

УДК 669.1-47.42]:331

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-15>

Биткін Сергій Віталійович, начальник відділу, кандидат технічних наук, ПАО «Металургійний комбінат «Запоріжсталь». ORCID: 0000-0003-3583-3371

Критська Тетяна Володимирівна, завідувач кафедри, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-001-6933-0460

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ В ЧОРНІЙ МЕТАЛУРГІЇ У СЕРЕДОВИЩІ «STATISTICA» ТА «MATHCAD»

Показана можливість використання прикладних пакетів «STATISTICA» та «MathCAD» для оцінки ефективності застосування нового технологічного вирішення (розкислювання із застосуванням феросилікоалюмінію (ФСА)). Для вирішення завдання, пов'язаного з аналізом експериментальних даних застосовують стохастичні, ймовірнісні методи, які дозволяють виявляти закономірності технологічних відхилень. Як приклад розглянуто статистичний аналіз експериментальних даних за дослідною плавкою 09Г2Д. Досліджено розподіл межі плинності σ_T для зразків, виготовлених із стандартної сталі 09Г2Д, а також із дослідної сталі 09Г2Д. Використано гістограми «STATISTICA», що описують розподіл межі плинності 09Г2Д за стандартної технології та технології із застосуванням ФСА), які апроксимуються функцією розподілу щільності ймовірності чисельного значення ознаки. Отримані розподіли будують у програмі «MathCAD» з одночасним переходом до ймовірнісного подання залежностей. Основним ефектом застосування ФСА є зниження дисперсії механічних властивостей сталі 09Г2Д.

Ключові слова: технологічний експеримент, феросилікоалюміній, застосування, металопрокат, механічні властивості, програми «STATISTICA» та «MathCAD»

Вступ. Статистичні методи обробки даних є поширеним математичним апаратом для аналізу хімічного складу сталі та результатів механічних випробувань металопрокату, а також виконання інших досліджень металургійних процесів. Технологам, що мають відповідну теоретичну підготовку, в умовах безперервного виробництва підприємства досить складно вибрати та застосувати методiku виконання дослідження й обробки отриманих експериментальних результатів [1].

Літературний огляд. Для вирішення завдань, пов'язаних з аналізом результатів за наявності випадкових і/або непередбачених (невідомих) чинників (наприклад, різний хімічний склад масиву плавки сталі та результатів однієї дослідної плавки за наявності невеликого варіаційного ряду вимірювань, умов прокатки, зокрема, швидкості нагрівання та охолодження в діапазонах температури, що змінюються) застосовують методи математичної статистики [2]. Ці стохастичні, ймовірнісні методи дають змогу виявляти закономірності технологічних відхилень (механічні властивості зразків сталі, на яких вимірювали межу плинності і міцності, пов'язані не лише з хімічним складом, але і термомеханічними діями під час прокатки та їх відхилення будуть різними), виконувати обґрунтовані висновки та прогнози, давати оцінки вірогідності чисельних значень не лише меж плинності і міцності, але і будь-яких інших фізичних величин [3]. Досягається це порівнянням не окремих чисельних значень характеристик металопрокату, а їх вірогідності [4]. Є досвід застосування економо-фізичних методів розрахунку для оцінки експлуатаційної стійкості прокатних валків, підшипників і вогнетривких матеріалів [5].

Математична статистика у чорній металургії, як і в інших галузях промисловості, використовує методи та результати теорії вірогідності [6-8]. Для технологічних досліджень її застосування, як правило, передбачає наступні етапи [9]:

– побудова ймовірнісної моделі результатів вимірювань за виконанням стандартного та нового технологічного процесу (у його частині, що вивчають), використовуючи экс-

периментальні дані, тобто, визначаючи вірогідність чисельних значень технічних характеристик за схемою: гістограма + функція щільності розподілу вірогідності у програмі «STATISTICA» + побудова функції у програмі «MathCAD», виконують моделювання форми розподілу ознаки (вміст хімічного елементу, межі плинності або міцності, будь-якої іншої фізичної величини («ознаки» в термінології статистики)) і виконання розрахунків з використанням прикладних статистичних і/або математичних програмних пакетів;

– інтерпретація змінювань конкретного виду розподілу контрольованих параметрів технологічного процесу стосовно реальної ситуації й ухвалення відповідного вирішення (наприклад, про змінювання фізико-механічних і/або хімічних властивостей сталі під час застосування нового методу розливання, продування, феросилікоалюмінію (ФСА) та будь-якого іншого технічного вирішення).

