

УДК: 669.017:621.771.25:621.78.019.82.083.133  
DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.33.403

## РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ МАСИ АБО ТОВЩИНИ ШАРУ ОКАЛИНИ НА ПОВЕРХНІ БУНТОВОГО ПРОКАТУ ПІСЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

ПАРУСОВ Е. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЛУЦЕНКО В. А.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, с. н. с.,  
ПАРУСОВ О. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЧУЙКО І. М.<sup>4</sup>, канд. техн. наук,  
ГОЛУБЕНКО Т. М.<sup>5</sup>, канд. техн. наук,  
СІВАК Г. І.<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [lutsenko-va@i.ua](mailto:lutsenko-va@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

<sup>4</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

<sup>5</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [sumer@i.ua](mailto:sumer@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3583-211X

<sup>6</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [allasivak@ukr.net](mailto:allasivak@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Виробництво різноманітних металовиробів з використанням гарячої пластичної деформації або термічної обробки неминуче пов'язане з процесами окиснення сталі внаслідок її взаємодії з повітрям або атмосферою печі. При цьому відбуваються зміни хімічного складу поверхневого шару металу, утворення оксидів (окаліни), трансформація їх фазового складу в процесі обробки, що, у свою чергу, залежить від температури, швидкості та способу охолодження металу. Найбільш поширений вид металовиробів, для яких окаліна не тільки нормується вимогами відповідних стандартів, а й істотно впливає на процес подальшої переробки, - бунтовий прокат. Окаліна вуглецевої сталі, що утворюється за високих температур, складається з трьох оксидів (FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), фактичний вміст яких впливає на формування різної щільності, а, отже, і різної питомої маси окаліни за однакової товщини її шару на поверхні прокату. Через те, що відомі способи визначення питомої маси окаліни є досить трудомісткими і вимагають відповідної кваліфікації технічного персоналу, існує необхідність у розробленні універсального способу якісної і кількісної оцінки оксидів, які утворюються на поверхні прокату з вуглецевої сталі залежно від зміни технологічних параметрів виробництва. *Мета роботи* - розроблення способу визначення питомої маси або товщини шару окаліни, яка утворюється на поверхні бунтового прокату різного діаметра з урахуванням її фактичного хімічного складу. *Результати.* На основі відомих хімічних і фізичних закономірностей процесів, що відбуваються за високотемпературної взаємодії поверхні вуглецевих сталей з атмосферним повітрям, розроблено універсальну математичну модель, яка дозволяє визначити один із показників якості і може бути рекомендована як альтернативний спосіб визначення питомої маси або товщини шару окаліни на поверхні бунтового прокату в умовах дослідних лабораторій або металургійних підприємств.

**Ключові слова:** бунтовий прокат; питома маса окаліни; фазовий склад

## РАЗРАБОТКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ИЛИ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ОКАЛИНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ БУНТОВОГО ПРОКАТА ПОСЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

ПАРУСОВ Э. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЛУЦЕНКО В. А.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, с. н. с.,  
ПАРУСОВ О. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЧУЙКО И. Н.<sup>4</sup>, канд. техн. наук,  
ГОЛУБЕНКО Т. Н.<sup>5</sup>, канд. техн. наук,

СИВАК А. И.<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [lutsenko-va@i.ua](mailto:lutsenko-va@i.ua), ORCIDID: 0000-0002-4604-5592

<sup>3</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

<sup>4</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

<sup>5</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [sumer@i.ua](mailto:sumer@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3583-211X

<sup>6</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [allasivak@ukr.net](mailto:allasivak@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

