

## ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ СТАЛИ 30ХНМЛ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА СЕРИЙНЫХ ПЛАВОК

Селиверстов В. Ю., Бойчук В. С., Доценко В. П., Кузьменко В. И.

### 1. Введение

Плавка стали в электродуговых печах относится к числу процессов, обладающих существенной неопределенностью, которая проявляется в отношении как входных, так и выходных переменных процесса. К входным переменным традиционно относится содержание элементов химического состава стали, а к выходным – механические свойства готовой стали. Неопределенность является двухуровневой и проявляется в оценке модального значения и компактности тела неопределенности, зная которые можно решать задачу кластеризации для получения функциональной зависимости механических свойств от химического состава [1, 2]. Однако при этом важно задавать левую и правую границу нечеткости, относительно выбора которых экспертные мнения могут различаться. Значения этих границ могут быть определены только на основании реальных данных, которые доступны в режиме проведения серийных плавов.

Поэтому актуальным является проведение технологического аудита таких плавов. Благодаря этому можно получить выборку реальных данных для дальнейшей оценки неточности описания технологических параметров плавки в электродуговых печах и оценить стабильность этого процесса.

### 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объектом исследования* является процесс плавки стали 30ХНМЛ в двух электродуговых печах ёмкостью 6 тонн. Технологический аудит процесса осуществлялся на действующих печах в сталелитейном цехе машиностроительного предприятия, специализирующегося на изготовлении крупного фасонного литья для изделий транспортного машиностроения. Аудит имел целью анализ соответствия выполняемых основных технологических операций плавки требуемым регламентированным технологическими инструкциями. По ходу плавки, в соответствии с регламентом, отбирались пробы на определение механических свойств стали 30ХНМЛ. Серийные наблюдения осуществлялись на протяжении 120 дней.

На основании его было установлено следующее.

Первый период плавки ведут на максимальной мощности трансформатора, соединение обмотки которого включены в режиме треугольника. В этот момент первая половина плавки состоит из почти непрерывных коротких замыканий и бросков тока. Плавления шихты начинается сверху и по мере проплавления металла и опускания электродов вглубь шихты распространяется на нижележащие слои. Металл при расплавлении стекает вниз между кусками шихты, прогревает их и постепенно формирует на дне печи ванну жидкого металла. Под каждым

электродом в шихте на первом этапе проплавляется три колодца, которые затем соединяются в один общий колодец. На этом этапе трансформатор переводится в режим пониженной мощности, с целью предотвращения термического износа футеровки открывшимися дугами.

Окислительный период начинается с того, что после образования шлака, тщательно перемешивая, берут первую пробу стали для определения экспресс-анализом содержания в ней углерода, марганца, фосфора, серы и хрома. Для раскисления жидкой стали выполняется непосредственное введение раскислителей, а также ферромарганца в количестве 0,4–0,5 % от массы стали, затем через 3–5 минут – ферросилиция. За 2–3 минуты до выпуска стали вводится остальное количество ферромарганца и алюминия. Раскисление шлака в существующих условиях цеха производится до тех пор, пока проба шлака после охлаждения не будет иметь в изломе светло-зеленый или голубой цвет.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Целью исследования* является определение показателей стабильности плавки стали 30ХНМЛ по критерию качества «предел прочности на растяжение» с учетом неопределенности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Получить выборку первичных данных по определению предела прочности образцов стали 30ХНМЛ в серийных плавках.
2. Выбрать и обосновать критерий оценки стабильности плавки.
3. Провести сопоставительный анализ расчета показателей стабильности плавки, обосновав целесообразный для практического применения способ его описания.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Проблема оценки стабильности процессов электродуговой плавки сводится к выбору оценочных критериев и возможностям их применения в соответствии с уровнем технологического развития на конкретном производстве. Типовыми решениям в этой части являются представление в качестве приоритетных электрических режимов работы печей как интегрированных в энергосистему энерготехнологических комплексов [3, 4]. Или же теплотехнических характеристик [5]. В первом случае реальное моделирование и оценка параметров заменяется компьютерным с использованием готовых программных пакетов, например в среде SIMULINK/MATLAB [3]. Во втором случае используют 3D-моделирование для оценки тепловых полей, распределения температуры в печи в зависимости от внутренней геометрии, систем изоляции отдельных ее элементов и охлаждения [5]. Такие типовые подходы удобны, учитывая современные возможности программно-аппаратных средств, однако они ориентированы больше на показатели самих металлургических агрегатов, а не на выпускаемую ими продукцию. Определенное развитие оценочных критериев технологической составляющей можно найти в работах [6–8]. Так, в работе [6] формирование оценочных технологических параметров рассматривается с позиции исследования металлургических процессов, протекающих в печи. А в работах [7, 8] в качестве критериев оценки эффективности плавки предложено рассматривать