Складність полягає у правильності побудови ймовірносно-статистичних моделей і перевіряння їх коректності.

Постановка завдання. Метою роботи є підтвердження можливості використання прикладних пакетів «STATISTICA» та «MathCAD» для оцінки ефективності застосування нового технологічного вирішення в мартенівському цеху підприємства (розкислювання із застосуванням феросилікоалюмінію).

Основна частина досліджень. Як приклад розглянемо статистичний аналіз експериментальних даних щодо дослідної плавки сталі 09Г2Д. Фізико-хімічні основи застосування феросилікоалюмінію (ФСА) активно досліджуються після патентування в 2013 р. сплаву «Казахстанський» для розкислювання та легування сталі. Показана перспективність застосування ФСА з точки зору видалення неметалічних домішок [10,11]. Стандартна технологія призводить до високої міри забрудненості металопрокату неметалічними (корунд Al_2O_3 , силікати $MnO \cdot SiO_2$ і $FeO \cdot SiO_2$, сульфідні й оксисульфідні) включеннями, що вказує на необхідність застосування нових способів розкислювання з ефективною дією на природу та характер включення. Потрапляючи до рідкого металевого розплаву щільністю $\sim 7000 \text{ кг/м}^3$, феросилікоалюміній, щільністю $\sim 5500 \dots 6300 \text{ кг/м}^3$, спливає до межі металу з рідким шлаком (щільність шлаку $\sim 2900 \text{ кг/м}^3$) значно повільніше, ніж алюміній з щільністю 2697 кг/м^3 : механізм процесу запропоновано у роботі [12]. У шлаковому розплаві ФСА не спливає, тоді, як алюміній продовжує спливати в шлаковій фазі до контакту з газовою фазою, додатково при цьому згораючи, а, не реагуючи з киснем $[O]$, що розчинено у металі. Автори публікацій зв'язують зменшення кількості неметалічних включень з утворенням легкоплавких складних оксидів [13], які легко спливають у шлак (табл. 1).

Саме тому, для одержання легкоплавких сполук як продуктів реакції під час розкислювання, використовують комплексні розкислювачі.

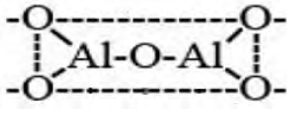
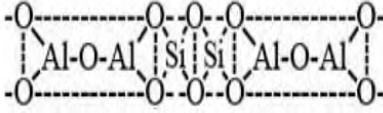
У роботах [14,15] показано, що ефективно віддаляються лише досить великі неметалічні включення. Швидкість спливання часточок шлаку (V) можна приблизно оцінити за формулою для швидкості підйому часточок у в'язкому середовищі, яку визначають рівнянням Стоксу:

$$V = \frac{2g \cdot r^2}{9\eta} \cdot (\gamma_m - \gamma_{шл}) , \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; η – динамічна в'язкість розплавленого металу, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$; r – радіус часточки, м ; γ_m , $\gamma_{шл}$ – щільність металу та шлакових часточок, кг/м^3 , відповідно.

Швидкість спливання часточок шлаку V зростає під час збільшення радіусу (розміру) часточки, за зменшенням щільності шлакових часточок і підвищення температури сталі (знижується в'язкість розплавленого металу). Злипання твердих часточок відбувається набагато повільніше та важче, ніж злиття крапель, тому неметалічні включення повинні мати температуру плавлення нижче температури рідкої сталі ($\sim 1873 \text{ K}$).

Таблиця 1 – Структурні формули та властивості оксидів з різним складом

Хімічна формула	Структурна формула	За яких умов утворюється
Al_2O_3		Застосування алюмінієвої катанки, чушок: корунд з розплаву віддається неефективно, створює передумови для дефекту «розшарування»
$Al_2O_3 \cdot SiO_2$		Застосування комплексного розкислювача призводить до ефективного видалення складних оксидів і зменшення забрудненості металопрокату

Відомо, що температура плавлення корунду складає ~ 2323 К, тому він погано віддається з розплаву до шлаку. Продукти розкислювання у вигляді чистих оксидів знаходяться у металі в твердому стані, а у вигляді сполук – у формі рідких крапель. Суть комплексного розкислювання полягає у підвищенні реакційної здатності окремих елементів за рахунок створення вигідніших енергетичних умов, за яких повніше відбуваються реакції взаємодії елементів з розчиненим киснем [16]. У феросплавах, які широко вживають у металургії (силікомарганець і феросиліцій), кремній створює з основою міцні інтерметаліди. Алюміній, що подають в сталь у складі комплексної сполуки, не створює міцних зв'язків з кремнієм, залізом або марганцем. Ймовірно, за подачею алюмінію послабляються зв'язки кремнію із залізом або марганцем, що за введенням до розкислюваної сталі значно підвищує активність цього розкислювача порівняно з традиційними розкислювачами, тобто має місце «синергетичний ефект». Використання феросилікоалюмінію (ФСА) має, судячи за публікаціями, фундаментальні переваги перед іншими комплексними розкислювачами. В той же час, вплив ФСА на механічні властивості металопрокату вивчено недостатньо.

