



The statistical process control techniques, as applied to steel production, in particular, to the production modifiers and ligatures, are studied.

Л. Ф. ПЕРВОВ, В. И. ШКУРКИН, Ю. А. АГЕЕВ, С. В. БУЛДЫГИН, ОАО «НИИМ»

УДК 621.74

СТАТИСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ И МОДИФИКАТОРОВ ЧУГУНА

Современные реалии экономической системы, в том числе вступление России в ВТО, предполагают решение фундаментальных вопросов, связанных с взаимодействием хозяйствующих субъектов. В числе этих вопросов порядок взаимодействия между производителями и потребителями при производстве и распределении продукции, в числе которых – подтверждение качественных характеристик продаваемого товара. Здесь необходимо рассматривать две взаимосвязанные проблемы: обеспечение качества продукции при ее производстве и поставке и достоверные методы контроля качества как у изготовителя, так и потребителя.

Процедуры контроля показателей качества продукции достаточно хорошо разработаны в случае контроля партий при изготовлении и поставках штучной продукции. Имеется много международных, региональных и национальных стандартов, регламентирующих процедуры отбора образцов для испытаний, гарантирующих высокую достоверность контроля при оправданных рисках, как потребителя, так и поставщика продукции (вероятности ошибок первого и второго рода).

Сложнее решаются подобные проблемы для так называемой нештучной продукции, когда показатели качества продукции непрерывно распределены в объеме поставки случайным или закономерным образом. При контроле такой продукции на первое место выходят процедуры отбора проб, их подготовки для выполнения испытаний и методики выполнения измерений [1, 2]. В связи с этим следует отметить важные обстоятельства, влияющие на достоверность контроля качества, в первую очередь это то, что множество свойств товаров априори не известны потребителям (для нештучной продукции, например, распределение ве-

личины показателя качества продукции в партии). При этом большинство значимых свойств, определяемых технологией изготовления, особенностями сырья и т. п., известны производителю, но не всегда известны потребителю, что позволяет, в том числе и недобросовестным производителям, пользоваться преимуществом в знании свойств товара и производить продукцию с худшими или недостоверными отдельными характеристиками.

Для смягчения указанных отрицательных последствий, получения конкурентных преимуществ, защиты внутреннего рынка и одновременно рекламы собственной продукции предприятия в частности должны сосредоточить усилия на следующих направлениях:

1. Разработке и принятии соответствующих стандартов на продукцию с лучшими потребительскими свойствами и новейшими методами испытаний.
2. Внедрении статистических методов управления процессами производства.
3. Внедрении современных систем менеджмента качества и использовании систем добровольной сертификации, обучении и информировании потребителей.

Решение указанных проблем должно способствовать повышению надежности поставок требуемой продукции, т. е. обеспечению их качества.

Рассмотрим более подробно один из предлагаемых аспектов проблемы – статистические методы применительно к металлургическому производству, в частности к производству модификаторов и лигатур.

Известно, что ферросплавы, модификаторы и лигатуры отличаются высокой неоднородностью распределения контролируемых элементов в объеме поставки. Это обстоятельство приводит к су-

ществленным проблемам при оценке их качества у производителя и потребителя, а также при использовании в процессе производства конечной металлопродукции. При этом очень важен уровень разработки нормативных документов, регламентирующих как технические требования к условиям поставок, так и методики контроля качества этих поставок.

В процессе контроля качества поставок ферросплавов (химического и гранулометрического состава) необходимо учитывать следующие моменты:

1) наличие высоких погрешностей контроля, вызванных неоднородностью опробуемого материала, его многокомпонентностью и фазовым составом, сложностью методик выполнения измерений при количественном химическом анализе;

2) нестабильность меры неоднородности обусловлена влиянием не только технологических особенностей производства, но и процедурами формирования партий (поставок) готовой продукции, отличающимися на различных заводах-изготовителях для одинаковой продукции;

3) нестабильность показателей качества в процессе доставки продукции конечному потребителю (погрузка, транспортировка, фирмы-посредники, порт перегрузки и т. д.).