экономические критерии. Наконец, распространен также подход, основанный на построении функциональных зависимостей свойств от химического состава, формируемого на этапах плавки и модифицирования [9]. Технологические приоритеты в оценке стабильности плавки, понимаемой как аналог эффективности процесса, должны органично сочетаться с показателями металлургических агрегатов. Такая взаимная интеграция позволяет реализовывать решения в области автоматизированного или автоматического управления плавкой [10, 11]. А также использовать полученные решения для оценки мероприятий по проведению технического перевооружения плавильных участков цехов [12]. Все это позволяет сделать вывод о важности выбора оценочных показателей и критериев оценки стабильности и эффективности процессов плавки. При этом, отмечая неоспоримые преимущества современных средств компьютерного моделирования, нужно отметить, что без реальных промышленных данных и проведения экспериментально-промышленных исследований в условиях серийного производства не обойтись.

## 5. Методы исследования

Результаты определения предела прочности, предоставленного лабораторией, обрабатывались методами математической статистики. Рассчитывались математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение. Для определения стабильности процесса плавки использовалось понятие энтропии, по аналогии с применяемым в теории информации. Энтропия рассчитывалась как функция вероятности наблюдения конкретного значения предела прочности стали ( $x_i$ ) в данной плавке и логарифма по выбранному основанию вероятности наблюдения [13]:

$$H = -k \sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i), \quad (1)$$

где  $k$  – некоторая положительная константа;  $P(x_i)$  – вероятность наблюдения значений  $x_i$ .

Стабильность процесса плавки при использовании в качестве оценочного показателя энтропии оценивалась следующим образом:

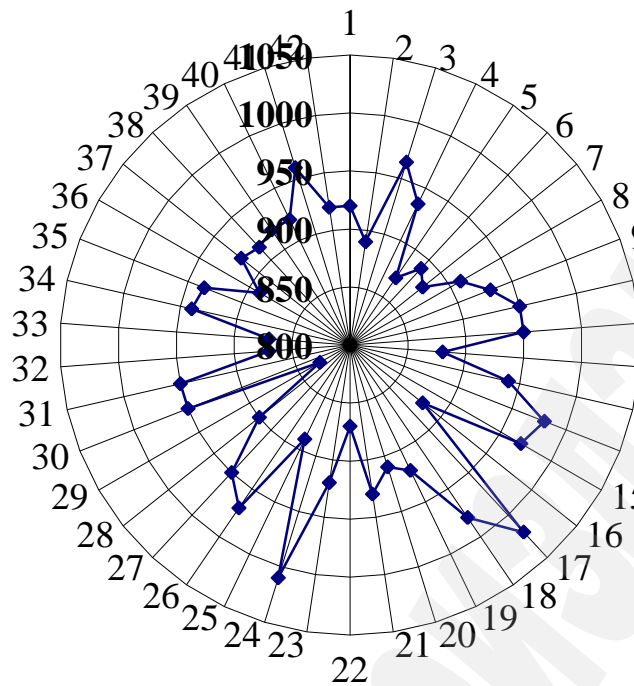
$$\eta = 1 - H_{\max}^{-1} H, \quad (2)$$

где  $H$  – энтропия, соответствующая данному распределению значений предела прочности стали в  $i$ -й плавке;  $H_{\max}$  – максимально возможная энтропия, соответствующая равномерному распределению;  $\eta$  – стабильность процесса плавки.

Формула (2) применима в случае одномодальности распределения случайной величины, характеризующей процесс плавки.

