

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF CASTING PIPE STEEL GRADES

Modern steel production in metallurgy is dictated by the continuous tightening of requirements for metal quality. Along with the reduction in the level of harmful impurities (sulfur, phosphorus, gases, non-ferrous metals), increasing attention is paid to the degree of purity of steel in terms of non-metallic inclusions (NIM), which affects the anisotropy of properties, the threshold of cold brittleness, weldability, susceptibility to aging, etc.

Converter production has the greatest potential in the steelmaking sector due to its reliability and high cost-effectiveness. The development of technologies for the production of oil and gas pipelines is one of the most promising and sought-after industries in modern metallurgy. Analysis of the economic situation by leading specialists and scientists has shown that the price of oil and gas will steadily increase every year. This is due to the constant depletion of existing deposits and high resource and energy costs for the development of new deposits.

Therefore, the construction of reliable oil and gas pipelines will be the primary task of metallurgical enterprises that have managed to master modern technologies for smelting pipes of the 4th and 5th generations, which will always be competitive in the market.

The paper reviews global trends in the production of high-strength large-diameter oil and gas pipelines in European countries, Japan and Ukraine. Conclusions are drawn about the prospects for the development of technologies in this area for our country.

Using global trends, an analysis of the possibilities of producing steel for oil and gas pipelines of the fourth and fifth generations at the Mariupol Ilyich Steel Plant (MMKI) was performed, as well as an analysis of problems that may arise during the smelting of these steels.

Keywords: oxygen-converter production, steel, technological cycle, product range, continuous casting machine, mold, non-metallic inclusions, slab, quality.

Стаття надійшла 30.05.2025р.

УДК 669.162.22

doi.org/10.31498/2522-9990292025330252

Черевко О.О., Щербаков С.В.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО КЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ

У статті розглянуто проблеми підвищення ефективності конвертерного виробництва сталі шляхом впровадження автоматизованих систем з динамічним керуванням, що ґрунтуються на безперервному отриманні та обробці інформації про параметри технологічного процесу.

Проаналізовано існуючі підходи до математичного моделювання конвертерних процесів. Наведено можливості практичного застосування статичних та динамічних моделей, що використовуються для розрахунку шихти та матеріального балансу плавки, описують кінетику процесів, зокрема, швидкість знеуглецювання та зміну температури. Показано, що поєднання статичних і динамічних моделей дозволяє створити комплексну систему керування, здатну здійснювати автоматичне ведення технологічного процесу.

Метою дослідження є розробка програмного забезпечення, яке поєднує в собі функції статичного та динамічного розрахунку параметрів конвертерної плавки, а також забезпечує візуалізацію технологічних операцій та роботи конвертерного обладнання.

Запропоноване програмне забезпечення розроблене на базі 2D та 3D ігрового рушію загального призначення Godot Engine, що має такі переваги, як безкоштовність, кросплатформеність та підтримку різних мов програмування. Програмне забезпечення створене з використанням мови GDScript, 3D-моделей, розроблених у середовищі Blender, та скриптів, які описують поведінку окремих елементів системи. Програмне забезпечення реалізує візуалізацію основних етапів конвертерної плавки та керування технологічним обладнанням. Окрім візуалізації, програма моделює процеси конвертерної плавки на базі статичних та динамічних розрахунків.

Розглянуті моделі адекватно відображають реальні процеси конвертерної плавки. Розроблене програмне забезпечення може бути використане як для автоматичного керування технологічним процесом, так і для навчання та тренування персоналу. Впровадження системи динамічного керування конвертерною плавкою дозволить підвищити ефективність конвертерного виробництва, покращити якість сталі та зменшити собівартість продукції.

Ключові слова: *киснево-конвертерний процес, комп'ютерне моделювання, візуалізація, статична та динамічна модель конвертерної плавки, система автоматичного регулювання.*

Постановка проблеми. Проаналізувавши проблеми автоматизації конвертерного виробництва, можна дійти висновку, що у вітчизняних конвертерних цехах відсутня велика кількість елементів, які широко використовуються на закордонних підприємствах і здійснюють суттєвий вплив на показники якості сталі, ресурсо-, енергозбереження та екологію.