Как известно, контроль химического состава партии какого-либо материала проводят путем определения содержания контролируемых компонентов в представительной пробе, сопоставления полученных значений содержания элементов с требованиями к их содержанию, указанными в нормативной документации на продукцию, и принятия решения о годности продукции. При этом определение массовой доли контролируемого элемента в пробе дает информацию только о среднем содержании элемента в сплаве, но не свидетельствует о неоднородности сплава. С точки зрения потребителя это только решение проблемы оценки стоимости поставленного материала (например, содержание ведущего элемента в партии ферросплава) и отчасти его марки (соответствия фактических характеристик требованиям спецификации на продукцию).

В стороне остается такой показатель качества, как неоднородность поставки – характеристика стабильности и однородности частей продукции. Для большинства массовых ферросплавов этот показатель качества регламентирован способом формирования партий-поставок. Как правило, это означает задание диапазона варьирования содержания ведущего элемента в сплаве и требования к предельному содержанию остальных элементов сплава (примесей). Но массовые ферросплавы характери-

зуются, в основном, большими разовыми порциями использования в дальнейшем металлургическом переделе. В этих условиях неоднородность сплава отчасти нивелируется (происходит усреднение материала в используемой в металлургических процессах порции сплава).

Когда же сплав используют малыми порциями, например модификаторы в литейном производстве, неоднородность сплава становится едва ли не главным показателем качества продукции. При этом меньшая неоднородность поставок обеспечивает более высокую стабильность качества отливок.

Научно-исследовательский институт металлургии (ОАО «НИИМ») производит большой спектр модификаторов и лигатур для чугуна, стали и сплавов цветных металлов. Наиболее массовой продукцией, выпускаемой ОАО «НИИМ», являются сфероидизирующие и графитизирующие модификаторы чугуна. Использование модификаторов данного типа в литейном производстве требует высокой стабильности показателей качества в поставляемых партиях сплава.

Одним из самых надежных способов обеспечения стабильности поставок является использование процедур статистического управления процессами (SPC) [3, 4] на основе применения контрольных карт Шухарта [5, 6] для анализа и мониторинга стабильности производственных процессов. В случае штучной продукции алгоритмы сбора данных, построения контрольных карт и анализа пригодности продукции хорошо исследованы и нормированы, имеются соответствующие стандартизованные процедуры для оценки уровня дефектности и соответствия поставок требованиям контрактов, основанные на анализе альтернативных данных о качестве продукции (годная, негодная продукция).

В случае нештучной продукции, к которой относятся ферросплавы и модификаторы, процедуры построения контрольных карт и SPC-процедуры аналогичны соответствующим алгоритмам для количественных показателей качества процессов. Специфика производства модификаторов состоит в том, что выплавку сплава производят, как правило, небольшими порциями (плавками) не всегда равномерно во времени. Поставка формируется из большого количества плавков и качество поставок обуславливается стабильностью химического состава плавков во времени, при этом присущая процессу изменчивость показателей качества зависит от многих факторов. В первую очередь это факторы изменчивости шихтовых материалов, т. е. химического состава шихты. Имеются также другие

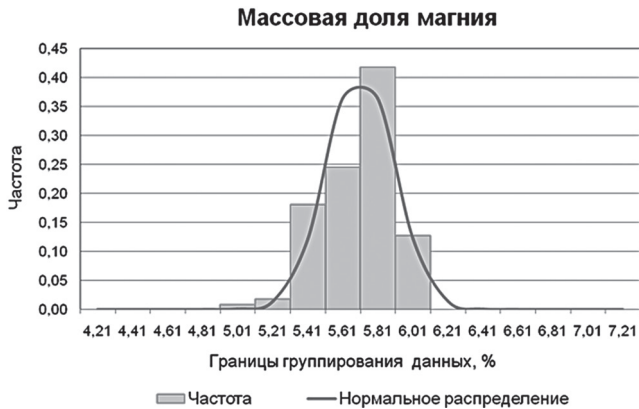


Рис. 1. Гистограмма распределения магния в плавках ФСМг5Ла

влияющие факторы – технология выплавки, температурные режимы, длительность плавки, перемешивание сплава, способы разливки, режимы охлаждения и т. п.