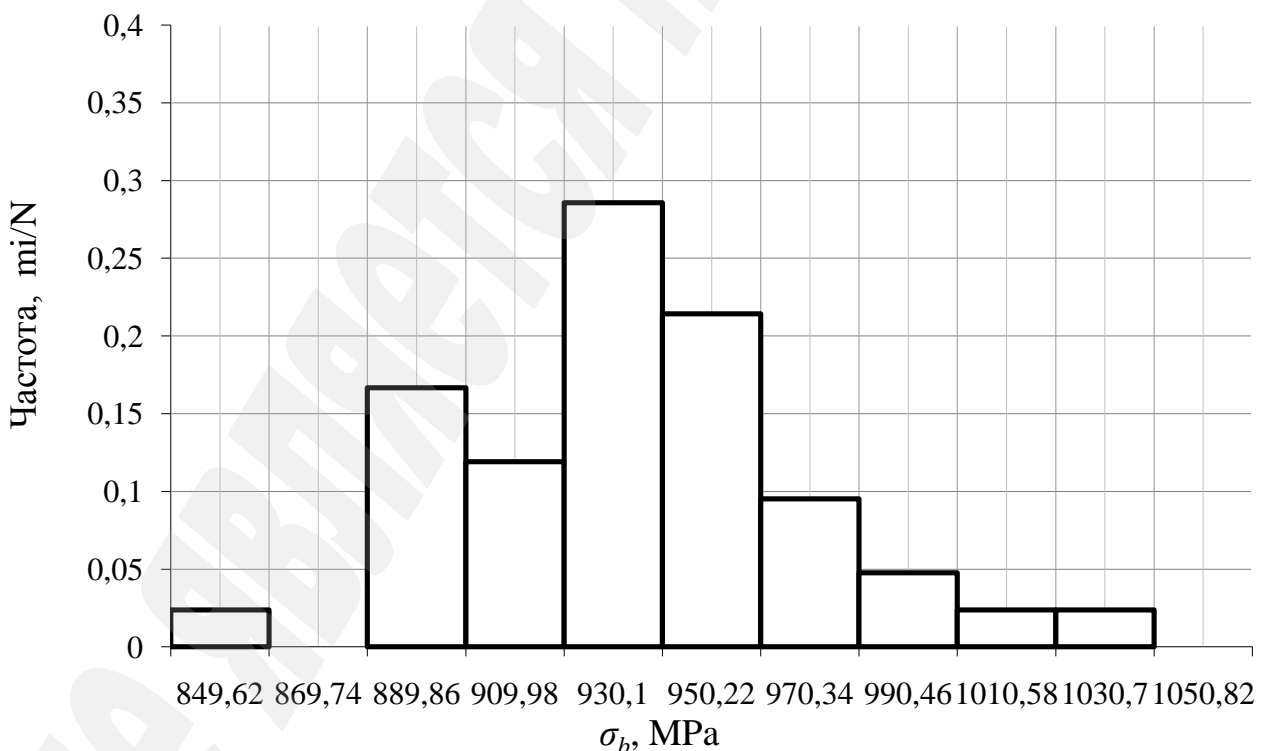
## 6. Результаты исследований

Результаты определения предела прочности, предоставленного лабораторией за период проведения технологического аудита, приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Экспериментальные данные о величине предела прочности  $\sigma_b$  стали 30XНМЛ в серийных плавках (номера плавков указаны на периферии круговой диаграммы, по оси ординат указаны значения  $\sigma_b$ , МПа)

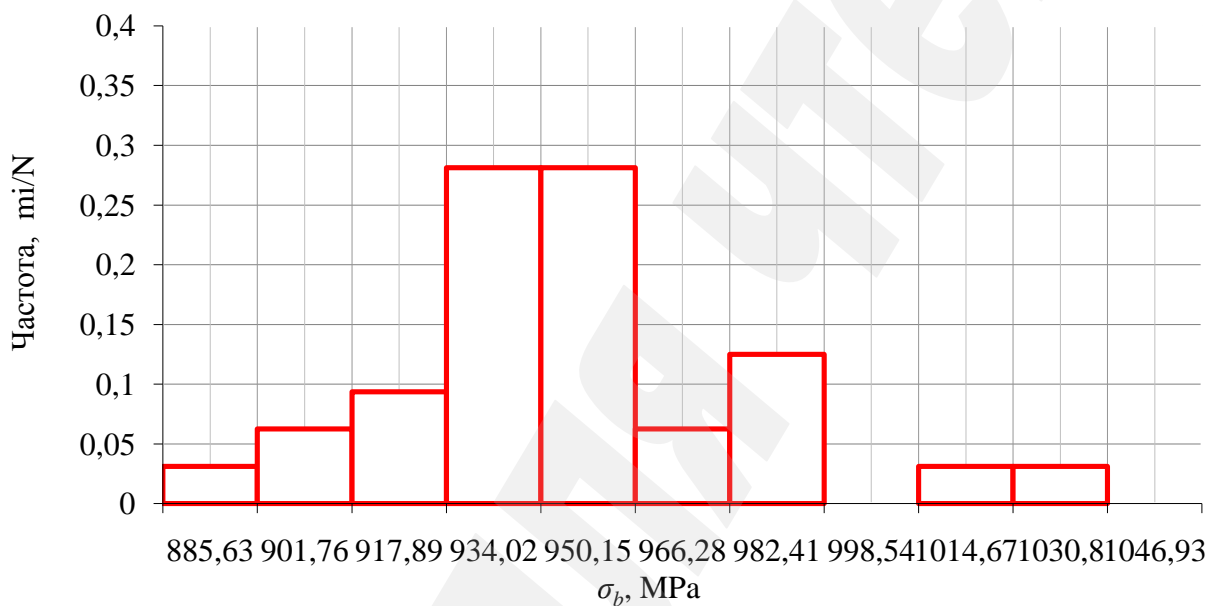
На рис. 2 приведена гистограмма распределения значения  $\sigma_b$ , построенная по общей выборке экспериментально-промышленных данных.



