

УДК 669.154:532.74

А. М. Скребцов, С. Л. Макуров, А. С. Качиков

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА И ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЛИВКИ СТАЛИ В ЛИТЕЙНЫЕ ФОРМЫ

Подтверждено мнение академика В. И. Данилова, что жидкое состояние металла является коллоидной системой с большими поверхностями раздела фаз. Кластер металлического расплава имеет форму многогранника с выпуклыми гранями. Нагрев расплава стали перед выпуском из печи до температуры равновесной микронеоднородности расплава приводит к снижению брака металла.

Ключевые слова: квазикристаллическая структура, расплав, кластер, разупорядоченная зона, брак, металл.

Підтверджено думку академіка В. І. Данилова, що рідкий стан металу є колоїдною системою з великими поверхнями розділу фаз. Кластер металевого розплаву має форму багатогранника з випуклими гранями. Нагрівання розплаву сталі перед випуском з печі до температури рівноважної мікронеоднорідності розплаву призводить до зниження браку металу.

Ключові слова: квазікристалічна структура, розплав, кластер, зона неупорядкованості, брак, метал.

The opinion of academician V. I. Danilov that liquid metal is a colloidal system with large surfaces phase separation is confirmed. Cluster of molten metal has the shape of a polyhedron with convex brink. Heating the steel melt before until temperature of the equilibrium microinhomogeneity melt reduces the defect of metal.

Keywords: quasicrystal structure, melt, cluster, disordered zone, defect, metal.

Введение

Ранее жидкости, в том числе и жидкие металлы, рассматривались как уплотненный газ. Как отмечают авторы монографии [1], такая точка зрения справедлива только при температурах, близких к критическим.

В работе [1] детально рассмотрено исследование различных свойств жидких металлов (плотность, вязкость, поверхностное натяжение и т. д.) в зависимости от условий эксперимента. Однако в ней отсутствуют сведения о высокотемпературных рентгеноструктурных исследованиях жидких металлов. Упоминание о таких исследованиях отсутствуют и в другой более поздней работе тех же авторов [2].

Известный ученый в области жидкого состояния металлов Д. К. Белашенко от-

отмечает, что наличие в жидкости областей микронеоднородностей в науке не вызывает сомнений [3]. Однако, при этом неясными остаются следующие вопросы: а) размеры этих областей; б) их обогащение примесными элементами; в) устойчивость их в каком-либо температурном интервале.

К этому надо добавить, что практически все авторы публикаций считают, что эти микронеоднородности (кластеры, сиботаксы, комплексы и т. п.) имеют шаровидную форму. Углубленный анализ экспериментального материала по рентгеноструктурным исследованиям жидких металлов подвергает сомнению эту гипотезу.

Задача настоящей работы – дополнительно обобщить разрозненные в различных публикациях данные высокотемпературных рентгеноструктурных исследований жидких металлов, а также рассмотреть вопрос взаимосвязи перегрева стали над температурой ликвидуса с качеством готовой металлопродукции.

Краткая история вопроса

Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные колебания с длиной волны 0,2–0,002 нм. Эти лучи полностью проникаемы для легких элементов (начало таблицы Д. И. Менделеева) и полностью поглощаются тяжелыми элементами (конец таблицы Д. И. Менделеева) [4, 5].

Межатомное расстояние в кристаллической решетке – величина того же порядка, что и длина волн рентгеновских лучей. Поэтому решетка металла является идеальной дифракционной решеткой для рентгеновских лучей.

В своей работе академик А. И. Бродский [6] отметил, что «угол θ отражения рентгеновских лучей от кристалла должен быть разным для разных длин волн λ , для разных кристаллов и даже для разных граней одного и того же кристалла, которым соответствуют разные межатомные расстояния d ».

Как показали дальнейшие исследования, жидкие металлы могут являться дифракционными решетками для рентгеновских лучей [1].

Авторы многих известных работ [1] полагают, что во всякой жидкости из-за межчастичного взаимодействия атомов друг с другом возможно возникновение трех типов структур:

а – мгновенной, проявляющейся в период времени меньше одного колебания атома; характеризуется изменением плотности отдельных ее зон до 20–30 % среднего значения;

б – средней, существующей в период времени значительно больший одного колебания атома (обычные свойства жидкости – вязкость, плотность и т. д.);

в – промежуточный между *а* и *б*, или квазикристаллической, когда атомы колеблются каждый в своем равновесном положении (как в жидкости) и не совершают перескоков из одного положения в другое (как в твердом теле). Именно две и более плоскости атомов квазикристаллической структуры жидкости могут быть дифракционной решеткой для рентгеновских лучей и создавать эффект интерференции, который может быть зарегистрирован различными известными способами [4, 5].

Впервые изучение жидкости (воды) с помощью рентгеновских лучей в 30-х гг. XX в. провел Г. К. Стьюарт [7]. Он обнаружил, что от жидкого вещества рентгеновские лучи отражаются под теми же углами, что и от твердого. По сравнению с твердым, излучение от жидкого вещества значительно размыто. Кроме этого, удается зафиксировать только первый максимум отражения под малыми углами, остальные максимумы сильно размыты и часто не фиксируются раздельно.