**Аннотация. Постановка проблемы.** Производство различных металлоизделий с использованием горячей пластической деформации или термической обработки неизбежно связано с процессами окисления стали в результате ее взаимодействия с воздухом или атмосферой печи. При этом происходят изменения химического состава поверхностного слоя металла, образование оксидов (окалина), трансформация их фазового состава в процессе обработки, что, в свою очередь, зависит от температуры, скорости и способа охлаждения металла. Наиболее массовым видом металлоизделий, для которых окалина не только нормируется требованиями соответствующих стандартов, но и оказывает существенное влияние на процесс последующей переработки, является бунтовой прокат. Окалина углеродистой стали, образующаяся при высоких температурах, состоит из трех оксидов (FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), фактическое содержание которых влияет на формирование различной плотности, а, следовательно, и различной удельной массы окалины при одинаковой толщине её слоя на поверхности проката. Ввиду того, что известные способы определения удельной массы окалины достаточно трудоёмки и требуют соответствующей квалификации технического персонала, существует необходимость в разработке универсального способа качественной и количественной оценки оксидов, образующихся на поверхности проката из углеродистой стали в зависимости от изменения технологических параметров производства. **Цель** - разработка способа определения удельной массы или толщины слоя окалины, образующейся на поверхности бунтового проката различного диаметра с учетом её фактического химического состава. **Результаты.** На основе известных химических и физических закономерностей процессов, происходящих при высокотемпературном взаимодействии поверхности углеродистых сталей с атмосферным воздухом, разработана универсальная математическая модель, которая позволяет определить один из нормируемых показателей качества и может быть рекомендована в качестве альтернативного способа определения удельной массы или толщины слоя окалины на поверхности бунтового проката в условиях исследовательских лабораторий или металлургических предприятий.

**Ключевые слова:** бунтовой прокат; удельная масса окалины; фазовый состав

## DEVELOPMENT OF UNIVERSAL METHOD FOR DETERMINING SPECIFIC MASS OR THICKNESS OF SCALE CRUST ON THE SURFACE OF WIRE ROD AFTER CONTINUOUS COOLING

PARUSOV E.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc.(Tech.), Head Researcher,*

LUTSENKO V.A.<sup>2</sup>, *Dr. Sc.(Tech.), Head Researcher,*

PARUSOV O.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc.(Tech.), Head Researcher,*

CHUIKO I.N.<sup>4</sup>, *Cand. Sc.(Tech.),*

GOLUBENKO T.M.<sup>5</sup>, *Cand. Sc.(Tech.),*

SIVAK H. I.<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [lutsenko-va@i.ua](mailto:lutsenko-va@i.ua), ORCIDID: 0000-0002-4604-5592

<sup>3</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

<sup>4</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

<sup>5</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [sumer@i.ua](mailto:sumer@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3583-211X

<sup>6</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [allasivak@ukr.net](mailto:allasivak@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

**Abstract. Problem statement.** The production of various metal products using hot plastic deformation or heat treatment is inevitably linked to the processes of oxidation of steel because of its interaction with the air or atmosphere of the furnace. At the same time, changes occur in the chemical composition of the surface metal layer, the formation of oxides (scale), the transformation of their phase composition during the processing, which, in turn, depends on the temperature, speed and method of cooling the metal. The most widespread type of metal products, for which the scale is standardized not only by the requirements of the relevant standards, but also has a significant impact on the process of subsequent processing, is wire rod. The carbon steel scale, formed at high temperatures, consists of three oxides ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), the actual content of which affects the formation of various density, and, consequently, different specific mass of scale with the same thickness of its layer on the rolled surface. In view of the fact that the known methods for determining the specific mass of the scale are rather laborious and require appropriate qualifications of technical personnel, there is a need to develop a universal method for qualitative and quantitative assessment of oxides formed on the surface of carbon steel, depending on changes in the technological parameters of production. **Purpose.** Development of a method for determining the specific mass or thickness of the scale layer formed on the surface of a wire rod of various diameters, with its actual chemical composition. **Results.** Based on the known chemical and physical patterns of processes occurring during high-temperature interaction of the surface of carbon steels and atmospheric air, a universal mathematical model has been developed that allows to elaborate one of the standardized quality indicators and it can be recommended as an alternative method for determining the specific mass or thickness of the scale on the surface wire rod in the research laboratories of metallurgical enterprises.

**Keywords:** wire rod; specific mass of scale crust; phase composition

**Постановка проблеми.** Виготовлення металовиробів із використанням гарячої пластичної деформації або термічної обробки неминуче пов'язане з процесами окиснення сталі внаслідок її взаємодії з повітрям або атмосферою печі. При цьому відбуваються зміни хімічного складу поверхневого шару металу, утворення оксидів (окалини), трансформація їх фазового складу в процесі обробки, що, у свою чергу, залежить від температури, швидкості та способу охолодження металу.