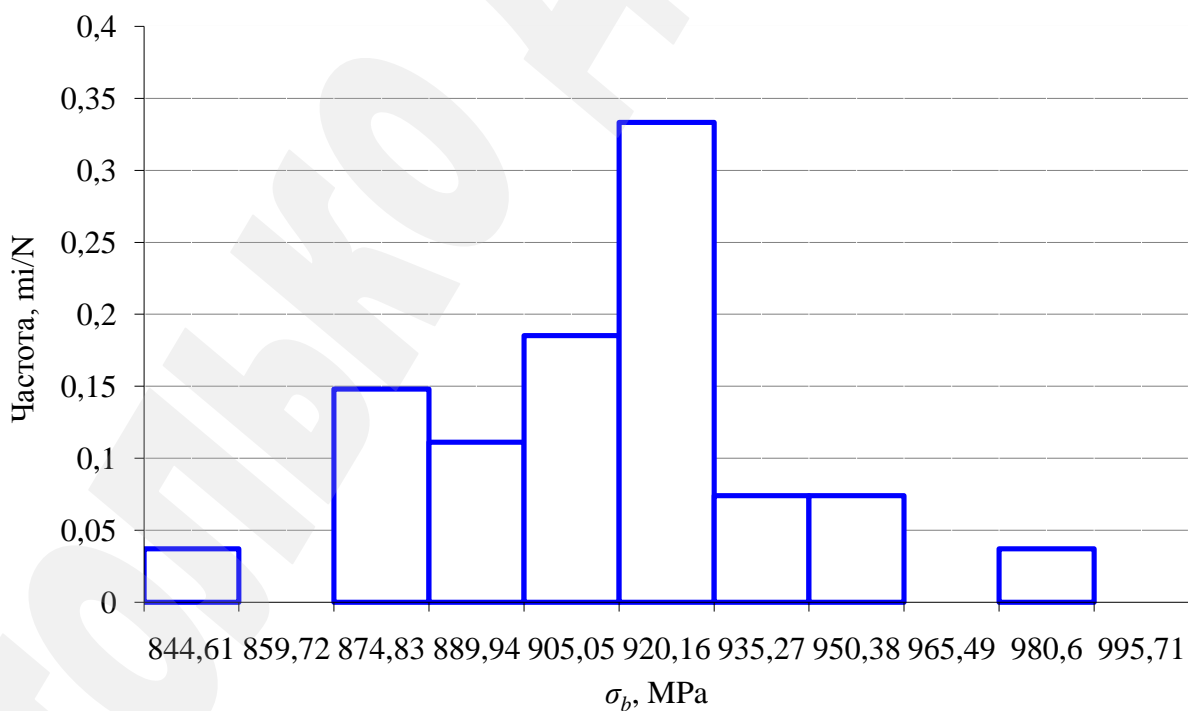
**Рис. 2.** Гистограмма распределения  $\sigma_b$ , построенная по общей выборке

Из рис. 2. видно, что распределение данных свидетельствует о вероятном

наличии систематической погрешности, проявляемом в наличии более одной вершины. Это значит, что выборка может являться неоднородной. Такая ситуация возможна, так как плавка ведется в двух различных печах и в отличающихся условиях. Для проверки этого исходная выборка была искусственно разделена на две, каждая из которых, предположительно, описывала распределение данных по печам. Учитывая сложность однозначной идентификации, использовалось мнение экспертов. На рис. 3, а, б приведены гистограммы, полученные после разбиения исходной выборки.