Одним з найбільших недоліків є відсутність ефективної автоматизованої системи з динамічним керуванням процесом виплавки сталі. З її допомогою можуть бути отримані найбільш точні результати, але вона є доволі складною і потребує постійного і безперервного надходження дискретної інформації про параметри сталеплавильної ванни. Знання цих параметрів дозволило б корегувати розрахунки по ходу плавки і тим самим надавати точніші кінцеві результати [1]. Робота такої системи базується на динамічній моделі, яка забезпечує розрахунок прогнозованої маси рідкої сталі, швидкості знеуглецювання, вмісту вуглецю під час продувки і додувки, а також здійснює контроль температури конвертеру і процесу шлакоутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найважливішими параметрами конвертерної плавки є швидкість знеуглецювання і вміст вуглецю. Процес знеуглецювання проходить у дифузійному режимі, та при $[C] < 0,15-0,2 \%$ відбувається заміна абсорбційного шару на поверхні металу, тобто реакція переходить в стадію лімітування переносу вуглецю з об'єму ванни до поверхні реагування. Подальші дослідження дозволили розвинути теорію і довести, що критичний вміст вуглецю залежить від технічних параметрів процесу [2]. На початку продувки при високій масовій частці вуглецю швидкість його окислення залежить від інтенсивності подачі кисню в зону реакції, тому що знеуглецювання переважно протікає на міжфазній поверхні в зоні контакту дуттєвого струменя з ванною. У зв'язку з великим окислювальним потенціалом в реакційній зоні одночасно окислюються всі елементи чавуну. При цьому основний гальмівний вплив на процес знеуглецювання ванни чинять процеси окислення кремнію і марганцю, які мають більш сильну спорідненість до кисню. При температурі розплаву 1350-1400 °C починається інтенсивне знеуглецювання конвертерної ванни, причому максимальна швидкість окислення вуглецю досягається в середині плавки [3]. Ґрунтуючись на цих дослідженнях, були запропоновані два алгоритми визначення масової

Металургія

долі вуглецю у ванні: за балансом вмісту вуглецю не нижче 0,6 % [4] та за різницею об'ємної щільності випромінення факелу в двох спектральних областях для вмісту вуглецю нижче 0,6 % [2].

Також існує інша модель, яка розглядає процес зневуглицювання як два кінетичні періоди [3]. Перший період описується рівнянням, відповідним пропорційній ланці. У другому кінетичному періоді, що настає за умови однакової кількості дифузійних потоків вуглецю і кисню, швидкість зневуглицювання описується рівнянням, яке відповідає інерційній ланці першого порядку. Швидкість зневуглицювання знаходиться через об'ємні витрати кисневого дуття з урахуванням чистоти та втрат дуття та масової частки вуглецю ванни, який окислюється до CO в порожнині конвертера за рахунок кисню дуття.

З вищенаведеного витікає, що галузь використання математичного моделювання в автоматизації конвертерного виробництва є достатньо вивченою. Існують моделі, які здатні прорахувати наперед ті чи інші параметри, які складно, або навіть неможливо визначити шляхом прямих замірів або без припинення виробничого процесу. Окрім дослідження динамічних моделей, відбувається дослідження, вивчення і використання на практиці статичних моделей. Їх сутність полягає в тому, щоб знайти витрати матеріалів, які необхідні для виплавки сталі заданої кількості, хімічного складу і температури, тривалість плавки і продуктивність агрегату. Зазвичай розрахунки плавки відбуваються в певний послідовності. Спочатку визначають параметри плавки, які треба отримати в кінці продувки. Потім обчислюють витрати лому, окислення домішок металевої шихти, кількість і склад шлаку. Важливим параметром для розрахунку є витрати дуття. Після нього зазвичай розраховують вихід рідкої сталі перед розкисненням і складають матеріальний баланс плавки. Наступним етапом є розрахунок теплового балансу і температури металу, його розкислення і хімічного складу, а також витрати матеріалу на всю плавку і вихід продуктів плавки. Заключним є визначення питомої інтенсивності продувки, довготривалості плавки і продуктивності агрегату [5]. В сукупності між собою динамічна і статична моделі становлять замкнуту систему, яка теоретично могла б керувати технологічним процесом самостійно, без втручання людини.

Метою роботи є розробка програмного забезпечення, що реалізує статичний та динамічний розрахунок параметрів конвертерної плавки, а також візуалізацію технологічних операцій та роботи технологічного обладнання.