У даній роботі досліджено розподіл межі плинності σ_T для зразків, виготовлених як із стандартної сталі 09Г2Д, так і дослідної сталі 09Г2Д (технологія із застосуванням ФСА) у кількості двох тонн на 250 т сталі, при цьому одну тонну додавали у піч, а другу тонну безпосередньо в ковш.

Застосовували описану вище методику оцінки технологічного вирішення, при цьому завдання вирішували таким чином.

1. Масив експериментальних даних і даних з бази підприємства імпортували в програму «STATISTICA», яка виконувала побудову гістограм, що описують розподіл фізичної величини, наприклад, для межі плинності сталі 09Г2Д за стандартної технології та технології з ФСА й апроксимували функцією розподілу щільності вірогідності чисельного значення ознаки $\varphi(x)$.

Позначення у програмі «STATISTICA» функцій $\varphi(x)$:

– щільність ймовірності нормального розподілу

$$\text{normal}(x, a, b) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{x - \mu}{2\sigma^2}\right),$$

де a – параметр локалізації (середнє значення); μ – середнє значення; σ – стандартне відхилення; b – параметр масштабування ($b > 0$);

– щільність ймовірності екстремального розподілу

$$\text{extreme}(x, a, b) \equiv \frac{1}{b} \cdot \exp\left(-\frac{x - a}{b}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - a}{b}\right)\right]; ,$$

– щільність ймовірності логічного розподілу

$$\text{logic}(x, a, b) \equiv \frac{1}{b} \cdot \exp\left(-\frac{x - a}{b}\right) \cdot \exp\left[1 + \exp\left(-\frac{x - a}{b}\right)\right]^{-2}$$

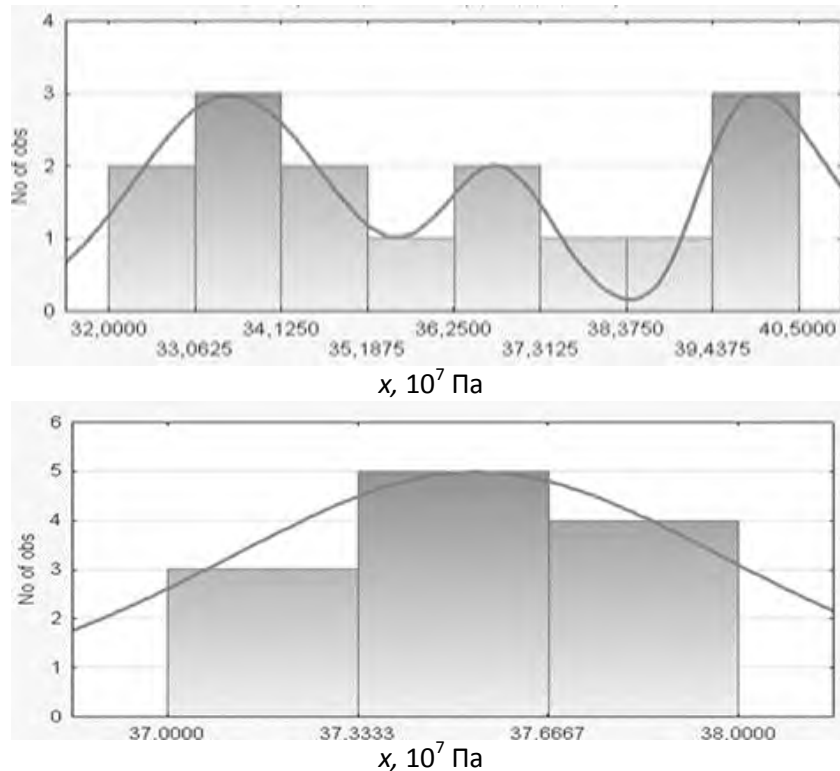


Рисунок 1 – Багатомодальний (стандартна технологія, верхній) та одномодальний (технологія, що використовує ФСА, нижній), розподіл чисельних значень межі плинності сталі 09Г2Д, що описано функцією розподілу щільності ймовірності