*a*



*б*

**Рис. 3.** Распределение  $\sigma_b$  при разбиении выборки: *a* – выборка № 1; *б* – выборка № 2

Результаты расчетов энтропии и коэффициента стабильности плавки приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

Результаты расчетов энтропии предела прочности стали  $\sigma_b$  и коэффициента стабильности плавки

Расчетные параметры по выборкам	$H$ , бит	$\eta$
Общая выборка	2,706365	0,217685
Выборка № 1	2,630827	0,23952
Выборка № 2	2,647708	0,234641

Из рис. 3 следует, что разбиение выборки дало лучший результат в оценивании энтропии и коэффициента стабильности плавки, причем результат для выборок № 1 и № 2 получился практически одинаковым. Однако проблема в оценивании параметров распределения осталась. Поэтому говорить о плотности распределения невозможно и целесообразнее представить предел прочности как нечеткую величину. При этом выходная переменная является нечетким числом  $F_{jp}$ , описываемым функциями принадлежности ( $L-R$ ) типа [1] вида:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}}\right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R\left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}}\right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\bar{F}_{jp}$  – измеренное значение выходной переменной, в  $j$ -м эксперименте, являющееся модальным для нечеткого числа  $F_{jp}$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ,  $p=1,2,\dots,m$ ;  $\alpha_{jp}$ ,  $\beta_{jp}$  – левые и правые коэффициенты нечеткости в описании (3).

Аналогично, в виде (3) может быть представлен коэффициент стабильности, который тоже представляется как нечеткое число. В этом случае можно принять, что рассчитанные значения энтропии и коэффициента стабильности плавки для каждой выборки в отдельности и общей выборки формируют левую и правую границу нечеткости в описании (3). В конкретном случае можно принять, что  $\alpha_{jp}=2,63$ ,  $\beta_{jp}=2,71$  (для нечеткого числа  $H$ ) и  $\alpha_{jp}=0,22$ ,  $\beta_{jp}=0,24$  (для нечеткого числа  $\eta$ ).

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

**Strengths.** Сильной стороной данного исследования является обоснование способа оценки стабильности электроплавки стали 30ХНМЛ. Это связано с важностью вопросов качества готовой продукции, от которого в полной мере зависит конкурентоспособность предприятия-производителя. Невозможность обеспечить заданные показатели стабильности качества стали по выбранным показателям

может быть связана с отсутствием понимания рациональных способов реализации организационно-технологических мероприятий компании плавки. В свою очередь, такое понимание должно базироваться на обоснованных оценках критериев качества. Благодаря предложенным способам оценки, основанным на использовании понятий энтропии и коэффициента стабильности, такая возможность обеспечивается. Следует также отметить, что предложенный способ оценки показателей стабильности инвариантен типу технологического процесса в заготовительном производстве. Это могут быть процессы обработки металлов, давлением, термической обработки и других процессов металлургического производства. Это объясняется тем, что качество дальнейших технологических операций для получения готовых деталей зависит от наследования качества заготовительного производства как предыдущих технологических этапов производства продукции.

*Weaknesses.* Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что выводы о численных значениях границ нечеткости в описании энтропии и коэффициента стабильности плавки сделаны по малой выборке данных. Это может приводить к тому, что в оценке реальных данных в условиях серийных плавки возможны неточности. Следствием этого может быть неточная оценка функции принадлежности и завышенные или заниженные показатели стабильности плавки. Это, в свою очередь, может приводить к ошибочным организационно-технологическим решениям и сопутствующим затратам.

*Opportunities.* Дополнительные возможности при использовании приведенных результатов в промышленных условиях связаны с проведением серийных плавки и накоплением данных для формирования более представительной выборки. Результатом этого может быть уточнение расчетов нижней и верхней границ нечеткости, модального значения и компактности тела неопределенности энтропии и коэффициента стабильности плавки. Полученные таким образом более точные значения позволят получить более точное описание функции принадлежности, которая может использоваться для оценки эффективности технологического процесса электродуговой плавки. Следует отметить, что под эффективностью здесь понимается соответствие фактических показателей энтропии и коэффициента стабильности заданным значениям.

