

**МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ**

УДК 669.154:532.74

© Скребцов А.М.<sup>1</sup>, Макуров С.Л.<sup>2</sup>, Качиков А.С.<sup>3</sup>**КЛАСТЕРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА, ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ФИГУРА И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ**

*По результатам высокотемпературных рентгеновских исследований жидких металлов нашли, что наследственная структура жидкого металла зависит от сингонии кристаллов твердого металла. Форма кластеров – не шар, а параллелограмм или выпуклый многогранник.*

**Ключевые слова:** *металлический расплав, рентгеноструктурный анализ, кластер, геометрическая форма кластера.*

*Скребцов О.М., Макуров С.Л., Качиков О.С. Кластери металевого розплаву, їх геометрична фігура і руйнування при нагріванні. За результатами високотемпературних рентгенівських досліджень рідких металів знайшли, що спадкова структура рідкого металу залежить від сингонії кристалів твердого. Форма кластерів – не куля, а паралелограм або випуклий багатогранник.*

**Ключові слова:** *металевий розплав, рентгеноструктурний аналіз, кластер, геометрична форма кластера.*

*O.M. Skrebtsov, S.L. Makurov, O.S. Kachikov. Metal melt clusters, their geometry and destruction at heating. Possibilities of using X-rays in the study of the structure theory of liquid metal melts and the published data results have been investigated in order to improve this theory. In the theory of liquid metal melts there still remains a lot of subjects under discussions now. For example according to modern concepts of the liquid structure it includes metal clusters and disordered melt zone. Both structures are constantly exchanging atoms. According to expert information, for example, some authors (V.I. Arkharov, B.A. Baum et al.) believe that the overheating of the melt by 100-200 degrees above the liquidus point leads to complete destruction of the cluster. According to others, the destruction of clusters occurs only close to the boiling temperature of the melt. Besides it is not clear whether a cluster is a ball or convex polyhedron? As a result of high-temperature X-ray studies of liquid metals we have found that the genetic structure of a liquid metal depends on the crystal system of solid metal crystals. X-rays interference from the liquid metal clusters may occur when there are two or more rows of vibrating atoms, arranged in parallel planes. Therefore many authors who consider clusters to be spherical are wrong. Apparently a cluster is a parallelogram or a convex polyhedron.*

**Keywords:** *molten metal, X-ray analysis, a cluster, its geometric shape.*

**Постановка проблеми.** В теорії жидких металлических расплавов в настоящее время остается много неясных вопросов. Например, по современным представлениям строения жидкого металла, которые включают в себя понятие кластеров металла и разупорядоченной зоны расплава. Обе эти структуры постоянно обмениваются атомами друг с другом. В литературе распад кластеров после плавления металла недостаточно изучен. Так, например, некоторые авторы (В.И. Архаров, Б.А. Баум и др.) считают, что перегрев расплава на 100-200 градусов над точкой ликвидуса приводит к полному разрушению кластеров. По другим данным, разрушение

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [aleksej887@mail.ua](mailto:aleksej887@mail.ua)

кластеров наступає тільки вблизи температури кипіння расплава. Не вполне ясно, яку форму має кластер – шар или выпуклий многогранник?

Задача настоящей работы заключается в том, чтобы усовершенствовать, хотя бы частично, на основе использования оригинальных экспериментов теорию строения жидких металлических расплавов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В начале 20 века Рентгеном были открыты рентгеновские лучи – коротковолновые электромагнитные излучения с длиной волны  $0,2 \div 0,002$  нм. Межатомные расстояния в кристаллах и в жидком расплаве, особенно вблизи их температуры плавления [1], имеют величины того же порядка, что и длина волн рентгеновских лучей. Поэтому решетка металла (твердого или жидкого) является идеальной дифракционной решеткой для рентгеновских лучей. Такое открытие сделал физик П.Н. Лебедев [2].