Первые исследования структуры жидких металлов провел академик Академии наук Украины В. И. Данилов [8]. В опытах использовали монохроматическое излучение рентгеновской трубки с медным или серебряным анодами. Для разных металлов (висмута, олова и свинца) при температурах на 10–20 °С выше их точки кристаллизации получали рентгеновские интерференционные отражения от свободной поверхности образца.

Известные экспериментальные данные и варианты их обработки

Методика изучения расплавленных металлов при различных температурах подробно описана в работе [9]. Интенсивность излучения первого максимума отражения I_0 максимальна при температуре кристаллизации металла $T_{\text{л}}$, затем с повышением температуры до T_i интенсивность излучения I_i постепенно уменьшается. Считали, что величина I_i/I_0 есть доля объема не распавшихся кластеров, которая пропорциональна увеличению температуры расплава от $T_{\text{л}}$ до T_i . В первом приближении можно считать, что между величинами I_i/I_0 (доля от единицы оставшихся кластеров) и перегревом расплава над температурой кристаллизации, $T_{\text{л}}$, то есть $T_i/T_{\text{л}}$, есть линейная зависимость. На рис. 1 представлен пример изменения интенсивности отраженного излучения I_i расплавленного железа в интервале температур 1550-1750 °C [10]. Из рисунка следует, что с повышением температуры величина I_i/I_0 пропорционально уменьшается.

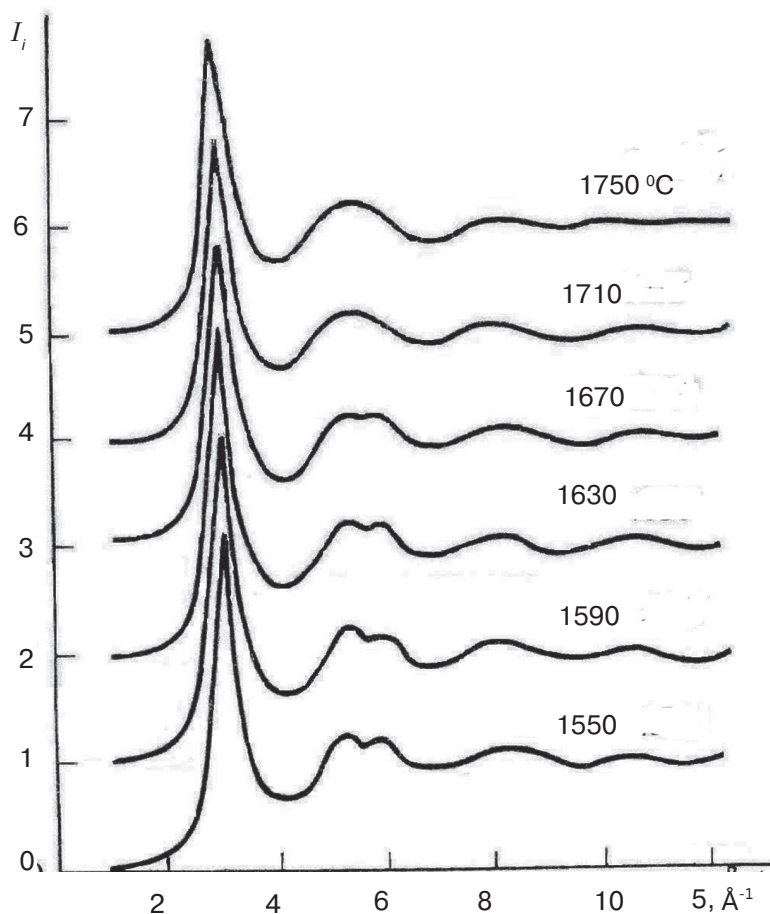


Рис. 1. Интенсивность I_i первого максимума отраженного рентгеновского излучения от жидкого железа при температурах 1550, 1590, 1630, 1670, 1710, 1750 °C [6]

В настоящей работе использовали данные для железа [10, 11], алюминия [12], цинка [13], кадмия [13], олова [9, 13], рубидия [4] и галлия [13].

Предложено два способа обработки экспериментальных данных. В первом способе анализировали (при уменьшении температуры кристаллизации металла) линейные экспериментальные зависимости между величинами I_i/I_0 и $T_i/T_{\text{л}}$. В работе [16] было показано, что между этими величинами обнаруживается пропорциональная зависимость, которую выразили уравнением вида:

$$I_i / I_0 = aT_i / T_{л} + b, \quad (1)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты.