Основний матеріал дослідження. Програма візуалізації киснево-конвертерного процесу (рис. 1) розроблена на базі ігрового рушію загального призначення Godot Engine та базується на статичній та динамічній моделях конвертерної плавки. Вагомою перевагою цієї платформи є те, що вона є безкоштовною, себто доступною для кожного. Середовище розробки може працювати на Linux, OSX, Windows та інших операційних системах та експортувати проекти на ПК, консолі, мобільні та веб-платформи. Скриптинг у цьому середовищі відбувається за допомогою вбудованої мови GDScript, синтаксис якої має спільні елементи з Python. Деякі версії Godot підтримують мови програмування C, C# та C++, які є доволі популярними в галузі промислової автоматизації.

Увесь проект являє собою сукупність 3D моделей, розроблених в програмі для моделювання Blender, та підключених до них скриптів, які представлені окремими класами.

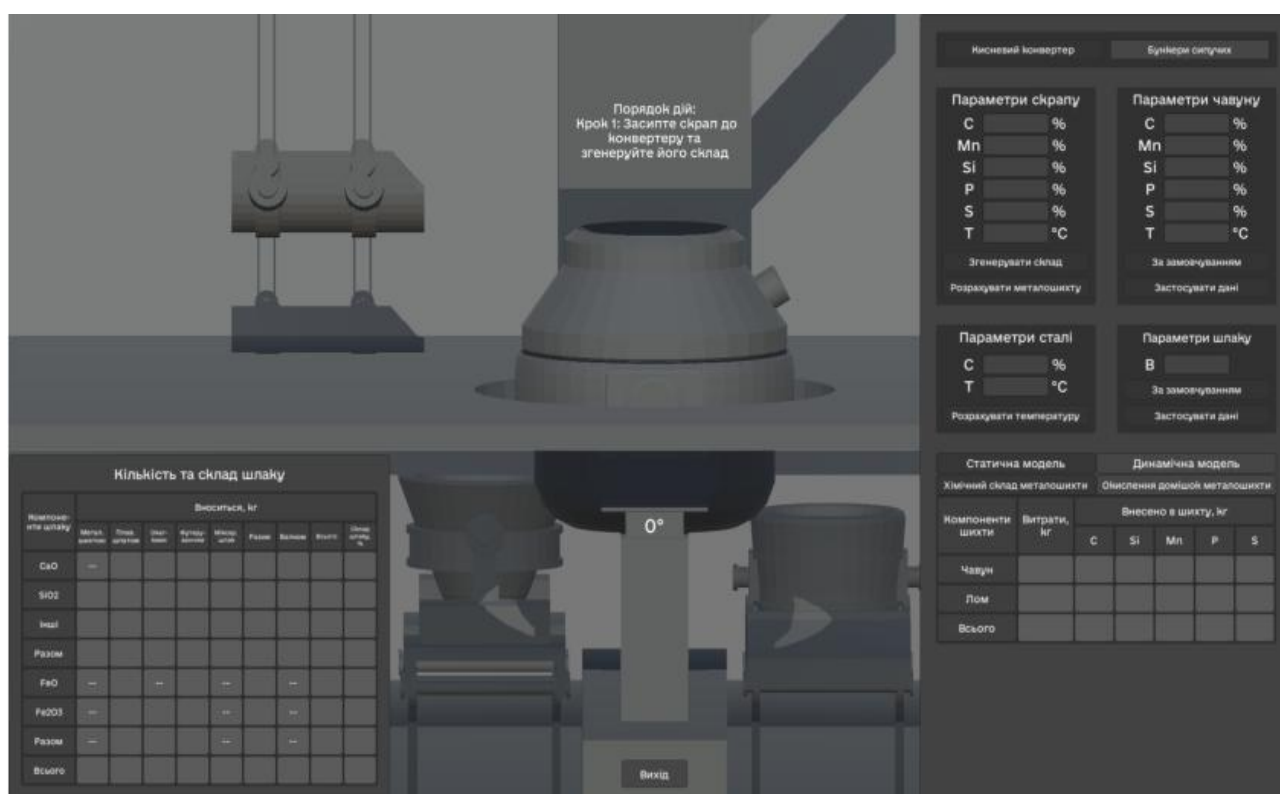
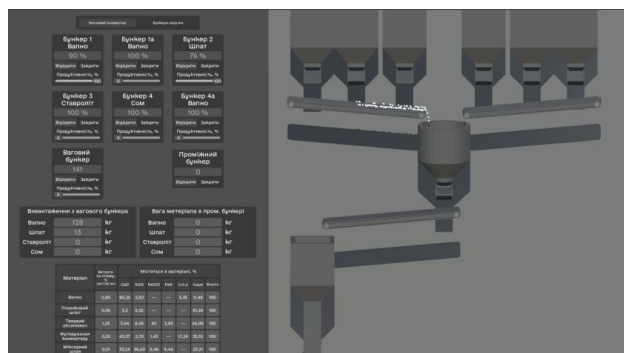