Интерференцию рентгеновских лучей от жидких металлов при температурах, близких к температуре кристаллизации, впервые наблюдал академик АН Украины В.И. Данилов [3]. Другие авторы интерференцию рентгеновских лучей при значительных перегревах над температурой их кристаллизации изучали в работах [4, 5] – для железа, в работе [6] – для алюминия, в работе [7] – для цинка, кадмия и цезия, в работах [7, 8] – для олова. Материал этих публикаций может быть использован заново для некоторых усовершенствований теории строения жидких металлических расплавов.

**Цель работы** – предварительный анализ возможностей использования рентгеновских лучей при изучении теории строения жидких металлических расплавов и анализ результатов работы [4-8] с целью совершенствования этой теории.

**Изложение основного материала.** Авторы многих известных работ [1] полагают, что во всякой жидкости (в том числе и в растворах металла) из-за межчастичного взаимодействия атомов друг с другом возможно возникновение трех типов структур:

- а) *мгновенной* – проявляющейся в период времени, меньший одного колебания атома;
- б) *средней* – для периода времени, большего одного колебания атома, обычные свойства жидкостей плотность, вязкость, электропроводность и т.п.
- в) *квазикристаллической* – когда атомы колеблются на своих местах, но нет их перескоков из одного положения в другое (как в твердом теле) или они могут перескакивать из одного равновесного положения в другое (как в жидкости).

Именно последняя структура образует ряд параллельных плоскостей колеблющихся атомов, способных как зеркало отражать рентгеновские лучи и создавать их интерференцию. Квазикристаллическая структура возникает в одном месте жидкости, затем она разрушается и снова возникает в другом. По выражению академика АН Украины А.И. Бродского, такая структура постоянно кочует по объему жидкости.

Г.В. Вульф и Брегги в 1914 г. показали, что интерференция рентгеновских лучей может быть истолкована как результат взаимодействия лучей с параллельными между собой плоскостями атомов кристаллической решетки [2, 9, 10].

Закон Вульфа-Брегги выражается формулой:

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda, \quad (1)$$

- где  $d$  – расстояние между параллельными плоскостями колеблющихся атомов в твердом или жидком металле;  
 $\theta$  – угол скольжения пучка рентгеновских лучей по отношению к отражающей плоскости;  
 $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения;  
 $n$  – порядок отражения (1-е, 2-е, 3-е и т.д.)

Впервые изучение жидкости (воды) с помощью рентгеновских лучей в 30-х годах прошлого века провел Стюарт [9]. Он обнаружил, что от жидкого состояния рентгеновские лучи отражаются под теми же углами, что и от твердого. По сравнению с твердым состоянием, излучение от жидкого состояния значительно размыто. Кроме этого, удается зафиксировать только первый максимум отражения под малыми углами. Остальные максимумы сильно размыты и часто не фиксируются раздельно.

Первые сравнительные рентгеноструктурные исследования твердых и жидких металлов

при температурах на 10-20°C выше их точки кристаллизации провел академик АН Украины В.И. Данилов [3]. В опытах использовали монохроматическое излучение рентгеновской трубки с медным или серебряным анодами. При изучении жидкого состояния поток рентгеновского излучения направляли на свободную поверхность образца. На примере некоторых металлов (висмута, олова и свинца) сделали вывод, что имеется определенное сходство молекулярной упаковки названных веществ.

Методика рентгеноструктурного исследования жидких металлов изложена в работе [8]. Поток рентгеновских лучей направляют на поверхность жидкости и получают первичную кривую интенсивности  $I$  рассеянного излучения, которое имеет ряд максимумов. Путем математической обработки вычисляют функцию радиального распределения атомов в расплаве (ФРРА). Она показывает, какое количество атомов находится в жидкости на расстоянии  $r$  от атома, принятого за центральный. Максимум первичного излучения  $I_0$  и ФРРА коррелируют друг с другом и уменьшаются с повышением температуры.