Ниже, в таблице, элементы расположили в порядке уменьшения их температуры кристаллизации. В столбце 1 таблицы приведены символы элементов, а в столбце 2 – их температура кристаллизации. Коэффициенты уравнения (1), соответственно a и b , приведены в столбцах 3 и 4. Видна тенденция, что оба коэффициента по абсолютной величине уменьшаются с уменьшением температуры кристаллизации, прямые зависимости все больше отклоняются от вертикальной координатной оси. Максимальный перегрев жидкого металла в опыте над температурой кристаллизации элемента $T_{л}$, как видно из таблицы, уменьшается с уменьшением $T_{л}$; для тугоплавкого железа перегрев над температурой кристаллизации составляет 1,12, а для легкоплавкого галлия – 3,54. В столбце 6 таблицы приведена энергия кристаллической решетки E в стандартных условиях, а столбце 7 – ее отношение к температуре кристаллизации элемента $T_{л}$. Это отношение может характеризовать прочность кристаллической решетки. Из таблицы видна тенденция: прочность решетки тем меньше, чем меньше температура кристаллизации металлов и больше возможность их перегрева над этой температурой (столбец 5 таблицы).

Характеристики разупорядочения кластеров металлического расплава

Элемент	$T_{л},$ К	коэффициенты уравнения (1)		$T_i/T_{л},$ max	E реш., кДж/ моль	$E_{реш.}/T_{л}$	Тип кристаллической решетки	Число измерений	Литература
		a	b						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	1813	-2,00	3,00	1,12	406	0,78	K12	7	[10, 11]
Al	953	-0,72	1,72	1,69	314	0,33	K12	3	[12]
Zn	693	-0,47	1,47	1,19	132	0,19	Г6	1	[13]
Cd	594	-0,26	1,26	1,55	116	0,2	Г6	2	[13]
Sn	505	-0,20	1,20	2,80	302	0,6	тетр	6	[9, 13]
Rb	312	-0,49	1,49	2,03	86	0,28	K8	3	[4]
Ga	303	-0,10	1,10	3,54	277	0,91	тетр	4	[13]

Таким образом, обнаружена тенденция – с уменьшением температуры кристаллизации металлов наблюдаются линейные зависимости между долей распавшихся кластеров I_i/I_0 и перегревом расплава над температурой кристаллизации $T_i/T_{л}$. Зависимости для легкоплавких металлов, по сравнению с тугоплавкими, отклоняются от вертикальной оси координат значительно больше [16].

Во втором способе обработки данных сравнили экспериментальные и расчетные значения величин I_i/I_0 и $T_i/T_{л}$ при разных типах кристаллических решеток элементов. Для данных рентгеноструктурных исследований жидких металлов использовали два факта: при температуре $T_{л}$ значение $I_i/I_0 = 1$; при температуре T_{cy} (температура статистического упорядочения значения) $I_i/I_0 = 0$.

Надо заметить, что T_{cy} означает температуру статистического упорядочения атомов в жидкости, когда вблизи температуры ее кипения $T_{к}$ они начинают вести себя подобно газообразному состоянию. Величину T_{cy} в литературе определяли следующими тремя способами:

– в работе [14] для металлов – галлий, индий, олово, висмут, свинец, алюминий, бериллий, серебро, медь, никель, железо – методом сплюсненной капли были выполнены измерения плотности расплавов в широком интервале температур; имели место скачки плотности при температуре кристаллизации $T_{л}$ (теряется дальний

Получение и обработка расплавов

порядок в расположении атомов) и температуре T_{cy} статистического упорядочения атомов (теряется ближний порядок);

– в работе [15] для трех металлов (алюминий, олово, свинец) установили, что с повышением температуры их вязкость понижается до T_{cy} (как и в другой любой жидкости), а затем повышается (как в любом газе);

– в работе [16] для металлов анализировали изменения логарифма давления пара жидкого состояния вещества в зависимости от температуры T_{cy} . Для металлов – кадмия, бария, кальция, калия, марганца, лития, магния, молибдена, натрия, цезия, таллия – наблюдали одинаковый излом прямых линий.

Обобщением работ [14-16] получили общую кривую $T_{cy} = f(T_{л})$. Установили, что для всех металлов:

$$T_{cy} = 0,78 T_{к} \quad (2)$$

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

Для всех опытов с жидкими металлами нашли по справочным данным температуру их кристаллизации $T_{л}$ и температуру кипения $T_{к}$. По формуле (2) вычислили значение температуры T_{cy} . Точки $T_{л}$ и T_{cy} соединили прямой линией. Предполагали, что эта линия является идеальной теоретической линией распада кластеров металла. Затем сравнили для каждого измерения всех металлов величины I_i/I_0 , то есть процент распада кластеров и теоретическое значение той же величины по прямой линии между $T_{л}$ и T_{cy} . Вычислили I_i/I_0 опытное и I_i/I_0 теоретическое. На рис. 2 представлено это отношение в зависимости от атомного радиуса изучавшегося металла и типа его кристаллической решетки.