Перенос центра тяжести процедур обеспечения качества с контроля готовой продукции на контроль стабильности качества плавки, составляющих партии, обеспечивает надежность поставок и снижает риск потребителя при входном контроле.

При контроле производства модификаторов в условиях ОАО «НИИМ» был выбран алгоритм статистического анализа на основе построения пары контрольных карт – карты индивидуальных значений ($X_{инд.}$) и скользящего размаха (MR) [6]. В качестве скользящего размаха используют размах контролируемого показателя качества между текущей и предыдущей плавками.

Для построения контрольных карт (КК) набирали данные по химическому составу плавки, выплавленных на одном агрегате и по отработанной технологии для данной марки сплава. Использование КК для индивидуальных значений и скользящего размаха предполагает обязательную проверку закона распределения исследуемой случайной величины (показателя качества процесса) [7]. Все расчеты предполагают нормальный, или близкий к нормальному, закон распределения.

Ниже приведены гистограммы распределения содержания магния и лантана в плавках модификатора магниевый ФСМг5Ла. На рис. 1, 2, кроме гистограмм распределения, приведены кривые теоретического нормального распределения с выборочными средними и стандартными отклонениями, оцененными при построении гистограмм. Как видно из рис. 2, 3, гистограммы свидетельствуют об отсутствии существенного отклонения от нормального закона распределения, что позволяет использовать процедуры SPC для исследования стабильности процессов производства данного модификатора.

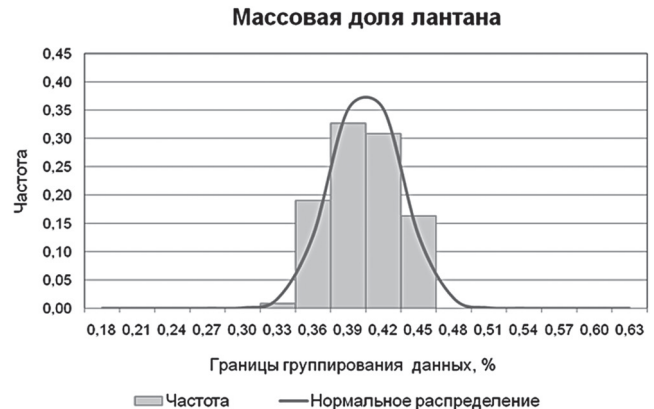


Рис. 2. Гистограмма распределения лантана в плавках ФСМг5Ла

Для оценки стабильности процесса были построены КК индивидуальных значений и скользящего размаха. Расчет скользящего размаха проводили по формуле:

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}|, \quad (1)$$

где X_i – массовая доля контролируемого компонента в текущей и предыдущей плавках, %; i – текущий номер плавки по порядку исследований.

После набора данных для всей выборки за исследуемый период рассчитывали: среднее индивидуальных значений

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_k}{k}, \quad (2)$$

среднее скользящих размахов

$$\bar{R} = \frac{MR_2 + MR_3 + \dots + MR_k}{k - 1}, \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_c = \bar{R} / 1,128 \quad (4)$$

значения стандартных отклонений

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}, \quad (5)$$

где k – количество плавки в выборке.

Далее рассчитывали среднее (настройку процесса) и контрольные границы:

$$CL_X = \bar{X}, \quad CL_R = \bar{R}, \quad (6)$$

$$UCL_X = \bar{X} + 2,66\bar{R}, \quad LCL_X = \bar{X} - 2,66\bar{R}, \quad (7)$$

$$UCL_R = 3,267\bar{R}, \quad LCL_R = 0, \quad (8)$$

где CL – средняя линия для контрольных карт; UCL, LCL – верхняя и нижняя контрольные границы; X, R – индексы контрольных карт индивидуальных значений и скользящего размаха соответственно.