Наведено залежності ще є не придатними для порівняльного аналізу: є неоднорідний багатомодальний розподіл з різними точками екстремумів, різні розміри вибірок і тільки параметри розподілів, які сформовано програмою «STATISTICA». Потрібним є виконання розрахунку середньозваженого значення ознаки (межі плинності) та його дисперсії, що можливо із застосуванням програми «MathCAD», де є вбудовані функції $dnorm$ і $dlogis$, що дозволяє мінімально використовувати функції в явному вигляді за одночасному застосуванні вказаних програм.

2. Виконують побудову розподілів у програмі «MathCAD» з одночасним переходом до ймовірнісного подання залежностей (розподіл кількості спостережень, що відповідають певному чисельному значенню межі плинності (чи будь-якої іншої фізичної або хімічної величини). На рис. 2 подано результати технологічного експерименту. Зафіксовано істотне зниження дисперсії механічних властивостей металопрокату із застосуванням ФСА.

3. Розраховують чисельні значення параметрів [19], що характеризують отримані розподіли, вже не прив'язані ні до коливань хімічного складу сталі, ні до кількості вимірювань вибірки:

– середньозважені значення \tilde{X} (математичне очікування $M[X]$ межі плинності для стандартних та експериментальних зразків)

$$\tilde{X} = M[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \varphi(x) dx$$

де x – поточне значення ознаки в інтервалі вимірювань; $\varphi(x)$ – щільність ймовірності дослідженої ознаки;

– дисперсію $D[X]$ цієї фізичної величини

$$D[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[X])^2 \cdot \varphi(x) dx$$

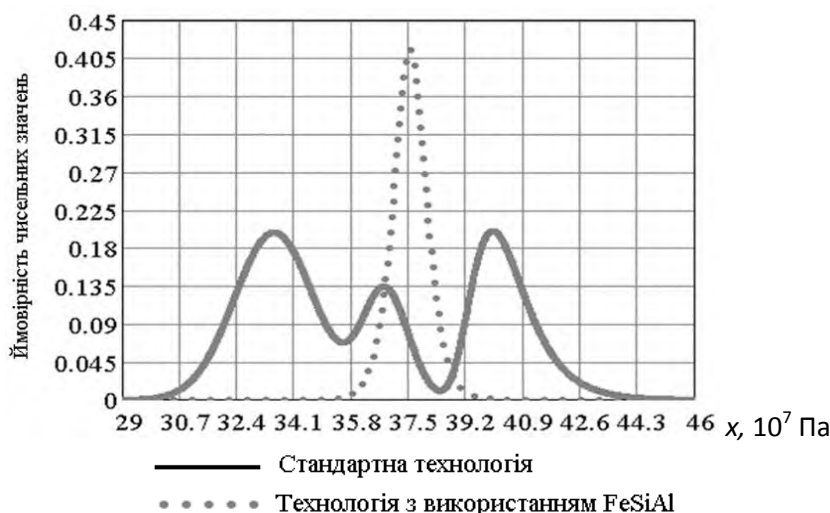


Рисунок 2 – Порівняння результатів технологічного експерименту (істотне зниження дисперсії механічних властивостей металопрокату із застосуванням ФСА)

Результати виконаних розрахунків подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання розподілів експериментальних даних

Технологія	Умовна межа плинності, \bar{X} , 10^7 , Па	Середньоквадратичне відхилення, $\sqrt{D[X]}$, 10^7 , Па
Стандартна	36,92	1,70
Із застосуванням ФСА	37,54	0,58

Таким чином, порівняння результатів однієї дослідної плавки із застосуванням ФСА і масиву плавок за стандартною технологією є цілком можливим, хоча сильне зниження середнього значення дисперсії за застосуванням нового розкислювача потребує виконання додаткових експериментів, тобто здійснення декількох плавок із статистичною обробкою результатів за описаною схемою, що дозволить побудувати моделі впливу застосування ФСА на властивості сталі 09Г2Д.

Висновки і пропозиції.

1. Застосування пакетів «STATISTICA» та «MathCAD» для обробки результатів технологічного експерименту дає змогу отримувати наочні результати відносно ефективності застосування технічних вирішень і висувати обґрунтовані гіпотези, зокрема, застосування ФСА дає змогу істотно поліпшити фізико-механічні властивості металопрокату.