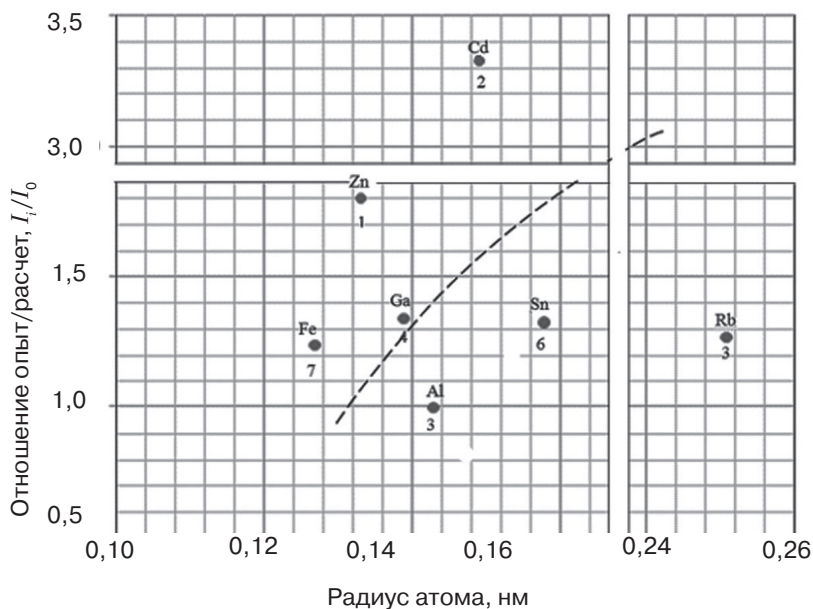


Рис. 2. Отношение величин I_i/I_0 средней доли распавшихся кластеров металла, полученных опытным путем, к аналогичной расчетной величине при разных классах симметрии исходных твердых металлов в зависимости от радиуса атома твердого металла. Значки на рисунке – символы химических элементов. У значков приведено общее количество проведенных измерений с жидким металлом

Для справки: железо и алюминий имеют тип кристаллической решетки К12, высший класс симметрии твердых кристаллов; у олова и галлия – тетрагональная решетка, низший класс симметрии, остальные элементы относятся к среднему классу

симметрии. Как известно, жидкое состояние металлов наследует черты твердого. Из рис. 2 видно, что при переходе от высшего класса симметрии к низшему наблюдается тенденция увеличения отношения опытного и расчетного значения величины I_i/I_0 . Это означает, что для высшего класса симметрии (железо и алюминий) наблюдается почти идеальная зависимость между количеством распавшихся кластеров I_i/I_0 и температурой $T_i/T_{л}$ в интервале значений температур $T_{л}-T_{сy}$. Для металлов с низшим классом симметрии в твердом состоянии и для их жидкого состояния такая зависимость практически отсутствует.

О геометрической форме кластеров жидкого металлического расплава – шар или выпуклый многогранник

В литературе известны различные способы вычисления количества атомов в кластере металлического расплава [17-20]. Все авторы считают, что кластер имеет шаровидную форму. Кроме этого, утверждается, что атомы кластера и разупорядоченной зоны постоянно обмениваются местами между собой. В расчетах размера кластеров [17-20] авторы учитывают взаимодействие атомов друг с другом в шаровидной форме кластера.

По-видимому, кластер и разупорядоченная зона расплава в представлениях авторов [17-20] являются удобной расчетной схемой. При этом надо заметить, что не опубликовано ни одной работы, в которой бы размер кластера металла сочетался бы с какими-либо физическими или химическими свойствами металлических расплавов.

Как видно из результатов работы [16] и настоящего исследования (см. таблицу) размеры кластеров уменьшаются практически линейно с повышением температуры нагрева расплава. Если бы кластеры имели форму шара, то их размер уменьшался бы пропорционально квадрату его радиуса. Практика опровергает это предположение, то есть размер кластера уменьшается значительно быстрее, чем обусловлено его геометрической формой.

Объясняется увеличение поверхности распада кластеров двумя известными фактами:

– В. И. Данилов отмечает, что жидкие металлы являются «коллоидной, дисперсной, с огромными внутренними поверхностями раздела микронеоднородной и термически неустойчивой системой» [1];

– в практике рентгеноструктурного анализа жидкого металла [4-6 и др.] отмечается, что интерференционный эффект от жидкого металлического расплава возникает при наличии двух или более параллельных плоскостей колеблющихся атомов (квазикристаллическая структура в жидкости – см. выше).

Однако, шаровидная форма кластера не может создать интерференцию рентгеновских лучей. Такое явление может произойти только от параллелепипеда в форме выпуклого многогранника. Результаты нашего исследования показывают, что форма кластера не шар, а выпуклый многогранник с плоскостями рядов атомов, параллельными друг другу.

Об отсутствии шаровидной формы кластера могут свидетельствовать результаты исследования известного ученого-литейщика П. П. Берга. Он изучал варианты укладки шаров:

– по углам куба, координационное число системы равно 6, пористость системы 47 %;

– по углам призмы, соответствующие величины для этого случая равны 8 и 39,5 %;

– по углам пирамиды, то есть правильного тетраэдра или правильного октаэдра, соответствующие величины равны 12 и 25,5 %.

Если бы твердый металл после расплавления образовал жидкость с шаровид-

ными кластерами, то объем ее увеличился бы по сравнению с первоначальным на десятки процентов. Опыт показывает, что увеличение объема жидкости составляет всего 3-5 % от объема твердого металла.