Исследовали производство модификаторов указанной марки за два периода производства: 2009 г. – 39 плавки и 2011 г. – 50 плавки. Результа-

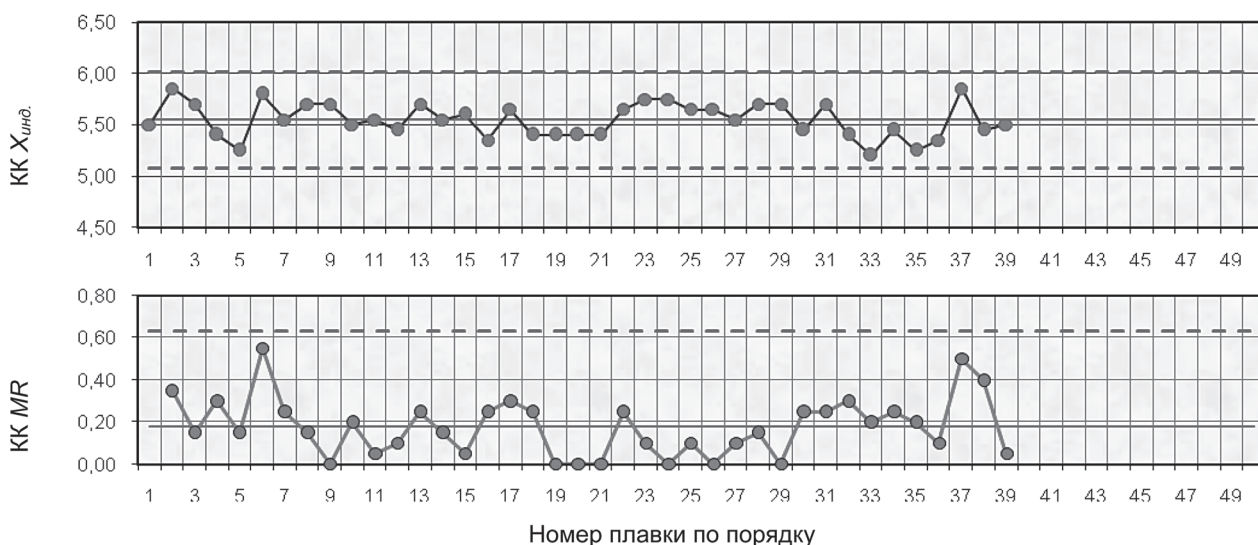


Рис. 3. Анализ стабильности содержания магния (2009 г.)

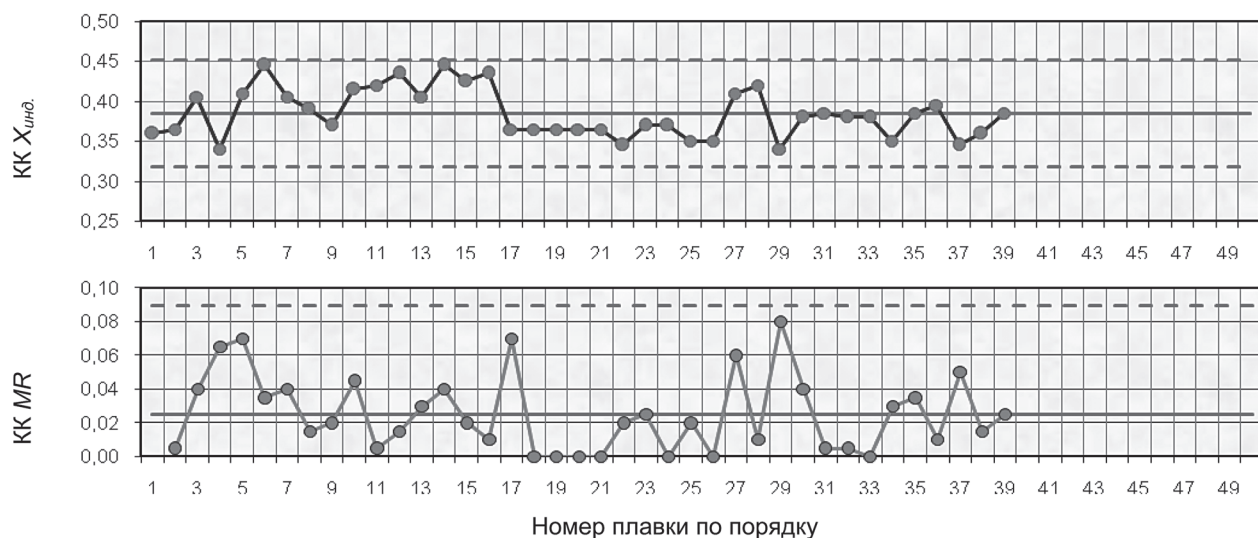


Рис. 4. Анализ стабильности содержания лантана (2009 г.)