На рисунке в качестве примера для жидкого рубидия при температурах 313, 433, 513 и 633 К представлены величины первого максимума отражения  $I_i$  рентгеновского излучения в зависимости от величины  $\sin\theta/\lambda$ . Как видно из рисунка, каждая кривая имеет свой максимум при значении  $\sin\theta/\lambda \approx 0,12$ . Если проанализировать величины этих максимумов, то обнаруживается закономерность – чем больше  $T_i$ , тем меньше значение  $I_i$ .

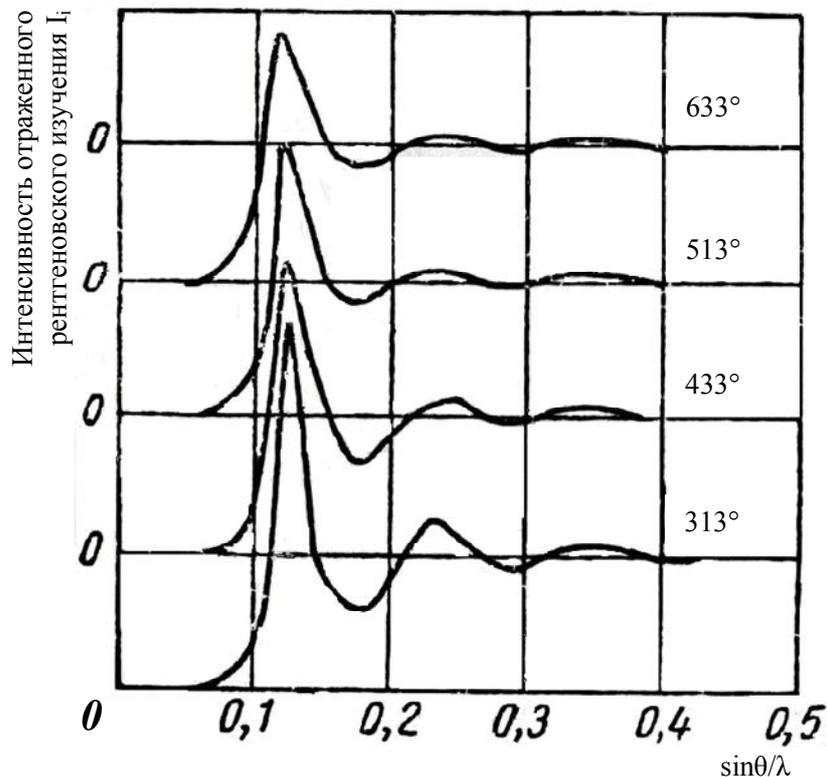


Рисунок – Кривые величин интенсивности отраженного рентгеновского излучения  $I_i$  для жидкого рубидия при температурах 313, 433, 513 и 633 К в зависимости от величины  $\sin\theta/\lambda$  [3]

Считаем, что интенсивность излучения первого максимума отражения  $I_0$  максимальна при температуре кристаллизации металла  $T_l$ , затем с повышением температуры до  $T_i$ , как показывает опыт, линейно уменьшается. Величина  $I_i/I_0$  есть доля объема нераспавшихся кластеров. В первом приближении можно считать, что между величинами  $I_i/I_0$  (доля от единицы оставшихся кластеров) и перегревом расплава над температурой кристаллизации  $T_l$ , т.е.  $T_i/T_l$ , может быть линейная зависимость.

При обработке результатов рентгеноструктурных высокотемпературных исследований работ [4-8] учли следующие очевидные факты теории жидких металлов;

а) при температуре расплавления металла интенсивность отраженного рентгеновского излучения  $I_i = I_0$  (кластеры еще не начали разрушаться);

б) есть температура  $T_{cy}$ , при которой расплав переходит полностью в разупорядоченное состояние; как отмечается в работе [11], при плавлении вещество теряет дальний порядок в расположении атомов, а при  $T_{cy}$  – ближний порядок; при  $T_i < T_{cy}$  вещество ведет себя как обычные жидкости; при  $T_i > T_{cy}$  оно переходит в газоподобное состояние. Методы определения зависимости  $T_{cy}$  от температуры кристаллизации металла изложены в работе [12].