Один із найбільш масових видів металовиробів, для яких поверхнева окалина відіграє істотну роль у процесі подальшої переробки, - бунтовий прокат. Цей вид металопрокату становить основну сировину у виробництві холодно-деформованого дроту з широким спектром сфер застосування, а якісна підготовка поверхні бунтового прокату до волочіння - одна з умов забезпечення стабільного технологічного процесу під час переробки волочінням [1].

Нагрів у печі вихідної заготовки перед початком деформації має значення лише з точки зору зменшення витрат металу на утворення первинної окалини та зниження розвитку процесів знеуглецювання поверхні сталі. Загальна товщина та структура окалини на поверхні бунтового прокату, який піддається охолодженню на

транспорті лінії Стелмор, залежить від температури виходу металу з останньої кліти дротяного блоку та швидкості безперервного охолодження до температур  $\sim 200$  °C [2]. Зміна зазначених параметрів істотно впливає на процеси формування окалини і визначає кінцевий результат - фактичну масу окалини та товщину її шару на поверхні прокату.

Окалина вуглецевої сталі, що утворюється за високих температур, як правило, складається з трьох оксидів:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [3]. Оксиди розташовуються шарами у відповідності зі зменшенням вмісту кисню у напрямку від зовнішнього шару до внутрішнього. За твердості металу  $\sim 140$  HV твердість  $\text{FeO}$  складає 270...350 HV,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  - 420...500 HV та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 1 300 HV [4]. Вюстит має мінімальну адгезію до поверхні металу, незначну абразивність та найкращим чином видаляється як механічним, так і хімічним способами [5]. Тому окалина, яка складається переважно з  $\text{FeO}$ , найбільш сприятлива для підготовки поверхні бунтового прокату до волочіння на переробці металевих виробів [5].

При виході з останньої кліти дротяного блоку на поверхні прокату практично відсутня окалина, і чим вища температура завершення деформації, більша тривалість охолодження, тим товщій формується шар

окаліни. В інтервалі температур початку прискореного повітряного охолодження 850...950 °C за різних швидкостей на поверхні високовуглецевої сталі може утворюватися окаліна, яка складається з ~ 64...90 % FeO, 36...10 % Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у вигляді слідів [6; 7]. За високих температур термодинамічно стабільні всі три оксиди, але у міру зниження температури (нижче 570 °C) вюстит може розпадатися з утворенням Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe. З метою збереження у складі окаліни максимальної кількості FeO слід застосовувати регульоване двоступінчасте охолодження сталі, особливо в інтервалі температур 600...200 °C зі швидкістю охолодження не меншою за 4 °C/c (рис. 1).

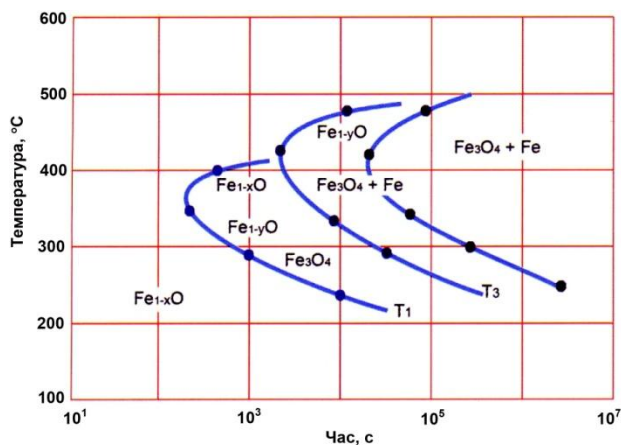


Рис. 1. Діаграма ізотермічного перетворення оксидів заліза [8] / Fig. 1. Diagram of isothermal conversion of iron oxides [8]

У разі зниження швидкості охолодження кількість Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в окаліні зростає, що значно ускладнює процес підготовки поверхні прокату до волочіння.

**Мета роботи** – розроблення універсального способу визначення питомої маси або товщини шару окаліни, що утворюється на поверхні бунтового прокату, з урахуванням її фактичного хімічного складу.