ты расчетов по формулам (6) и (7) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры контрольных карт

Год	Элементы	$UCL_X, \%$	$CL_X, \%$	$LCL_X, \%$	$UCL_R, \%$	$CL_R, \%$	$LCL_R, \%$
2009	Магний	6,018	5,549	5,080	0,629	0,176	0
	Лантан	0,451	0,384	0,318	0,090	0,025	0
2011	Магний	6,008	5,587	5,166	0,564	0,158	0
	Лантан	0,457	0,383	0,308	0,100	0,028	0

На рис. 3, 4 приведены КК по данным 2009 г. Анализ КК показывает отсутствие особых точек на картах, т. е. стабильность производства подтверждается.

На рис. 5, 6 приведены КК по данным 2011 г. Анализ КК также показывает отсутствие особых точек на картах, т. е. стабильность производства подтверждается. При этом изменчивость процесса снизилась, что говорит о повышении качества поставок. Для оценки приемлемости процесса с точ-

ки зрения потребителя (требований нормативных документов на продукцию или контрактов) используют показатели возможности процесса [8], для стабильных процессов это показатели воспроизводимости C_p и C_{pk} .

Показатели воспроизводимости процессов рассчитывали по формулам:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_c}, \quad (9)$$

$$CPU = \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma_c}, \quad CPL = \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma_c}, \quad (10)$$

$$C_{pk} = \min(CPU; CPL), \quad (11)$$

где USL и LSL – границы поля допуска на содержание контролируемых элементов, верхняя и нижняя соответственно, %.

Здесь величина σ_c характеризует присущую процессу изменчивость. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

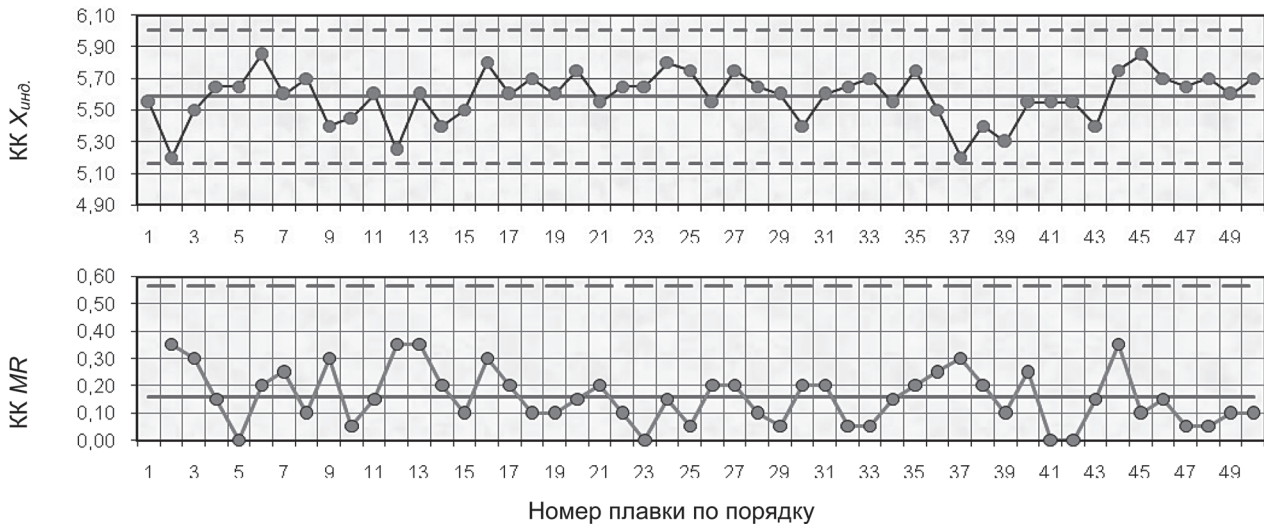


Рис. 5. Анализ стабильности содержания магния (2011 г.)