Начальные участки зависимости  $I_i/I_0$  экстраполированы прямыми линиями, которые продолжают до пересечения с осью температур  $T_i/T_{л}$ . Таким путем нашли экстраполяционное отношение  $(T_i/T_{cy})_{экс}$ , (см. табл.). В работе [12] показано, что по значению давления пара металла:

$$(T_{cy}/T_{л})_{д.п.} = 0,78 \cdot T_{к}, \quad (2)$$

где  $T_{к}$  – температура кипения расплава, К.

Таблица

Величина отношения  $(T_{cy}/T_{л})_{экс}/(T_{cy}/T_{л})_{д.п.}$  и координационные числа для разных металлов

Элементы	Fe	Al	Rb	Sn	Ga	Zn	Cd
Отношение $(T_{cy}/T_{л})_{экс}/(T_{cy}/T_{л})_{д.п.}$	1,16	1,25	1,28	1,48	1,88	2,35	3,54
Решетка (корд. число)	K8	K12	K8	тетр.	тетр.	Г6	Г6

Очевидно, чем больше упомянутое отношение, тем сильнее отличается наследственная структура жидкого расплава от исходной структуры твердого. Меньше всего структура жидкого отличается от твердого для металлов высшей сингонии (кубическая решетка – Fe, Al, Rb). С понижением сингонии исходного металла увеличивается степень разупорядочения жидкого по сравнению с твердым.

*О расчетах количества атомов в кластерах металлического расплава и их форма.* Выше уже были упомянуты три формы существования атомов в жидкости. В одной из своих работ академик АН Украины А.И. Бродский отмечает, что в жидкости «небольшое количество молекул группируются в правильную кристаллическую решетку, которая затем разрушается с тем, чтобы возникнуть в другом месте. Таким образом, не теряя своей подвижности, молекулы в каждый момент более или менее полно ориентированы и объем жидкости заполнен многочисленными, кратковременно существующими участками кристаллической решетки» (так называемой квазикристаллической структурой жидкости – см. выше).

В настоящее время известны несколько способов определения числа атомов в кластере – экспериментальный и теоретические.

Экспериментальный способ изучения размеров кластеров металлического расплава осуществляется путем использования результатов явления интерференции ядерных излучений (рентгеновские лучи, электроны, нейтроны), отраженных от жидкого металла под разными направлениями от первоначального. Методика экспериментов описана в работе [13]. Первичным результатом изучения дифракции отраженного ядерного излучения является убывающая монотонная функция зарегистрированного излучения с размытыми максимумами и минимумами. Путем аналитической обработки этой кривой строят волнообразную возрастающую функцию распределения атомов (ФРРА) в жидкости.

Решетка металла «размывается» при плавлении, а дискретным линиям рентгенограмм твердого металла соответствуют размытые максимумы отраженного излучения в жидкости. Теоретическое добавление новых координационных сфер к атому, принятому за центральный, увеличивает «размывание» кристаллической решетки. Этот процесс проводится до тех пор, пока не совпадут построенная теоретическая кривая зарегистрированной интенсивности отражения с аналогичным результатом экспериментальных исследований.

Теоретические методы определения числа атомов кластера выполнили авторы работ [14-16]. Во всех работах число атомов в кластере вычисляли, исходя из взаимодействия атомов друг с другом в объеме кластера, а также взаимодействия атомов кластера с разупорядоченной зоной

расплава. В работах [14, 15] расхождения между количеством атомов в кластере изменяются в пределах  $0,50 \div 1,45$ . В работе [16] сильно завышены значения числа атомов в кластере по сравнению с авторами работ [14, 15] – в 10-40 раз. Так, например, для Hg число атомов по расчетам работ [14-16] составляют соответственно 832, 6053, 16200; для Li согласно тем же работам – 535, 1107, 85845, а для Fe, соответственно, – 2460, 1832 и 7700.