Изучение свойств металла в зависимости от температуры. Оптимальная температура выпуска стали из печи

На рубеже XX-XXI в. в металлургии появился новый процесс – термовременная обработка (ТВО) жидких металлов в процессе их выплавки и заливки в литейные формы. Суть его раскрыта в работах профессора Б. А. Баума с соавторами [21]. ТВО основана на первоначальном изучении свойств жидких металлов (плотность, вязкость, электропроводность и др.) в зависимости от температуры и времени выдержки при ней. При изучении этих свойств при определенных температурах проявляются их аномалии (разрывы, перегибы, возникновение гистерезиса свойств и т. д.). Разные авторы характеризуют эти аномалии не одинаково. В. И. Архаров считает, что аномалии связаны с полным распадом кластеров металла; Б. А. Баум полагает, что при температуре аномалий сильно ослабляются связи между атомами расплава; А. М. Скребцов [16] считает, что появление аномалии свойств расплава свидетельствует о достижении им равновесной микрооднородности, при этом состоянии расплав перестает зависеть от его предистории (условий плавки, типа шихты и т. п.).

При ТВО производственных сталей имеют в виду температуры их аномалий. При всех технологических операциях учитывают тепловые эффекты процессов и температуру аномалии расплава таким образом, чтобы перед выпуском металла из плавильного агрегата расплав достигал бы температуры равновесной микрооднородности T_{pm} . Затвердевание такого расплава в литейных формах приводит к улучшению качества металлопродукции по сравнению с обычными плавками.

В работе [16] построена кривая T_{pm}/T_l в зависимости от T_l . В ней впервые обнаружили, что при изменении T_l от 300 до 1900 К величина T_{pm}/T_l для разных металлов монотонно уменьшается от 1,90 до 1,04.

В данной работе обобщили литературные, производственные и собственные исследования аналогичной зависимости работы [16] для более узкого интервала температур 1500-1900 К (стали, чугуны, сплавы металлов).

В лабораторных исследованиях в широком интервале температур, от плавления до кипения расплава, использовали метод сплюсненной капли [14] или измерения плотности чугуна методом проникающего γ -излучения радиоактивного $Co-60$ [22].

В производственных исследованиях [23-25] для разных марок стали и в этом исследовании стали марки 20ГФЛ (133 плавки) оценивали зависимость качества металла от температуры его разливки T_i .

Для разных марок стали [23-25] вычислили значения температур ликвидуса по приближенным формулам из работ [26, 27].

Результаты различных экспериментов, также как и в работе [16], выразили в координатах T_{pm}/T_l в зависимости от T_l . На рис. 3 для всех экспериментов, лабораторных и производственных исследований, представлены величины T_{pm}/T_l в зависимости от T_l . Из рисунка видно, что по всем опытам точки группируются у убывающей прямой линии. Значки в кружках соответствуют относительным температурам T_{min}/T_l с минимумом брака металла в слитках (трещины и рванины). На рис. 3 опытные значения величины T_{min}/T_l хорошо согласуются с лабораторными исследованиями величины T_{pm}/T_l .

Таким образом, в работах Б. А. Баума с соавторами [21, 25] разработаны способы применения ТВО к легированным тугоплавким сталям. Авторы статьи [28] обращают внимание «к сожалению, нужно отметить, что в настоящее время определить параметры ТВО для стали конкретной марки, исходя из сведений о ее химическом составе, не представляется возможным».