2. Слід продовжити експериментальні дослідження та моделювання можливого технологічного впливу ФСА на процеси видалення сірки, кремнію та фосфору із сталі 09Г2Д для поліпшення її властивостей під час гарячого цинкування.

Бібліографічний перелік

1. Швалева А. В. Методы математической статистики в технических исследованиях *Молодой ученый*. 2012. № 3. С. 427-430. URL <https://moluch.ru/archive/38/4467/> (дата обращения: 07.02.2020).
2. Гришенцев А. Ю. Теория и практика технического и технологического эксперимента /учебное пособие. Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2010. 102 с.
3. Пономарев В. Б., Лошкарев В. Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 129 с.
4. Винарский М. С., Жадан Т. В., Кулак Ю. Е. Математическая статистика в черной металлургии. Киев : Техніка, 1973. 220 с.

5. Быткин С. В., Литвин В. М. Конкурентная разведка во внешнеэкономической деятельности: инженерно-экономические методы. Харьков : Фактор, 2015. 240 с.
6. Мельниченко А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. Учебник. Москва : Изд-во Дом МИСиС, 2009. 268 с.
7. Горенский Б. М., Лапина Л. А., Любанова А. А. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: конспект лекций / Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
8. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере: учебное пособие. Москва : МЦНМО, 2016. 368 с.
9. Быткин С. В. Экспериментально-статистическое моделирование применения радиационно-технологических процессов (РТП) для замедления деградации UOL биполярных интегральных микросхем (ИМС) в полях ионизирующих излучений. *Журнал физики и инженерии поверхности*. 2018. Т. 3. № 1. С. 24-34.
10. Мельник С. Г., Троцан А. И., Онищенко А. А., Белов В. Ф. О применении алюминийсодержащих ферросплавов для раскисления стали. *Литье и металлургия*. 2013. № 3(72). С. 204-206.
11. Ахметов А. Б. Влияние комплексного раскислителя на образование неметаллических включений в спокойных и низколегированных сталях. Труды XII Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина. Барнаул : изд-во АлтГТУ, 2015. С. 9-13.
12. Юдакова В. А. Повышение качества стали при раскислении сплавом ферросиликоалюминий. Труды Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». Караганда : КГТУ, 2016. С. 15-17.
13. Белов В. Ф., Троцан А. И., Бродецкий И. Л., Крейденко Ф. С. Структурно-химическое состояние рафинировочных шлаков при ковшевой обработке стали. *Процессы литья*. 2015. № 1 (109). С.20-29.
14. Валуев Д. В. Внепечные и ковшовые процессы обработки стали металлургии: Учебное пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 202 с.
15. Чичкарев Е. А., Назаренко Н. В., Исаев О. В., Кислица В. В. Математическое моделирование рафинирования стали от неметаллических включений при внепечной обработке и непрерывной разливке. *Математическое моделирование*. 2011. № 2 (25). С. 59-64.
16. Ахметов А. Б., Юдакова В. А. О физико-химических основах процессов раскисления и модифицирования стали комплексными сплавами. *Труды Карагандинского государственного технического университета*. 2015. № 1. С. 53-56.

References

1. Shvaleva A. V. Metody matematicheskoy statistiki v tekhnicheskikh issledovaniyakh *Molodoy uchenyy*. 2012. n.o 3. Pp. 427-430. URL <https://moluch.ru/archive/38/4467/> (data obrashxheniya: 07.02.2020).
2. Grishenkov A. Yu. Teoriya i praktika tekhnicheskogo i tekhnologicheskogo eksperimenta / uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg : SPTU ITMO, 2010. 102 p.
3. Ponomarev V. B., Loshkarev V. B. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov: kurs lektsiy. Ekateriburg : GOU VPO UGPI UGTU-UI, 2006. 129 p.
4. Vinarskiy M. S., Zhadan T. V, Kulak Yu. E. Matematicheskaya statistika v chernoy metallurgii. Kiev : Tekhnika, 1973. 220 p.
5. Bytkin S. V., Litvin V. M. Konkurentnaya razvedka vo vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti: inzhenerno-ekonomicheskir metody. Khar'kov : Faktor, 2015. 240 p.
6. Mel'nichenko A. S. Sratisticheskij analiz v metaluutgii i materualovedenii. Uchebnik. Moskva : Izdatel'stvo. Dom MISiS, 2009. 268 p.
7. Gorenskiy B. M., Lashina L. A., Lyubanova A. A. Modelirovanie protaessov i ob''ektov v metallurgii. Versiya 1.0 [Elektronnyy resurs]: konspekt lektsiy. Krasnoyarsk : IPK SFU, 2008.
8. Tyurin Yu. N., Makarov A. A. Analiz dannykh na kompyutere: uchebnoe posobie. Moskva : MTSNMO, 2016. 368 p.
9. Bytkin S. V. Eksperimental'no-statisticheskoe modelirivanie primeneniya radiatsionno-tekhnologicheskij protsessov (RTP) dlya zamedleniya degradatsii UOL bipolyarnykh integrakl'nykh