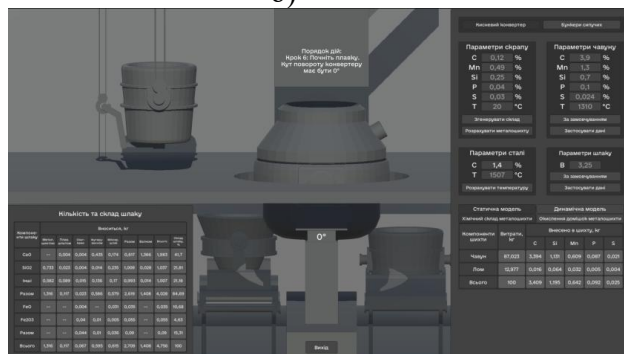
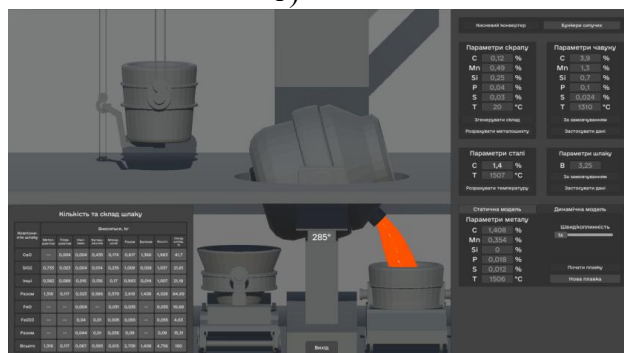
Рисунок 1 – Головне вікно програми

Розроблений проект написаний на GDScript. Це найбільш зручна мова для написання скриптів. Скриптування відбувається за рахунок підключення скрипту до певного об'єкта проекту. Сам проект має структуру вузлів або так званих Node. В проекті є головний вузол, а всі інші приєднуються до нього. Чим ближче вузол знаходиться до головного, тим більше доступу він має до інших вузлів. Тобто він має доступ та може керувати тільки залежними від нього вузлами. Деякі вузли можуть виступати в ролі сцен. Сцена – це вузол, який може бути залежним або працювати окремо від інших. Найголовніший вузол можна вважати сценою. Вузол уявляє собою набір елементів із певної бібліотеки. В розробленому проекті використані такі елементи, як KinematicBody2D, RigidBody2D та StaticBody2D. Залежними від них є Sprite, CollisionShape2D та CollisionPolygon2D. Перші необхідні для опису фізичних властивостей об'єкта, а другі – його зовнішнього вигляду та форми. Кожен з цих елементів має безліч властивостей, змінюючи які за допомогою скриптів можна отримати бажаний результат. Наприклад, в програмі на базі скриптів реалізовано анімацію руху конвертеру, фурми, совку для подачі скрапу, сталь ковша та рухомого складу. Ними можна керувати за допомогою клавіатури комп'ютера.

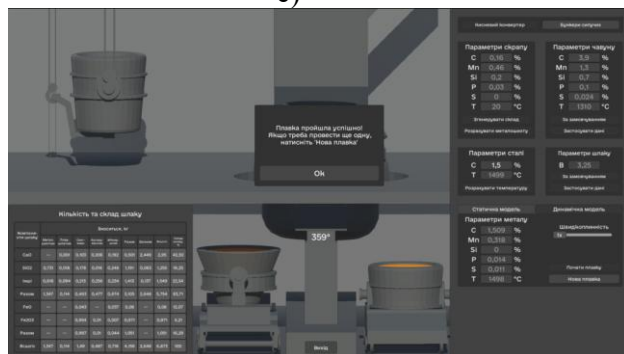
Окрім візуальної частини проект містить модель розрахунку та симуляції киснево-конвертерної плавки. Цей блок був реалізований як окрема сцена, а потім вбудований до основної. Він складається зі статичного та динамічного розрахунків конвертерної плавки та симуляції плавки на їх основі (рис. 2). Результати розрахунків відображаються на панелях з таблицями.