**Матеріал і методика досліджень.** Матеріалом служили промислові партії бунтового прокату діаметром 5,5...12,0 мм із вмістом вуглецю 0,05...0,87 %, охолодженого після гарячої пластичної деформації на транспортері лінії Стелмор. Товщину шару окаліни визначали

металографічним методом за допомогою світлового оптичного мікроскопа «Axiovert 200 M MAT» на поперечних шліфах. Загальну масу окаліни на поверхні прокату визначали за методикою компанії «Beckaert» та згідно з вимогами ДСТУ 3683-98 [9]. Фазовий аналіз складу окаліни визначали на рентгенівському дифрактометрі «ДРОН-3» у спектрі Co-K $\alpha$  випромінювань із застосуванням K $\beta$ -фільтра в діапазоні кутів лічильника 30...55°. Для кількісного аналізу використовували інтегральні інтенсивності дифракційних ліній без накладень: (200) для FeO, (311) для Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, (112) для Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Під час атестацій бунтового прокату згідно з відповідними стандартами контролюють комплекс якісних показників, в результаті чого визначають питому масу або товщину шару окаліни на поверхні металу. Існуючі способи визначення маси окаліни на поверхні прокату доволі трудомісткі та вимагають проведення великої кількості операцій, що включають відбір зразків, їх підготовку, зважування, розтягування з відносним подовженням 6...7 %, травлення та повторне зважування зразків. Отримані величини мас після проведених операцій визначають середню масу окаліни на поверхні прокату, залежно від параметрів режиму деформаційно-термічної обробки.

Існуючі графічні залежності для визначення загальної маси окаліни на поверхні сталі мають обмежене використання через те, що в умовах реального виробничого процесу не здатні враховувати фактичний хімічний склад оксидів за зміни швидкості повітряного охолодження прокату. Це викликає необхідність проведення вищезазначених трудомістких операцій та витрати зайвого часу. Тому автори цієї статті розробили універсальний спосіб визначення якісних показників окаліни, що формується на поверхні прокату круглого перерізу, який не залежить від зміни параметрів виробничого процесу.

Запропонований спосіб базується на математичній моделі, яка враховує хімічні й фізичні процеси, що відбуваються за

високотемпературної взаємодії поверхні вуглецевої сталі з повітрям, а також враховує подальше охолодження прокату до температури приміщення цеху з різними швидкостями.

Визначення питомої маси окалини на поверхні бунтового прокату. Для розрахунку питомої маси окалини на поверхні бунтового прокату попередньо визначається середня товщина її шару, а також хімічний склад. У проведенні розрахунків утворення гематиту ( $Fe_2O_3$ ) не враховували, спираючись на те, що зазначений оксид у виробництві бунтового прокату зустрічається в складі окалини у вигляді слідів й істотно не повинен впливати на підсумковий результат. Щільність окалини заданого хімічного складу визначається за такою формулою:

$$\rho_{ок} = \frac{\rho_{FeO} \cdot m_{FeO} + \rho_{Fe_3O_4} \cdot m_{Fe_3O_4}}{100}, \quad (1)$$

де  $\rho_{ок}$  – щільність окалини заданого хімічного складу,  $кг/м^3$ ;  $\rho_{FeO}$  – щільність вюститу,  $5\,745\,кг/м^3$ ;  $\rho_{Fe_3O_4}$  – щільність магнетиту,  $5\,170\,кг/м^3$ ;  $m_{FeO}$  – масова частка вюститу в окалині, %;  $m_{Fe_3O_4}$  – масова частка магнетиту в окалині, %.

Далі розраховується показник ( $K$ ), який характеризує співвідношення маси кисню до маси заліза в окалині:

$$\rho_{Fe} \cdot (1+K) \cdot d^2 - (4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}) \cdot d + 4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}^2 - D^2 \cdot \rho_{Fe} \cdot (1+K) = 0, \quad (3)$$

де  $\rho_{Fe}$  – щільність заліза,  $7\,874\,кг/м^3$ ;  $d$  – діаметр прокату за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло до окалини, м;  $h_{ок}$  – середня товщина шару окалини на поверхні прокату, м;  $D$  – номінальний діаметр прокату, м.

$$\underbrace{\rho_{Fe} \cdot (1+K) \cdot d^2}_{ax^2} + \underbrace{-(4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}) \cdot d}_{bx} + \underbrace{4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}^2 - D^2 \cdot \rho_{Fe} \cdot (1+K)}_c = 0$$

Визначивши усі необхідні дані, можна знайти питому масу окалини на поверхні

$$K = \frac{m_O}{m_{Fe}} = \frac{22,27 \cdot m_{FeO} + 27,64 \cdot m_{Fe_3O_4}}{77,73 \cdot m_{FeO} + 72,36 \cdot m_{Fe_3O_4}}, \quad (2)$$

де  $K$  – показник співвідношення маси кисню до маси заліза в окалині;  $m_O$  – масова частка кисню в окалині заданого складу, %;  $m_{Fe}$  – масова частка заліза в окалині заданого складу, %;  $m_{FeO}$  – масова частка вюститу в окалині, %;  $m_{Fe_3O_4}$  – масова частка магнетиту в окалині, %.