Из приведенных цифр видна большая разница в вычислениях числа атомов в кластерах для различных атомов.

Особо следует подчеркнуть, что авторы работ [14-16] считают, что кластеры имеют шаровидную форму и пользуются понятием его диаметра.

Как видно из результатов более ранней работы [12] и настоящего исследования, размеры кластеров уменьшаются практически линейно с повышением температуры нагрева металла. Если бы кластеры имели форму шара, то их размер уменьшался бы пропорционально квадрату его радиуса. Практика опровергает это предположение, т.е. размер кластера уменьшается значительно быстрее, чем обуславливается его предполагаемой геометрической формой.

Как видно из выше изложенного, шаровидная форма кластера не может создать интерференцию рентгеновских лучей. Результаты нашего исследования показывают, что кластер имеет не форму шара, а форму выпуклого многогранника с плоскостями рядов атомов, параллельных друг другу.

### Выводы

1. Проанализированы результаты высокотемпературных исследований жидких металлических расплавов. Нашли, что кристаллы металлов с более низкой сингонией в твердом состоянии (Sn, Ga, Zn, Cd) при переходе в жидкое состояние изменяют свою наследственную структуру сильнее по сравнению с металлами высшей сингонии в твердом состоянии (Fe, Al, Pb).

2. Интерференция рентгеновских лучей от кластеров жидкого металла может проявляться при наличии двух или более рядов колеблющихся атомов, расположенных в параллельных плоскостях. Поэтому представления многих авторов о шаровидной форме кластера являются ошибочными. По-видимому, кластер имеет форму многогранника с выпуклыми гранями.

### Список использованных источников:

1. Вертман А.А. Свойства расплавов железа / А.А. Вертман, А.М. Самарин. – М. : Наука, 1969. – 280 с.
2. Батаев В.А. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей / В.А. Батаев, А.А. Батаев, А.А. Алимов. – М. : Флинта; Наука, 2007. – 224 с.
3. Данилов А.И. О характере упорядоченности атомной структуры жидких металлов / А.И. Данилов, В.И. Данилов, Е.З. Спекторю // Проблемы металловедения и физики металлов. – М. : Металлургиздат, 1952. – № 3. – С. 336-354.
4. О структуре ближнего порядка в жидком железе, кобальте и никеле / Е.В. Клименков, П.В. Гельд, Б.А. Баум, Ю.А. Базин // Доклады Академии наук СССР. – 1975. – Т. 222, № 1. – С. 71-73.
5. Слуховский О.И. Структурные изменения жидкого железа / О.И. Слуховский, А.С. Ляшко, А.В. Романова // Украинский физический журнал. – 1975. – Т. 20, № 12. – С. 1961-1965.
6. Ватолин И.А. Влияние температуры на структуру жидкого алюминия / И.А. Ватолин, Э.А. Пастухов, В.Н. Сермягин // Доклады Академии наук СССР. – 1975. – Т. 222, № 3. – С. 641-642.
7. Вагнер К.Н. Температурная зависимость интерференционной функции (структурного фактора) жидких металлов / К.Н. Вагнер // Жидкие металлы. Материалы третьей международной конференции по жидким металлам : пер. с англ. – М. : Металлургия, 1980. – С. 92-98.
8. Арсентьев П.П. Металлические расплавы и их свойства / П.П. Арсентьев, Л.А. Коледов. – М. : Металлургия, 1976. – 376 с.
9. Stewart G.X. X-ray diffusion in water: the nature of molecular association / G.X. Stewart // Physical Review. – 1931. – V. 37, № 1. – P. 9-16.
10. Уманский Я.С. Рентгенография металлов / Я.С. Уманский. – М. : Машгиз, 1967. – 236 с.
11. Филлипов Е.С. Строение, физика и химия металлических расплавов / Е.С. Филлипов. – М. : Металлургия, 1995. – 304 с.