6)

 $\Gamma)$ 

e)



3)

80

Металургія

Всього проект налічує 22 скрипти, які реалізують:

- поведінку витратних бункерів: зміну положення заслінки бункеру, заповнення шихтовими матеріалами в певних межах, контроль рівню та кількості матеріалу, висипання шихтових матеріалів з бункеру;
- поведінку проміжного бункера: підрахунок кількості того чи іншого шихтового матеріалу, що завантажується в бункер, та їх загальної кількості;
- поведінку вагового бункера: підрахунок кількості того чи іншого шихтового матеріалу, що завантажується в бункер, та їх загальної кількості, реакція на потрапляння або висипання матеріалу з бункера;
- поведінку сталі ковша: заливання сталі до конвертера, переміщення сталі ковша;
- поведінку кисневого конвертера: анімація зливу сталі та шлаку в кінці плавки, розрахунок кута повороту конвертера за внутрішніми координатами та анімація повороту;
- поведінку електровібраційних живильників: завдання продувності та переведення значення продуктивності у вплив на електровібраційний живильник;
- поведінку кисневої фурми: розрахунок та зміна її положення;
- поведінку совку зі скрапом: формування скрапу, переміщення совку, анімація засипання скрапу до конвертера;
- поведінку рухомого складу: анімацію заміни ковша на совок та навпаки, керування шлаковозом та сталевозом;
- поведінку шлаковоза: наповнення шлаковоза шлаком, відслідковування готовності шлаковоза до зливу шлаку;
- поведінку сталевоза: наповнення сталевоза сталлю, відслідковування готовності сталевоза до зливу сталі;
- надання підказок для покрокового виконання технології плавки;
- присвоєння параметрам чавуну значень за замовчуванням або значень, які були введені користувачем;
- присвоєння основності шлаку значення за замовчуванням або значення, введенного користувачем;
- розрахунок статичної моделі;
- розрахунок кінцевої температури сталі в залежності від вмісту вуглецю;
- генерацію ступеня видалення шкідливих домішок у кінці продувки в залежності від вмісту вуглецю;
- генерацію вмісту оксидів заліза в шлаку в залежності від вмісту вуглецю в кінці продувки;
- генерацію складу неметалевих матеріалів для розрахунків кількості та складу шлаку;
- окислення вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, сірки;
- розрахунок атомарної концентрації вуглецю в металі;
- виведення результатів усіх розрахунків у таблиці.

У програмі передбачено присвоєння вихідним параметрам розрахунку значень, введених користувачем, якщо програма працює як частина динамічної системи керування плавкою, або значень за замовчуванням, якщо програма використовується як симулятор для навчання.

Вихідними даними для моделювання є параметри хімічного складу чавуну та параметри сталі, які необхідно отримати. Параметри лому зазвичай невідомі під час реальної плавки, але вони варіюються в певних межах. Ґрунтуючись на цьому, склад лому генерується випадковим чином. Розраховуються витрати лому з корекцією за охолоджувальною здатністю окатишів та температури металу. За визначеними витратами лому знаходяться витрати чавуну. За отриманими даними визначається загальний вміст елементів у металошихті. Далі знаходиться

Металургія

залишковий вміст домішок у металі в кінці продувки. Кількість домішок, які видаляються під час продувки, знаходиться як різниця між їх вихідним і залишковим вмістом після продувки. Ці дані необхідні для розрахунку кількості кисню, яка необхідна для окислення. На цьому статичний розрахунок завершується.

Наступним етапом є динамічний розрахунок, який базується на розрахунках статичного. Він полягає у визначенні інтенсивності видалення вуглецю та інших домішок залежно від зміни часу продувки. В програмі передбачена зміна витрат дуття, що дозволяє дослідити зміну швидкості, з якою видаляється елемент.