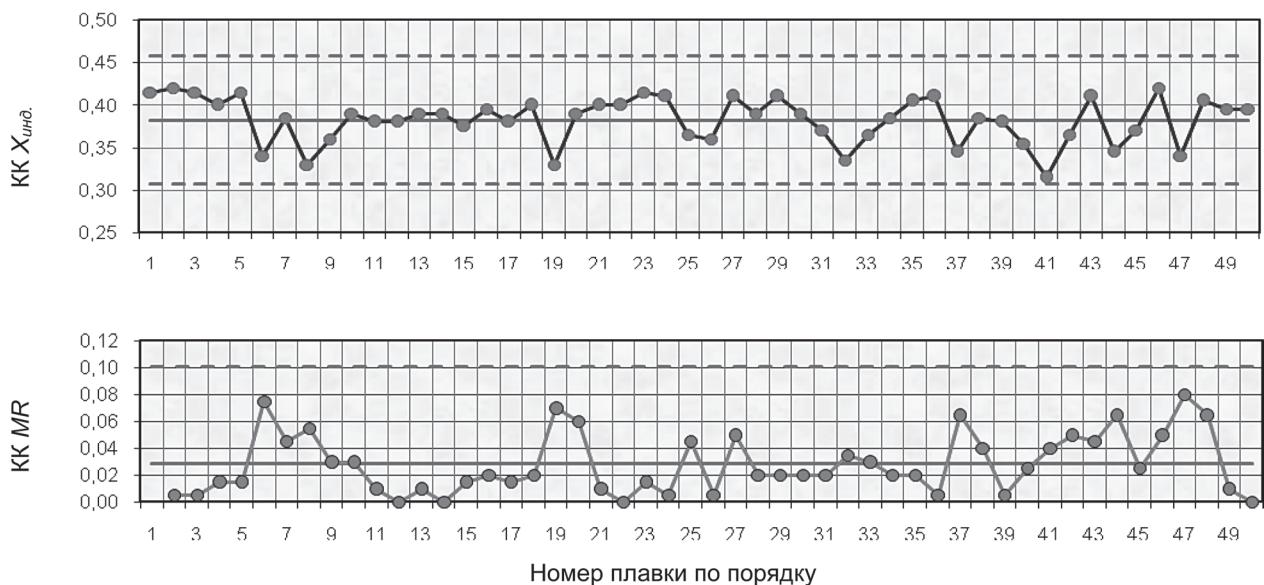


Рис. 6. Анализ стабильности содержания лантана (2011 г.)

Таблица 2. Параметры воспроизводимости процесса производства ФСМг5Ла

Элемент	Год	USL, %	LSL, %	σ_c , %	σ_T , %	C_p	C_{pk}
Магний	2009	6,00	5,20	0,16	0,17	0,85	0,74
	2011			0,14	0,16	0,95	0,92
Лантан	2009	0,45	0,30	0,022	0,030	1,12	0,98
	2011			0,025	0,027	1,00	0,90

Полученные значения C_p и C_{pk} близки к 1 по данным 2011 г. и соответственно выше данных 2009 г., что свидетельствует об эффективности принимаемых мер по совершенствованию процессов производства модификаторов в ОАО «НИИМ».

При анализе данных табл. 2 необходимо учитывать, что вариация процесса, характеризующая изменчивость (и в конечном итоге неоднородность партий продукции), складывается из истинной изменчивости технологического процесса и изменчивости, вносимой методиками контроля качества

(см., например, анализ MSA). С учетом сказанного можно записать выражение:

$$\sigma_{\text{наб}}^2 = \sigma_{\text{реал}}^2 + \sigma_{\text{проб}}^2 + \sigma_{\text{МКХА}}^2, \quad (12)$$

где $\sigma_{\text{наб}}$ – стандартное отклонение контролируемого показателя, наблюдаемое при анализе процесса, %; $\sigma_{\text{реал}}$ – стандартное отклонение, характеризующее технологическую (реальную) изменчивость процесса, %; $\sigma_{\text{проб}}$ – стандартное отклонение, характеризующее суммарную погрешность отбора и подготовки проб, %; $\sigma_{\text{МКХА}}$ – стандартное отклонение, характеризующее погрешность, вносимую методикой количественного химического анализа, %.