12. Скребцов А.М. Особенности структурных превращений металлических расплавов в интервале температур ликвидус кипение / А.М. Скребцов // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 14-19.
13. Дутчак Я.И. Рентгенография жидких металлов / Я.И. Дутчак. – Львов : Вища школа, 1977. – 163 с.
14. Ладьянов В.И. Оценка времени жизни кластеров в жидких металлах / В.И. Ладьянов, И.А.Новохатский, С.В. Логунов // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1995. – № 2. – С. 13-22.
15. Пат. 23458 Україна, МПК<sup>5</sup> G 01 N 9/24, G 01 N 33/20. Спосіб визначення кількості атомів в кластері металевого розплаву (спосіб Скребцова О.М.) / О.М. Скребцов. – № u20070083; заявл. 02.01.07; опубл. 25.05.07, Бюл. № 7.
16. Рыжиков А.А. Некоторые особенности процессов плавления и структуры жидких металлов / А.А.Рыжиков, И.В. Гаврилин // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький : Волго-Вятское книжное издательство, 1969. – С. 3-10.

#### References:

1. Vertman A.A. *Svoistva rasplavov zheleza* [The properties of iron melts]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 280 p. (Rus.)
2. Bataev V.A., Bataev A.A., Alimov A.A. *Metody strukturnogo analiza materialov i kontrolia kachestva detalei* [The methods of the structural analysis of materials and quality control of parts]. Moscow, Flint; Science Publ., 2007. 224 p. (Rus.)
3. Danilov A.I., Danilov V.I., Spektorii E.Z. O kharaktere uporiadochennosti atomnoi struktury zhidkikh metallov [The nature of the orderliness of the atomic structure of liquid metals]. *Problemy metallovedeniia i fiziki metallov – Problems of Metallurgy and Metal Physics*, 1952, no. 3, pp. 336-354. (Rus.)
4. Klimenkov E.V., Held P.V., Baum B.A., Bazin J.A. O strukture blizhnego poriadka v zhidkom zheleze, kobal'te i nikle [On the short-range order structure in the liquid iron, cobalt and nickel]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1975, vol. 222, no. 1, pp. 71-73. (Rus.)
5. Sluhovsky O.I., Lyashko A.S., Romanova A.V. Strukturnye izmeneniia zhidkogo zheleza [Structural changes of liquid iron]. *Ukrainskii fizicheskii zhurnal – Ukrainian journal of physics*, 1975, vol. 20, no. 12, pp. 1961-1965. (Rus.)
6. Vatolin I.A., Pastuhov E.A., Sermyagin V.N. Vliianie temperatury na strukturu zhidkogo aliuminiia [Effect of temperature on liquid aluminum structure]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1975, vol. 222, no. 3, pp. 641-642. (Rus.)
7. Wagner K.N. Temperaturnaia zavisimost' interferentsionnoi funktsii (strukturnogo faktora) zhidkikh metallov [The temperature dependence of the interference function (structural factor) of liquid metals]. *Zhidkie metally. Materialy tret'ei mezhdunarodnoi konferentsii po zhidkim metallam – Liquid metally. Proceedings of the Third International Conference on liquid metals*, 1980, pp. 92-98. (Rus.)
8. Arsent'ev P.P. *Metallicheskie rasplavy i ikh svoistva* [The metal melts and their properties]. Moscow, Metallurgy Publ., 1976. 376 p. (Rus.)
9. Stewart G.X. X-ray diffusion in water: the nature of molecular association. *Physical Review*, 1931, vol. 37, no. 1, pp. 9-16.
10. Umansky Y.S. *Rentgenografiia metallov* [Radiography metals]. Moscow, Mashgiz Publ., 1967. 236 p. (Rus.)
11. Filippov E.S. *Stroenie, fizika i khimiia metallicheskikh rasplavov* [The structure, physics and chemistry of metal melts]. Moscow, Metallurgy Publ., 1995. 304 p. (Rus.)
12. Skrebtsov A.M. Osobennosti strukturnykh prevrashchenii metallicheskikh rasplavov v intervale temperatur likvidus kipenie [Features of structural transformations of metal melts in the temperature range of the liquidus point]. *Stal' – Steel*, 2010, no. 10, pp. 14-19. (Rus.)
13. Dutschak Y.I. *Rentgenografiia zhidkikh metallov* [Radiography of liquid metals]. Lviv, Vishcha School Publ., 1977. 163 p. (Rus.)
14. Ladyanov V.I., Novohatsky I.A., Logunov S.V. Otsenka vremeni zhizni klasterov v zhidkikh metallakh [Estimation of the lifetime of clusters in liquid metals]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Metally – Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals*, 1995, no. 2, pp. 13-22. (Rus.)
15. Skryebtsov A.M. *Sposib viznachennia kil'kosti atomiv v klasteri metallevogo rozplavu (sposib*

