotka trudnodeformiruyemykh splavov [Superplasticity, microstructure refinement and processing of hard-to-form alloys]*. Moskva: Nauka, 2002, 438 p. (In Russian).
24. Trefilov V.I., Moiseyev V.F. & Pechkovskiy E.P. et al. (1989). *Deformatsionnoye uprochneniye i razrusheniye polikristallicheskikh materialov [Deformation hardening and destruction of polycrystalline materials]*. Kiev: Naukova Dumka, 1989, 256 p. (In Russian).
25. Kaybyshev O.A. (2000). *Nauchnyye osnovy, dostizheniya i perspektivy sverkhplasticheskoy deformatsii [Scientific foundations, achievements and prospects of superplastic deformation]*. Ufa: Gilem, 2000, 150 p. (In Russian).
26. Dobatkin S.V. & Kaputkina L.M. (2001). Karty strukturnykh sostoyaniy dlya optimizatsii rezhimov goryachey deformatsii staley [Structural state maps for optimization of hot deformation modes of steels]. *Fizika metallov i metallovedeniye [The Physics of Metals and Metallography]*. 2001, Vol. 91, 1, 79-89. (In Russian).
27. Kostina M.V., Dymov A.V. & Blinov V.M. (2002). Vliyaniye plasticheskoy deformatsii na strukturu i svoystva vysokoazotistykh splavov sistemy Fe-Cr [Influence of plastic deformation on the structure and properties of high-nitrogen

- alloys of the Fe-Cr system]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*. 2002, 1, 1-7. (In Russian).
28. Ahmonri A., Torizuka S. & Nagai K. (2003). Evolution of ultrafine-grained ferrite structure through multi-pass warm caliber rolling. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2003, Vol. 89, 7, 781-788. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.89.7_781

В.Г. Раздобрев, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

Д.Г. Паламарь, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Исследование влияния горячей несимметричной сортовой прокатки на формирование микроструктуры, механических свойств и служебных характеристик готового проката

Аннотация. Целью работы является исследование влияния процесса горячей несимметричной прокатки на структурное состояние, механические свойства и эксплуатационные характеристики сортового проката простой формы из рядовой углеродистой стали. Для моделирования процесса несимметричной сортовой прокатки в ранее разработанную в ИЧМ математическую модель были добавлены возможности учета случаев прокатки в паре валков разного диаметра, прокатки в паре валков из разного материала, прокатки с одним приводным и одним неприводными валками, прокатка с различными скоростями в паре валков и др. Расчеты показали снижение силы прокатки до 10 % при несимметричном процессе прокатки по сравнению с традиционным процессом прокатки. Исследование особенностей процесса горячей несимметричной прокатки (прокатка со сдвигом) по сравнению с традиционным процессом прокатки проводили в промышленных условиях при производстве квадратного профиля 12x12 мм из рядовой низкоуглеродистой стали Ст3сп. Установлено, что средние значения HRB, σ_B и σ_T в исследованных образцах практически не отличаются, а средние показатели δ_5 выше на 8% (абс.) или на ~ 27% (отн.) в образцах, которые были прокатаны по технологии несимметричной прокатки, чем в образцах, которые были прокатаны по технологии традиционной прокатки. Оценка плотности дислокаций с помощью рентгеноструктурного метода показала, что во время горячей несимметричной прокатки фиксируется меньше на ~ 46% плотность дислокаций в результате активного протекания процессов полигонизация и рекристаллизации *in-situ* в ходе деформации. При этом средние значения микронарушений кристаллической решетки феррита на 21% ниже в образцах, полученных способом несимметричной прокатки, чем в образцах, полученных традиционной прокаткой. Впервые установлено снижение суммарной скорости атмосферной коррозии в образцах, которые были прокатаны по технологии несимметричной прокатки (0,39 г/м²ч) по сравнению с образцами, которые были прокатаны по технологии традиционной прокатки (0,445 г/м²ч).

Ключевые слова: горячая несимметричная сортовая прокатка, традиционная прокатка, микротвердость, твердость, механические свойства, скорость атмосферной коррозии

V.G. Razdobreev, PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992

D.G. Palamar, Junior Researcher (Engin.), ORCID 0000-0002-9503-3248

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Investigation of the influence of hot asymmetric long products on the formation of the microstructure, mechanical properties and service characteristics of finished products

Summary. The aim of the work is to study the influence of the process of hot asymmetric rolling on the structural state, mechanical properties and operational characteristics of long products of simple form from ordinary carbon steel. To simulate the process of asymmetric high-quality rolling, the mathematical model previously developed in the ISI added the possibility of taking into account cases of rolling in a pair of rolls of different diameters, rolling in a pair of rolls of different materials, rolling with one drive and one non-drive rolls, rolling at different speeds in a pair of rolls and other. The calculations showed a reduction in rolling force to 10 % with an asymmetric rolling process compared to the traditional rolling process. The study of the features of the process of hot asymmetric rolling (shear rolling) compared with the traditional rolling process was carried out under industrial conditions in the production of a 12x12 mm square profile from ordinary low-carbon steel St3sp. It was found that the average values of HRB, σ_B , and σ_T in the studied samples practically do not differ, and the average values of δ_5 are higher by 8 % (abs.) or ~ 27 % (rel.) In samples that were rolled using the asymmetric rolling technology than in samples that were rolled using traditional rolling technology. The estimation of dislocation density by the X-ray diffraction method showed that during hot asymmetric rolling, the dislocation density is reduced by ~ 46% due to the active flow of *in-situ* polygonization and recrystallization processes during deformation. In this case, the average values of the microfractures of the crystalline lattice of ferrite are 21% lower in the samples obtained by the method of asymmetric rolling than in the samples obtained by traditional rolling. For the first time, a decrease in the total atmospheric corrosion rate was found in samples that were rolled using asymmetric rolling technology (0.39 g/m²xh) compared to samples that were rolled using traditional rolling technology (0.445 g/m²xh).

Keywords: asymmetric hot rolling, traditional rolling, microhardness, hardness, mechanical properties, atmospheric corrosion rate

For citation: Razdobrev V.H., Palamar D.H. Doslidzhennya vplyvu haryachoyi nesymetrychnoyi sortovoyi prokatky na formuvannya mikrostruktury, mekhanichnykh vlastyivostey ta sluzhbovykh kharakterystyk hotovoho prokatu. [Investigation of the influence of hot asymmetric rolling on the formation of microstructure, mechanical properties and performance characteristics of finished products.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] J 2020, 34. 156-172. (In Ukrainian) DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-156-172

Статья поступила в редакцию сборника 11.09.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33