*Threats.* Очевидные риски при использовании полученных результатов связаны с требованием воспроизводимости результатов. Это, в свою очередь, требует обеспечения строго регламентированных значений содержания химических элементов в стали. Попытка использовать результаты данного исследования без предварительного технологического аудита специфических условий плавки на своем производстве может привести к неадекватным результатам. В этом случае возникнет проблема оценивания реальных показателей своего производства по выплавке стали, которые могут быть как завышенными, так и заниженными. Устранение таких рисков требует предварительной адаптации полученных в данном исследовании результатов к специфическим условиям своего производства.

## **8. Выводы**

1. На основе проведения серийных плавки получена выборка экспериментально-промышленных данных по определению предела прочности образцов

стали 30ХНМЛ. Как следует из полученных результатов, по ней невозможно постулировать закон распределения, в частности говорить о нормальном распределении. Полученная двухвершинная гистограмма позволяет предположить, что имеет место неоднородность данных, в частности, возможна систематическая ошибка. Поэтому целесообразно разбиение выборки на две, в соответствии с регламентом плавки в двух электропечах.

2. В качестве критерия оценки стабильности плавки предложено использовать коэффициент стабильности, основанный на расчете энтропии и определяемый на основе выборки данных, полученных в режиме серийных плавков. Это позволяет снять жесткое требование соответствия закона распределения нормальному, на основании которого среднеквадратическое отклонение можно использовать в качестве оценочного показателя стабильности плавки.

3. Предложено для практического применения в оценке стабильности плавки использовать нечеткое описание энтропии и коэффициента стабильности. Это обосновано тем, что снимается жесткое требование соответствия закона распределения нормальному, т. к. фактически плотность распределения отсутствует. Несмотря на то, что такой результат получен для одной технологии плавки одной марки стали, аналогичная ситуация, вероятно, имеет место и для других промышленных условий. Поэтому предложено в нечетком описании энтропии и коэффициента стабильности плавки в качестве нижней и верхней границы нечеткости использовать расчетные значения данных показателей для общей и разделенной выборок.

### **Литература**

1. Дёмин Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 5/9 (65). С. 45–53. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452/16199>
2. Дёмин Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределенности // Проблемы машиностроения. 2013. № 6. С. 15–23. URL: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/21309>
3. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling // Energy. 2016. Vol. 115. P. 830–839. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.043>
4. Труфанов И. Д., Чумаков К. И., Бондаренко А. А. Общетеоретические аспекты разработки стохастической системы автоматизированной экспертной оценки динамического качества производственных ситуаций электросталеплавления // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2005. № 6/2 (18). С. 52–58.
5. Parametric study of heat transfer in an electric arc furnace and cooling system / Khodabandeh E. et. al. // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 123. P. 1190–1200. doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.193>
6. Металлургия плавки чугуна в дуговой печи / Грачев В. А. т. д. // Литейное производство. 1988. № 2. С. 19–21.
7. Шумихин В. С., Грачев В. А. Техничко-экономическое сравнение процессов плавки чугуна // Литейное производство. 1988. № 2. С. 15–17.



8. Храпко С. А. Оптимизация режима ведения плавки стали в дуговой сталеплавильной печи по прибыли предприятия // Современная электрометаллургия. 2003. Т. 2. С. 37–40.

9. Domin D. A., Pelikh V. F., Ponomarenko O. I. Complex alloying of grey cast iron // Liteinoe Proizvodstvo. 1998. Vol. 10. P. 18–19.

10. Разживин А. В., Сагайда И. М. Информационное обеспечение системы автоматического управления дуговой сталеплавильной печью по температуре металла // Вісник СУДУ. 2000. № 3 (25). С. 215–220.

11. Дёмин Д. А. Синтез систем управления технологическими процессами электродуговой плавки чугуна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/10 (56). С. 4–9. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3881>

12. Дёмина Е. Б. Выбор оптимальной стратегии технического перевооружения предприятия с металлургическим производством // Технологический аудит и резервы производства. 2011. № 2/2 (2). С. 40–52. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4866>

13. Галкин М. Ф., Кроль Ю. С. Кибернетические методы анализа электроплавки стали. Вопросы технологии. Москва: Металлургия, 1971. 304 с.