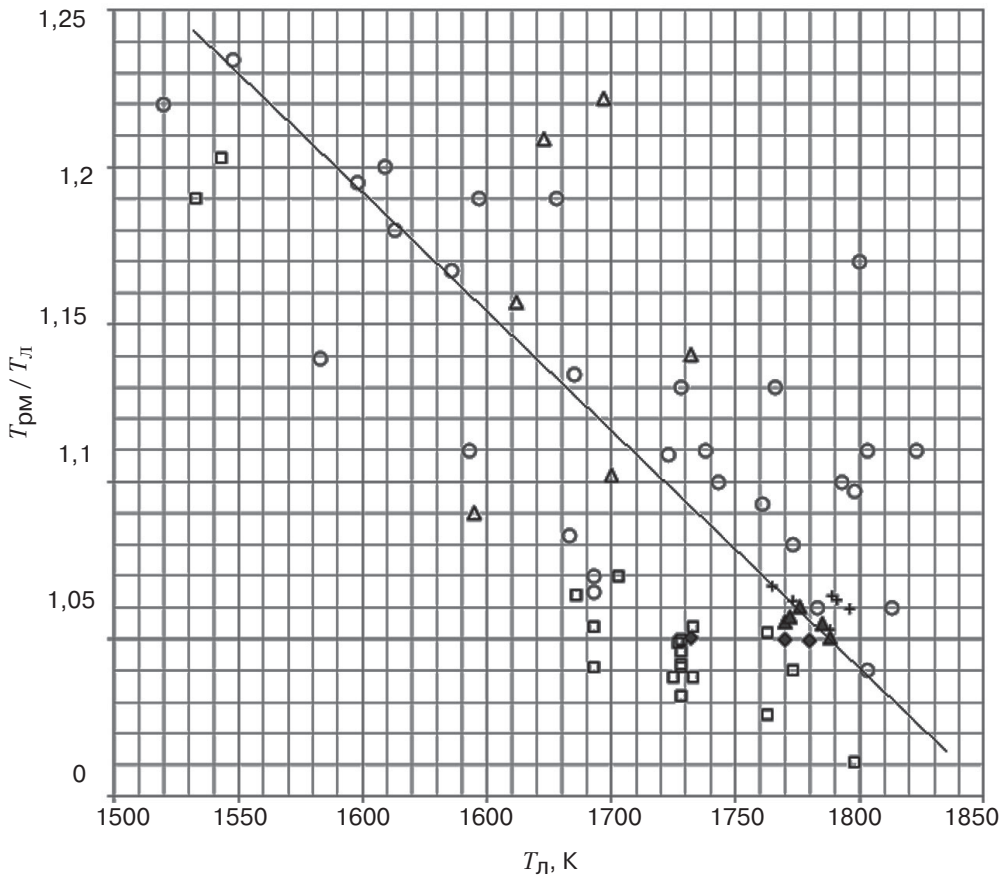


Рис. 3. Величины $T_{рм}/T_{л}$ для металлических расплавов в зависимости от температуры ликвидус металла $T_{л}$ в интервале 1500-1900 К для лабораторных, производственных литературных и собственных исследований. В кружках отмечены точки с минимумом брака металла. Лабораторные исследования авторов [14] – о; [21] – Δ ; [22] – \square ; производственные исследования авторов [23] – +; [24, 25] – Δ ; собственные исследования – \blacklozenge

Для сталей широкого сортамента предложено использовать существующие в литературе приближения формулы [26, 27] для вычисления температур ликвидус и разработать для них режимы ТВО, то есть расширить номенклатуру сталей для этого процесса.

Выводы

- В соответствии с представлениями академика В. И. Данилова и выполненного анализа рентгеноструктурных исследований металлических расплавов рекомендуется считать жидкое состояние размытым твердым, одна из структур которого (короткоживущая квазикристаллическая) отражает рентгеновские лучи. Кластер имеет форму многогранника с выпуклыми гранями, а не шаровидную. Взаимодействие атомов в жидкости постепенно ослабевает, начиная от температуры его плавления, вплоть до температур близким к кипению.

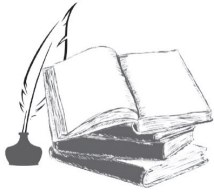
- Впервые показано, что регулирование нагрева любых жидких сталей при выпуске расплава из печи до уровня температуры равновесной микронеоднородности расплава $T_{рм}$ приводит к снижению брака металла. Для высоколегированных сталей для гомогенизации расплава необходим перегрев их над $T_{рм}$ на 50-70 °С.