За високих температур частина заліза з поверхні прокату витрачається на формування окалини. Після завершення процесів окиснення сталі фактичний діаметр прокату відрізняється від початкового (номінального) на величину шару заліза, яке перейшло в окалину. Попередньо встановивши за допомогою металографічного аналізу середню товщину шару окалини, яка сформувалася під час повітряного охолодження, для коректного визначення її питомої маси на поверхні прокату необхідно розрахувати діаметр прокату за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло до окалини. Іншими словами, необхідно визначити фактичний діаметр прокату, на якому розташовується окалина з відомою товщиною її шару. Діаметр прокату за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло в окалину, розраховують за такою формулою:

Вираз (3) можна подати у вигляді квадратного рівняння, корінь якого і буде дорівнювати діаметру прокату  $d$  за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло в окалину:

бунтового прокату будь-якого номінального діаметра за допомогою виразу:

$$M_{ок} = \frac{((2h_{ок} + d)^2 - d^2) \cdot 0,127\rho_{ок}}{D^2}, \quad (4)$$

де  $M_{ок}$  – маса окалини на поверхні однієї тонни прокату, кг/т;  $h_{ок}$  – середня товщина шару окалини на поверхні прокату, м.

Метадослідження – розроблення універсального способу, а тому з урахуванням наведених даних стає можливим розв’язати зворотню задачу – знаючи питому масу окалини та її хімічний склад, визначити середню товщину шару окалини на поверхні прокату.

Визначення товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату. Для розрахунку середньої товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату попередньо визначається її питома маса і фактичний хімічний склад. Далі розраховується щільність окалини заданого хімічного складу і показник  $K$  згідно з виразами (1) й (2) відповідно. Діаметр прокату за вирахуванням товщини шару

заліза, яке перейшло до окалини, розраховується за формулою:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{D^2 \cdot M_{ок}}{1000 \cdot (1 + K)}}, \quad (5)$$

Маса окалини на одному погонному метрі прокату складає:

$$m_{ок} = \frac{(\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot \rho_{Fe} \cdot (1 + K))}{4}, \quad (6)$$

де  $\pi$  – постійна  $\Pi = 3,1416$ .

Отже, середня товщина шару окалини на поверхні прокату будь-якого номінального діаметра може бути визначена за допомогою формули:

$$h_{ок} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot m_{ок}}{\pi \cdot \rho_{ок}} + d^2} - d}{2}, \quad (7)$$

Узагальнені результати лабораторних досліджень особливостей формування окалини на поверхні бунтового прокату промислових партій наведені у таблиці.

Таблиця

Результати лабораторних досліджень окалини на поверхні бунтового прокату /  
Results of laboratory tests of scale on the surface of riot rolled metal

Кількість партій	Діаметр прокату, мм	Вміст вуглецю в сталі, %	Фазовий склад окалини, %			Товщина шару окалини, мкм	Питома маса окалини, кг/т
			FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
37	5,5...11,0	0,05...0,87	63...84	35...15	до 2	7...24	1,7...12,2

Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних визначення питомої маси окалини та її товщини на поверхні прокату круглого перерізу широкого спектра діаметрів і марок сталей показав високу збіжність результатів (похибка визначення результату не перевищувала 6%). Висока збіжність розрахункових і експериментальних даних,

отриманих для промислових умов на стандартному високошвидкісному прокатному стані, зумовила розроблення програмної оболонки CalcScale<sup>©</sup> (рис. 2), яка заснована на наведеному в статті алгоритмі розрахунку та може бути використана для оперативного контролю окалини на поверхні бунтового прокату [10].