- mikroskhem (IMS) v polyakh ionizipuyushchikh izlucheniy. *Zhurnal fiziki i inzhenerii*. 2018. t. 3. no. 1. pp. 24-34.
10. Mel'nik S. G., Trotsan A. I., Onishchenko A. A., Belov V. Yu. O priminenii alyuminiysoderzhashchikh ferrospravkov dlya raskisleniya stali. *Lit'e i metallurgiya*. 2013. no. 3(72). pp. 204-206.
 11. Akhmetov A. B. Vliyanie kompleksnogo raskislitel'ya na obrazovanie nemetallicheskih vrlyucheniy v spokojnykh i nizkolegirovanykh stalyakh. Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly-konferentsii «Fundamental'noe i pkladnoe materialovedenie» / pod red. V. B. Markina. Barnaul: izdatel'stvo AltGTU, 2015. pp. 9-13.
 12. Yudakova V. A. Povyshenie kachestva stali pri raskislenii splavom ferrosilicoalyuminiy. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizatsii Plana natsii». Karaganda : KGTU, 2016. pp. 15-17.
 13. Velov B. F., Trotsan A. I., Brodetskiy I. L., Kreydenko F. S. Strukturno-khimicheskoe sostoyanie rafinirovochnykh shlakov pri kovshevoy obrabotke stali. *Protsessy lit'ya*. 2015. No. 1 (109). Pp. 20-29.
 14. Valuev D, V. Vnepechnye i kovshevye protsessy obrabotki stali v metallurgii: Uchebnoe posobie. Tomsk : Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 202 p.
 15. Chichkarev E. A., Nazarenko N. V., Isaev O. V., Kislitsa V. V. Matemacheskoe modelirovanie rafinirovaniya stali ot nemetallicheskih vklyucheniy pri vnepechnoy obrabotke i nepreryvnoy razlivke. *Matemacheskoe modelirovanie*. 2011. no. 2 (25). pp. 59-64.
 16. Akhmetov A. B., Yudakova V. A. O fiziko-khimicheskikh osnovnykh protsessov reaskisleniya i modifitsirovaniya stali kompleksnymi splavami. *Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. no. 1. pp. 53-56.

Bytkin Sergey, department manager, candidate of technical sciences, PJSC «metallurgical combine «Zaporozhstal».

Krytskaya Tatiana, department head, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university.

METHODOLOGY OF TECHNOLOGICAL EXPERIMENT RESULTS STATISTICAL EVALUATION IN FERROUS METALLURGY IN COMPUTING ENVIRONMENT OF STATISTICA AND MathCAD

To solve problems related to data analysis in the presence of random and / or unpredictable (unknown) factors (for example, different chemical composition of an array of metal melting data and the results of one experimental melt in the presence of a small variational series of measurements, stochastic, probabilistic methods are used. It make it possible to identify patterns against the background technological deviations (the mechanical properties of the samples, on which, for example, the yield point was measured, are associated not only with the chemical composition, but also with thermomechanical effects during rolling), make reasonable conclusions and predictions, give estimates of the probabilities of the numerical values of any other physical quantities by comparing not the individual numerical values of the characteristics of rolled metal, but their probabilities. The purpose of the present work was confirming the possibility of the STATISTICA, MathCAD applied packages use for the effectiveness confirmation of the application of the new technological solution (deoxidation using ferrosilicoaluminum, FSA). As an example, a statistical analysis of experimental data on experimental 09G2D melting considered. The distribution of the yield point σ_T for specimens made from standard 09G2D, as well as the distribution of the yield stress for specimens made from experimental steel 09G2D is investigated. Histograms (STATISTICA) describing the distribution of the standard technology σ_T and the same when using technology with FSA were approximated by the probability density distribution function of the numerical value of the feature. The resulting distributions were constructed in the MathCAD with a simultaneous transition to the probabilistic representation of dependencies. It was shown that the main effect of FSA use was the decrease of the σ_T dispersion of steel 09G2D.

Стаття надійшла: 08.10.2020 р.