Список литературы

1. *Вертман А. А.* Свойства расплавов железа / А.А. Вертман, А.М. Самарин. – М.: Наука, 1969. – 280 с.
2. *Вертман А. А.* К проблеме металлических расплавов // *Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов.* – М.: Академкнига, 2002. – С. 207-214.
3. *Белашенко Д. К.* Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. – М.: Атомиздат, 1970. – 398 с.
4. *Уманский Я. С.* Рентгенография. – М.: Metallurgy, 1967. – 236 с.
5. *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.
6. *Бродский А. И.* Физическая химия. – Т. 1. – М.: ГХ.И, 1948. – 488 с.
7. *Stewart G. X.* X-ray diffusion in water: the nature of molecular association / G. X. Stewart // *Phys. Rev.* – 1931. – V. 37. – №1. – pp. 9-16.
8. *Данилов А. И.* О характере упорядоченности атомной структуры жидких металлов / А. И. Данилов, В. И. Данилов, Е. З. Спектор. // *Проблемы металловедения и физики металлов.* 3-ий сб. тр. Института металловедения и физики металлов ЦНИИЧМ. – М: Metallurgizdat, 1952. – С. 336-354.
9. *Арсентьев П. П.* Металлические расплавы и их свойства / П. П. Арсентьев, Л. А. Коледов. – М: Metallurgy, 1976. – 376 с.
10. *Клименков Е. В.* О структуре ближнего порядка в жидком железе, кобальте и никеле / Е. В. Клименков, П. В. Гельд, Б. А. Баум, Ю. А. Базин // *Докл. АН СССР.* – 1975. – Т. 222. – № 1. – С. 71-73.
11. *Слуховский О. И.* Структурные изменения жидкого железа / О. И. Слуховский, А. С. Ляшко, А. В. Романова // *Украинский физический журнл.* – 1975. – Т. 20. – № 12. – С. 1961-1965.
12. *Ватолин И. А.* Влияние температуры на структуру жидкого алюминия / И. А. Ватолин, Э. А. Пастухов, В. Н. Сермягин // *Докл. АН СССР.* – 1975. – Т. 222. – № 3. – С. 641-642.
13. *Вагнер К.Н.* Температурная зависимость интерференционной функции (структурного фактора) жидких металлов // *Жидкие металлы. Материалы третьей международной конференции по жидким металлам.* Пер. с англ. – М.: Metallurgy, 1980. – С. 92-98.
14. *Филлипов Е. С.* Строение, физика и химия металлических расплавов. – М: Metallurgy, 1995. – 304 с.
15. *Новохатский И. А.* О термоскоростной обработке металлических расплавов / И. А. Новохатский, В. И. Архаров, В. И. Ладьянов, В. З. Кисунько // *ДАН СССР.* – 1978. – Т. 243. – № 4. – С. 100-103.
16. *Скребцов А. М.* Особенности структурных превращений металлических расплавов в интервале температур ликвидус кипение // *Сталь.* – 2010 – №10. – С. 14-19
17. *Дутчак Я. И.* Рентгенография жидких металлов. – Львов: Вища школа, 1977. – 163 с.
18. *Ладьянов В.И.* Оценка времени жизни кластеров в жидких металлов / В. И. Ладьянов, И. А. Новохатский, С. В. Логунов // *Изв АН СССР. Металлы.* – 1995. – № 2. – С. 13-22.
19. *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.
20. Патент №23458А Україна, МПК⁸GO1 №9/24 (2006.01), GO1 №33/20 (2006.01). Спосіб визначення кількості атомів в кластер металевого розплаву (спосіб О. М. Скребцова) / О. М. Скребцов.
21. *Жидкая сталь* / Б. А. Баум, Г. А. Хасин, Г. В. Тягунов и др. – М.: Metallurgy, 1984. – 208 с.
22. *Хосен Ри.* Об упорядочении структуры ближнего порядка жидких чугунов при охлаждении / Ри Хосен, В. А. Тейх. – Изв. вузов. Черная Metallurgy. – 1980. – № 11. – С. 123-127.
23. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. – М.: Metallurgy, 1976. – 552 с.
24. *Еланский Г. Н.* Строение и свойства жидкого металла / Г. Н. Еланский, В. А. Кудрин. // *Качество стали.* – М.: Metallurgy, 1984. – 239 с.
25. *Кочо В. С.* Непрерывный контроль температуры жидкой стали / В. С. Кочо, Г. В. Самсонов, А. Г. Стрельченко, П. С. Кислый. – К.: Техника, 1965. – 227 с.

26. Макуров С. Л. Экспериментальное и расчетное определение температуры ликвидус сложнелегированных сталей // Вестн. Приазов. держ. техн. ун-ту. – 2003. – Вып. 13. – С. 46-49.
27. Смирнов А. Н. Расчет температуры ликвидус стали / А. Н. Смирнов, П. Неделькович, М. Дтурдтевич и др. // Сталь. 1996. – №3. – С. 15-19.
28. Баум Б. А. Термовременная обработка жидких сплавов и стали / Б. А. Баум, Г. В. Тягунов, Е. Е. Барышев, В. С. Цепелев // Сталь. – № 6 – 1996. – С. 16-20.