Исходный диаметр проката			5,52 мм		
Масса окалины	4,58	кг/т			
Массовая доля FeO в окалине	72,5	%			
Физическая плотность стали	7874	кг/м <sup>3</sup>			
Плотность FeO	5745	кг/м <sup>3</sup>			
Плотность Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5170	кг/м <sup>3</sup>			
Массовая доля кислорода в FeO	22,27	%			
Массовая доля кислорода в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,36	%			
Массовая доля железа в FeO	77,73	%			
Массовая доля железа в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,36	%			

Результаты расчета:		
Плотность окалины заданного фазового состава	5 587	кг/м <sup>3</sup>
Массовая доля кислорода в окалине заданного фазового состава	23,75	%
Массовая доля железа в окалине заданного фазового состава	76,25	%
Толщина слоя железа перешедшего в окалину	4,82	мкм
Соотношение массы окалины и массы перешедшего железа	0,3114	
Диаметр проката без учета толщины слоя окалины	5,510	мм
Масса окалины на 1 м.п. проката	0,0009	кг/м
Толщина слоя окалины	8,9	мкм

Рис. 2. Робоче вікно програмної оболонки CalcScale<sup>©</sup> / Fig. 2. CalcScale program window<sup>©</sup>

Особливість програмної оболонки CalcScale<sup>©</sup> полягає у високій точності розрахунків, результати яких не залежать від зміни параметрів технологічного процесу виробництва бунтового прокату, тому що необхідні вимірювання та розрахунки проводяться на зразках, на поверхні яких уже сформувалась остаточна окалина із заданими властивостями.

**Висновки.** На основі хімічних і фізичних закономірностей процесів, які відбуваються за високотемпературної взаємодії поверхні вуглецевої сталі з повітрям, із подальшим безперервним охолодженням до кімнатної температури, розроблено математичну модель для визначення питомої ваги або товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату різного діаметра залежно від її фактичного фазового складу. Отримані результати лабораторних та експериментальних

досліджень дозволили створити універсальну програмну оболонку CalcScale<sup>©</sup>, яка може бути використана для контролю одного з показників якості бунтового прокату, що нормується відповідними стандартами, а саме для якісної і кількісної оцінки окалини в умовах дослідних лабораторій і металургійних підприємств.

Визначення товщини шару окалини на попередньо підготовлених поперечних мікрошліфах вуглецевої сталі може бути поєднане з металографічним аналізом параметрів структури, що суттєво прискорить час, необхідний для атестаційного контролю бунтового прокату в умовах заводських центральних лабораторій. Згідно з отриманими результатами досліджень подано заявку на отримання патенту України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки : монография / [В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. – 376 с.
2. В. В. Парусов Взаимосвязь толщины и удельной массы окалины на поверхности высокоуглеродистой катанки / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, И. Н. Чуйко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 27. – Ч. 2. – С. 26–29.
3. Уменьшение окалинообразования при производстве проката: монография / [В. И. Губинский, А. Н. Минаев, Ю. В. Гончаров]. – Киев : Техника, 1981. – 135 с.
4. Технология волочильного производства. Подготовка поверхности металла к волочению : учебн. пособ. / [Ю. И. Коковихин, Х. Н. Белалов, В. А. Пинашина]. – Свердловск : УПИ им. С. М. Кирова, 1979. – 92 с.
5. Э. В. Парусов Перспективы использования экологически чистого способа подготовки поверхности бунтового проката к волочению / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко, И. Н. Чуйко // Проблемы трибологии. – 2016. – № 2. – С. 74–82.
6. Покачалов В. В. Фазовый состав окалины и дефекты, возникающие при волочении проволоки / В. В. Покачалов // Метизы. – 2006. – № 3(13). – С. 30–33.

7. Парусов Э. В. Обоснование параметров регулируемого охлаждения бунтового проката из высокоуглеродистой стали в потоке проволочного стана 320/150 ОАО «ММЗ» / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко, С. В. Долгий, Л. В. Сагура // Вестник НТУУ «КПИ». – 2016. – № 2 (77). – С. 62–70.
8. Высокоскоростная прокатка катанки : монография / [А. А. Кугушин, Ю. А. Попов]. – Москва : Металлургия, 1982. – 144 с.
9. Парусов Э. В. Анализ различных методов определения нормируемых показателей качества бунтового проката из высокоуглеродистой стали, изготовленной на линии Стелмор / Э. В. Парусов // Развитие науки в XXI веке : тез. докл. 15-й междунар. конф. (июль 2016 г.). – 2016. – С. 116–121.
10. Е. В. Парусов Спосіб оперативного визначення маси або товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату / Е. В. Парусов, О. В. Парусов, І. М. Чуйко / Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні : міжнар. наук.-техн. конф. (26–28 березня 2019 р.). – Дніпро : НметАУ, 2019. – С. 34.