ВИСНОВКИ

Реалізовані в програмі моделі адекватно відображають процеси, що протікають у ванні конвертера. Моделі дозволяють здійснити розрахунок шихти на плавку, безперервно по ходу продувки здійснювати контроль і регулювання найбільш важливих параметрів металу за допомогою управління кисневою фурмою, визначати швидкості знеуглецювання, зміни температури і окислення заліза ванни.

Розроблене програмне забезпечення може використовуватися в системі автоматичного керування конвертерною плавкою, що дозволить збільшити точність управління, підвищити якість виплавленої сталі та економічність процесу. Також програма може бути застосована в якості тренувальної та / або навчальної для обслуговуючого персоналу, технологів та фахівців з автоматизації.

Список використаних джерел

1. Величко, А. Г. АСУТП в конвертерному виробництві: Підручник. / А. Г. Величко та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2016. – 245 с.
2. Богушевський, В. С. Замкнена система управління киснево-конвертерної плавкою / В. С. Богушевський // Лиття та металургія. – 2013. – № 3. – С. 207-211.
3. Богушевський, В. С. Знеуглецювання сталі як основний параметр оптимального управління киснево-конвертерним процесом / В. С. Богушевський, С. Г. Мельник, С. В. Жук. – Київ: КПІ, 2014. – 416 с.
4. Сорокін, М. О. Дослідження інформації про температуру газів, що відходять, в АСУ конвертерним процесом / М. О. Сорокін, В. М. Глухівська // Розробка та експлуатація ефективних систем і засобів автоматизації сталеплавильного виробництва. – 1982. – С. 13 – 18.
5. Шаповалов, А. М. Технологія і розрахунок плавки у кисневому конвертері / А. М. Шаповалов. – Новотроїцьке: НДТУ «МІСіС», 2011. – 40 с.
6. Бойченко, Б. М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин. – Дніпро: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
7. Богушевський, В. С. Комп'ютерна модель розрахунку шихти та продування конвертерної плавки / В. С. Богушевський, Г. Г. Грабовський, В. М. Михайлов та ін. // Сталь. – 2006. – № 1. – С. 18-21.

Cherevko O., Shcherbakov S.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR AN AUTOMATED DYNAMIC CONTROL SYSTEM FOR CONVERTER MELTING

The article considers the problems of increasing the efficiency of converter steel production by implementing automated systems with dynamic control, based on continuous receipt and processing of information about the parameters of the technological process.

Existing approaches to mathematical modeling of converter processes are analyzed. The possibilities of practical application of static and dynamic models used to calculate the charge and material balance of the melt, describing the kinetics of processes, in particular, the rate of decarburization and temperature change, are presented. It is shown that the combination of static and dynamic models allows creating a complex control system capable of automatically controlling the technological process.

The purpose of the research is to develop software that combines the functions of static and dynamic calculation of converter melting parameters, as well as provide visualization of technological operations and the operation of converter equipment.

The proposed software is developed on the basis of the 2D and 3D general-purpose game engine Godot Engine, which has such advantages as free, cross-platform and support for various programming languages. The software is created using the GDScript language, 3D models developed in the Blender environment, and scripts that describe the behavior of individual system elements. The software implements visualization of the main stages of converter smelting and control of technological equipment. In addition to visualization, the program models converter smelting processes based on static and dynamic calculations.

The considered models adequately reflect the real processes of converter smelting. The developed software can be used both for automatic control of the technological process and for education and training of personnel. The implementation of a dynamic control system for converter smelting will increase the efficiency of converter production, improve the quality of steel and reduce the cost of production.

Keywords: oxygen converter process, computer modeling, visualization, static and dynamic model of converter smelting, automatic control system.

Стаття надійшла 05.05.2025р.

УДК 621.771

doi.org/10.31498/2522-9990292025330254

Григоренко В.У., Заболотний О.М.

ПІДВИЩЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ТА МІЦНОСТІ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВАРЮВАНOSTІ ХОЛОДНОГНУТИХ ШВЕЛЕРІВ

Швелери виробляють по технологіям гарячої прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки так і по технології холодного згинання смуги або листа.

Маловуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гарячекатаних швелерів дають можливість зварювання, але не мають високої міцності. Тому постає питання з підвищенням показників міцності метала швелерів.