References

1. Vertman A. A. (1969) Svoystva rasplavov zheleza [*The properties of iron melts*]. Moscow: Nauka, 280 p. [in Russian].
2. Vertman A. A. (2002) K probleme metallicheskih rasplavov [*On the problem of metal melts*]. Fundamentalnye issledovaniya fizikokhimii metallicheskih rasplavov. Moscow: Akademkniga, pp. 207-214. [in Russian].
3. Belashchenko D. K. (1970) Yavleniya perenosa v zhidkikh metallakh i poluprovodnikakh [*Transport phenomena in liquid metals and semiconductors*]. Moscow: Atomizdat, 398 p. [in Russian].
4. Umanskiy Ya. S. (1967) Rentgenografiya [*Radiography*]. Moscow: Metallurgiya, 236 p. [in Russian].
5. Bataev V. A. (2007) Metody strukturnogo analiza materialov i kontrolya kachestva detaley [*The methods of structural analysis materials and quality control of parts*]. Moscow: Flinta; Nauka, 224 p. [in Russian].
6. Brodskiy A. I. (1948) Fizicheskaya khimiya [*Physical chemistry*]. T.1, Moscow: G. H. I., 488 p. [in Russian].
7. Stewart G. X. (1931) X-ray diffusion in water: the nature of molecular association. Phis. Rev., vol. 37, no. 1, pp. 9-16. [in English].
8. Danilov A. I. (1952) O kharaktere uporyadochennosti atomnoy struktury zhidkikh metallov [*The nature of the orderliness of the atomic structure of liquid metals*] Problemy metallovedeniya i fiziki metallov. 3-iy sb. tr. Instituta metallovedeniya i fiziki metallov TsNIIChM. Moscow: Metallurgizdat, pp. 336 – 354. [in Russian].
9. Arsentev P. P. (1976) Metallicheskie rasplavy i ikh svoystva [*The metal melts and their properties*]. Moscow: Metallurgiya, 376 p. [in Russian].
10. Klimenkov Ye. V., Geld P. V., Baum B. A., Bazin Yu. A. (1975) O strukture blizhnego poryadka v zhidkom zheleze, kobalte i nikle [*About the structure of short-range order in the liquid iron, cobalt and nickel*]. Dokl. AN SSSR, T. 222, no. 1, pp. 71-73. [in Russian].
11. Slukhovskiy O. I. (1975) Strukturnye izmeneniya zhidkogo zheleza [*Structural changes of liquid iron*]. Ukrainskiy fizicheskii zhurnal, T. 20, no. 12, pp. 1961-1965. [in Russian].
12. Vatolin I. A. (1975) Vliyanie temperatury na strukturu zhidkogo alyuminiya [*Temperature effect on the structure of liquid aluminum*]. Dokl. AN SSSR, T. 222, no. 3, pp. 641-642. [in Russian].
13. Vagner K. N. (1980) Temperaturnaya zavisimost interentsionnoy funktsii (strukturnogo faktora) zhidkikh metallov [*Temperature dependence of interference function (structural factor) of liquid metals*]. Zhidkie metally. Materialy tretey mezhdunarodnoy konferentsii po zhidkim metallam. Per. s ang. Moscow: Metallurgiya, pp. 92-98. [in Russian].
14. Fillipov Ye. S. (1995) Stroenie, fizika i khimiya metallicheskih rasplavov [*The structure, physics and chemistry of metal melts*]. Moscow: Metallurgiya, 304 p. [in Russian].
15. Novokhatskiy I. A. (1978) O termoskorostnoy obrabotke metallicheskih rasplavov [*About thermal processing speed metal melts*]. DAN SSSR, T. 243, no. 4, pp.100-103. [in Russian].
16. Skrebtsov A. M. (2010) Osobennosti strukturnykh prevrashcheniy metallicheskih rasplavov v intervale temperatur likvidus kipenie [*Features of structural transformations of metal melts at a temperature range liquidus boiling*]. Stal, no. 10, pp. 14-19. [in Russian].
17. Dutchak Ya. I. (1977) Rentgenografiya zhidkikh metallov [*Radiography of liquid metals*]. Lvov: Vyshcha shkola, 163 p. [in Russian].
18. Ladyanov V. I. (1995) Otsenka vremeni zhizni klasterov zhidkikh metallov [*Evaluation of the lifetime of liquid metal clusters*]. Izv. AN SSSR. Metally, no. 2, pp.13-22. [in Russian].
19. Ryzhikov A. A. (1969) Nekotorye osobennosti protsessov plavleniya i struktury zhidkikh metallov [*Some features of the melting process and the structure of liquid metals*]. Progresivnaya

- tehnologiya litynogo proizvodstva. Gorkiy: Volgo-Vyatskoe knizhnoe izdatelstvo, pp. 3-10. [in Russian].
20. Pat. № 23458A Ukraina, МПК5G01 №9/24 (2006.01), G01 №33/20 (2006.01). Sposib vyznachennia kilkosti atomiv v klasteri metalevoho rozplavu (sposib O.M. Skrebtsova) [*The method of determining the number of atoms in the cluster metal melt (method Skrebtsova O. M.)*] / Skrebtsov O. M. [in Ukrainian].
 21. Baum B. A., Khasin G. A., Tyagunov G. V. et al. (1984) Zhidkaya stal [*Liquid steel*]. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].
 22. Khosen Ri. (1980) Ob uporyadochenii struktury blizhnego poryadka zhidkikh chugunov pri okhlazhdenii [*About regulation of structure of short-range order of liquid cast iron during cooling*]. Izv. Vuzov. Chernaya Metallurgiya, no. 11, pp. 123-127. [in Russian].
 23. Yefimov V. A. (1976) Razlivka i kristallizatsiya stali [*Casting of steel and crystallization*]. Moscow: Metallurgiya, 552 p. [in Russian].
 24. Yelanskiy G. N. (1984) Stroenie i svoystva zhidkogo metalla [*The structure and properties of the liquid metal*]. Kachestvo stali, Moscow: Metallurgiya, 239 p. [in Russian].
 25. Kocho V. S. (1965) Nепreryvnyy kontrol temperatury zhidkoy stali [*Continuous monitoring of the temperature of liquid steel*]. Kiev: Tekhnika, 227 p. [in Russian].
 26. Makurov S. L. (2003) Eksperimentalnoe i raschetnoe opredelenie temperatury likvidus slozhnolegirovannykh staley [*Experimental and numerical determination of the liquidus temperature of complex alloyed steels*]. Visn. Priazov. derzh. tekhn. un-tu, vol. 13, pp. 46-49. [in Russian].
 27. Smirnov A. N. (1996) Raschet temperatury likvidus stali [*The calculation of the liquidus temperature of steel*]. Stal, no. 3, pp. 15-19. [in Russian].
 28. Baum B. A. (1996) Termovremennaya obrabotka zhidkikh splavov i stali [*Thermal timing processing liquid alloys and steel*]. Stal, no. 6, pp. 16-20. [in Russian].

Поступила 16.01.2017

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, ФИО авторов, аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.