- Skrebtsova O.M.*) [The method of determining the number of atoms in the cluster metal melt (method Skryebtsova O.M.)]. Patent UA, no. 23458A, 2007. (Ukr.)
16. Ryzhikov A.A., Gavrilin I.V. Nekotorye osobennosti protsessov plavleniia i struktury zhidkikh metallov [Some features of the melting process and the structure of liquid metals]. *Progressivnaia tekhnologiia liteinogo proizvodstva – Advanced foundry technology*, 1969, pp. 3-10. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 20.10.2016

УДК 669.184:519.22

© Бондарь В.И.<sup>1</sup>, Тарасюк Л.И.<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

*На основе данных о химическом составе и температуре металлического расплава, полученного в условиях кислородного конвертирования с использованием пакета прикладных программ StatSoft Statistica 8.0, установлены односторонние зависимости отклика содержания углерода в расплаве от температуры расплава и его химического состава. Рассчитаны линейные уравнения регрессий зависимостей между объясняемой и объясняющими переменными и произведен анализ достоверности модельных параметров этих зависимостей.*

**Ключевые слова:** регрессионный анализ, нормальность распределения, отклик, форма зависимости, достоверность модельных параметров.

**Бондарь В.И., Тарасюк Л.И. Дослідження процесу кисневого конвертування методами математичної статистики.** На основі даних про хімічний склад і температуру металевого розплаву, отриманого в умовах кисневої конвертації з використанням пакету прикладних програм StatSoft Statistica 8.0, встановлені односторонні залежності відгуку вмісту вуглецю в розплаві від температури розплаву та його хімічного складу. Розраховані лінійні рівняння регресій між з'ясовною і пояснюючими змінними і зроблений аналіз достовірності модельних параметрів цих залежностей.

**Ключові слова:** регресійний аналіз, нормальність розподілу, відгук, форма залежності, достовірність модельних параметрів.

**V.I. Bondar, L.I. Tarasjuk. Research of process of the oxygen converting by the methods of mathematical statistics.** An array of 177 meltings of the oxygen converter shop of Azovstal plant was formed for the analysis. The dependent variable is the carbon content [C] in the molten metal and independent variables being manganese [Mn], phosphorus [P] and sulphur [S] content, oxygen activity  $a_{[O]}$  and the melt temperature (T, °C). After excluding the variables that do not affect the value of [C], (T, °C), [Mn] and  $a_{[O]}$  were found to be significant. The constructed model  $[C] = f([Mn], a_{[O]}(T, °C))$  is adequate: the value of the Fisher criterion is – 42,06 with the significance level much less than 0,05. The introduction of the additional variable «converter» did not result in a significant improvement of the regression model – the value of the specified regression coefficient increased from 0,41 to 0,45. Histogram of the distribution of the remainders for the ob-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [bbvii.47@gmail.com](mailto:bbvii.47@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [sstts@list.ru](mailto:sstts@list.ru)