## REFERENCES

1. Parusov V.V., Syichkov A.B. and Parusov E.V. *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovyi proizvodstva vyisokoeffektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological bases of production of high species wire rod]. Dnepropetrovsk : ART-PRESS Publ., 2012, 376 p. (in Russian).
2. Parusov V.V., Parusov E.V. and Chuyko I.N. *Vzaimosvyaz tolschiny i udelnoy massyi okaliny na poverhnosti vyisokouglerodistoy katanki* [The correlation of thickness and specific weight of scale on the surface of high carbon rod]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Material Science, Engineering]. 2004, vol. 27, part 2, pp. 26–29. (in Russian).
3. Gubinskij V.I., Minayev A.N. and Honcharov Yu.V. *Umenshenie okalinoobrazovaniya pri proizvodstve prokata* [Decrease of scaling by production of rolled steel]. Kyiv : Tekhnika, 1981, 135 p. (in Russian).
4. Kokovihin Yu.I., Belalov H.N. and Pinashina V.A. *Tehnologiya volochilnogo proizvodstva. Podgotovka poverhnosti metalla k volocheniyu* [Technology of the drawing production. Preparation of the metal's surface to drawing]. Sverdlovsk : UPI named S.M. Kyrov, 1979, 92 p. (in Russian).
5. Parusov E.V., Syichkov A.B., Gubenko S.I. and Chujko I.N. *Perspektivy ispolzovaniya ekologicheskogo sposoba podgotovki poverhnosti buntovogo prokata k volocheniyu* [Outlook using environmentally friendly way of preparing of surfaces rolled steel to drawing]. *Problemy tribologii* [Tribology problems]. 2016, no. 2, pp. 74–82. (in Russian).
6. Pokachalov V.V. *Fazovyy sostav okaliny i defekty, voznikayushie pri volochenii provoloki* [The phase composition of scale and defects arising from wire drawing]. *Metizy* [Hardware]. 2006, no. 3 (13), pp. 30–33. (in Russian).
7. Parusov E.V., Syichkov A.B., Gubenko S.I., Dolgiy S.V. and Sahura L.V. *Obosnovaniye parametrov reguliruyemogo okhlazhdeniya buntovogo prokata iz vysokouglerodistoy stali v potoke provolochnogo stana 320/150 ОАО «ММЗ»* [Rationale of the parameters of controlled cooling of rolled steel from high-carbon steel in the stream of a 320/150 wire mill of JSC "MMZ"]. *Vestnik NTUU «KPI»* [Bulletin of NTUU "KPI"]. 2016, no. 2 (77), pp. 62–70. (in Russian).
8. Kugushin A.A. and Popov Yu.A. *Vysokoskorostnaya prokatka katanki* [High speed rolling rod]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1982, 144 p. (in Russian).
9. Parusov E.V. *Analiz razlichnykh metodov opredeleniya normiruemykh pokazateley kachestva buntovogo prokata iz vysokouglerodistoy stali, izgotovlennoy na linii Stelmor* [Analysis of various methods for determining the mass scale and the extent of its removability from the surfac highcarbon rolled steel made on line Stelmor]. *Tezisy dokladov 15-oy mezhdunar. konf. «Razvitie nauki v XXI veke»* [The development of science in the XXI century : abstracts of the report 15th Intern. conf.]. July, 2016, pp. 116–121. (in Russian).
10. Parusov E.V., Parusov O.V. and Chuiko I.M. *Sposib operatyvnoho vyznachennia masy abo tovshchyny sharu okalyny na poverkhni buntovoho prokatu* [Method of immediately determination of mass or thickness of scale on a surface of rolled steel rolled steel]. *Informatsiini tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduванні : Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia* [Information technologies in metallurgy and machine building : Intern. Sci.-Tech. Conf.]. Dnipro : NMetAU Publ., 26–28 of March, 2019, p. 34. (in Ukrainian)

Надійшла до редакції: 25.01.2018 р.