Учет погрешности отбора проб трудоемкая процедура и не для всех показателей качества он вообще доступен из-за невозможности точно определить соответствующие функции распределения. Но можно учесть влияние изменчивости методик

количественного анализа (МКХА), при этом можно записать следующее соотношение:

$$\sigma_{\text{наб}^*}^2 = \sigma_{\text{наб}}^2 - \sigma_{\text{МКХА}}^2, \quad (13)$$

где $\sigma_{\text{наб}^*}$ – стандартное отклонение, скорректированное на погрешность МКХА, %.

Нормативы точности МКХА установлены в процессе метрологической аттестации соответствующих методик и выражаются в виде значения показателя σ_R . Действующая в химической лаборатории НИИМ система качества позволяет оценить соответствие фактической точности контроля нормированным значениям и фактическую величину $\sigma_{\text{МКХА}}$.

По результатам расчетов с использованием формул (5) и (6), в частности, для магния и лантана имеют место следующие значения σ_R , $\sigma_{\text{МКХА}}$ и соответствующие скорректированные значения: σ_{c^*} , C_{p^*} и C_{pk^*} (табл. 3).

Таблица 3. Скорректированные показатели точности и воспроизводимости

Элемент	$\sigma_R, \%$	$\sigma_{\text{МКХА}}, \%$	$\sigma_{c^*}, \%$	C_{p^*}	C_{pk^*}
Магний	0,15	0,078	0,116	1,15	1,11
Лантан	0,060	0,013	0,021	1,17	1,06

Сравнение данных, приведенных в табл. 2, 3, показывает, что величины индексов воспроизводи-

мости для реальных процессов выше наблюдаемых в процессе исследований, следовательно, реальная изменчивость процессов производства ниже измеренных значений. Таким образом, проведенный анализ (SPC) подтверждает высокую надежность поставок модификатора ФСМг5Ла.

Использование SPC особенно важно для организации процедур контроля качества продукции с учетом высоких погрешностей методик МКХА сравнительно с требованиями ТУ и контрактов. Подтвержденная статистическая устойчивость процессов производства позволяет в ряде случаев увеличить точность контроля за счет снижения количества опробуемых плавок при одновременном введении их повторных анализов. При этом для общей погрешности контроля в случае повторного анализа одной пробы от плавки [9] имеет место выражение вида:

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_{\text{МКХА}}^2/k + \sigma_{\text{проб}}^2, \quad (14)$$

где k – количество повторов анализа пробы.

Очевидно, что повышение величины k снижает общую погрешность контроля и увеличивает надежность оценки стабильности процесса, что в свою очередь повышает надежность поставщика продукции.

Литература

1. Контроль качества ферросплавов: Спр. изд. / Ю. Л. Плинер, Л. Ф. Первов, В. Г. Мизин и др. М.: Металлургия, 1993.
2. Анализ металлов. Пробоотбор. пер. с нем.; под ред. В. Г. Мизина и Р. Б. Кричевец. М.: Металлургия, 1981.
3. ГОСТ Р 50779.11-2000 (ИСО 3534.2-93). СМ. Статистическое управление качеством. Термины и определения.
4. ГОСТ Р ИСО 11462-1-2007 СМ. Руководство по внедрению статистического управления процессами. Ч. 1. Элементы.
5. ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91). СМ. Контрольные карты Шухарта.
6. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011 СМ. Контрольные карты. Ч. 1. Общие принципы.
7. ГОСТ Р ИСО 5479-2002 СМ. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.
8. ГОСТ Р ИСО 2174-2010 СМ. Статистики пригодности и воспроизводимости процесса для количественных характеристик качества.
9. ГОСТ 17260-2009 (ИСО 3713:1987). Ферросплавы, хром и марганец металлические. Общие требования к отбору и подготовке проб.