

УДК 669.046:621.746.62

DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-65-72

Некомпенсированное преобразование вещества из жидкой фазы в твердую при затвердевании металлов и сплавов

В.И. Семенов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Uncompensated Transformation of Matter from Liquid to Solid State During Solidification of Metals and Alloys

V.I. SemenovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: Monakhov.I.Nikita@gmail.com

i Начальное абстрагирование от конкретной физико-химической обстановки, соответствующей затвердеванию металлов и сплавов, позволило предложить общий термодинамический принцип учета изменения величин, определяющих энергетическое наполнение и имеющих основополагающее значение для любой энергосберегающей системы в случайной изменчивой неравновесной ситуации. С этой точки зрения процесс затвердевания — фазовый переход первого рода — можно рассматривать как необратимый, который, эволюционируя в неравновесной обстановке, вынужден эффективно использовать доступную скрытую энергию и выстраивать свое поведение так, чтобы быть максимально эффективным при некомпенсированном преобразовании жидкой фазы в твердую. Следовательно, в самом веществе заложена стратегия эволюционирования, и ее можно контролировать, воздействуя на поле свободной энергии.

Ключевые слова: металл, фаза, превращение, структура, свободная энергия

i The initial abstraction from specific physical and chemical conditions corresponding to solidification of metals and alloys allowed the authors to propose a general thermodynamic principle of accounting for changes in the values that define the energy content and are fundamental to any energy-saving system in a random variable non-equilibrium situation. From this perspective, it became possible to regard the solidification process — a phase transition of the first kind — as irreversible. While evolving in non-equilibrium conditions, the process is forced to efficiently utilize the available stored energy and build its behavior in such a way as to be maximally effective during uncompensated transformation of the matter from liquid to solid phase. This view of the complex and variable structure of the metastable melt allows the author to draw a conclusion that it is possible to control the process of obtaining materials that are in highly non-equilibrium conditions.

Keywords: solidification metal and alloy, equilibrium co-existence of phases, transformation order, metastable melt structure, irreversible process, chemical potential

Затвердевание металлов и сплавов служит примером изменения термодинамического состояния и некомпенсированного преобразования, обусловленного необратимым процессом внут-

ри системы, определяющим переход вещества из жидкой фазы в твердую. При заданном давлении каждому веществу присущи конкретные температуры плавления T_L и затвердевания T_S .

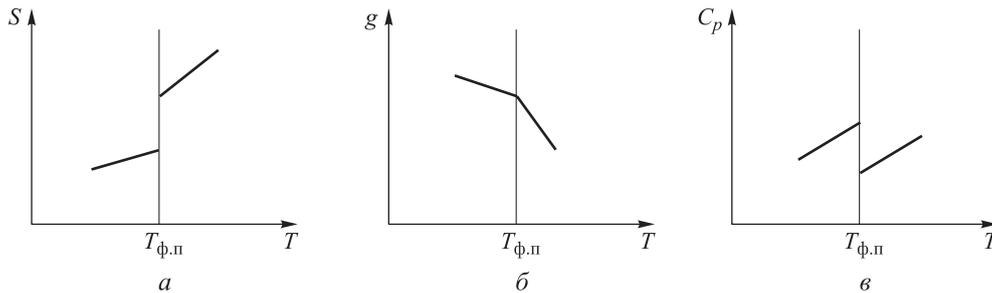


Рис. 1. Изменение энтропии S (а), химического потенциала g (б) и удельной теплоемкости C_p (в) при температуре фазового перехода $T_{ф.п}$ [1]

(Индексы «L» и «S» относятся к жидкой и твердой фазам). В точке фазового перехода при температуре $T_{ф.п}$ происходит обмен веществом между фазами, называемый фазовой реакцией, которая вызвана поглощением или выделением теплоты. Теплоту фазовой реакции называют скрытой, так как она не изменяет температуру $T_{ф.п}$. При этом жидкая и твердая фазы сплава могут параллельно существовать в состоянии теплового равновесия.

Термодинамические исследования состояния промышленных сплавов позволили установить, что при фазовом переходе термодинамические, физические и теплофизические величины (энтропия, объем, плотность, теплопроводность и др.) изменяются скачком, а химический потенциал g — непрерывно, но так, что при температуре $T_{ф.п}$ химические потенциалы g_L и g_S равны, а их производная имеет разрыв. Поскольку фазовая реакция не изменяет температуру $T_{ф.п}$ ($T_L = T_S$), в счет произведенной теплоты Q ($Q \neq 0$) удельная теплоемкость C_p обращается в бесконечность (рис. 1).

При объяснении равновесного сосуществования фаз не все авторы книг, посвященных теории фазовых переходов, согласны с тем, что при температуре перехода вещества из жидкого состояния в твердое имеет место равенство химических потенциалов жидкой и твердой фаз сплава, т. е. $g_L = g_S$ [2, 3]. Анализ разных работ показывает, что из указанного несоответствия должен быть какой-либо выход. Видимо, фазовый переход жидкость–твердое тело происходит в неравновесных условиях.

На рис. 2 показана еще одна характерная черта затвердевания промышленных сплавов, где T — температура; τ — время. Отвод произведенной теплоты Q взаимосвязан с переохлаждением $\Delta T = T_M - T$ относительно равновесной температуры T_M фазового перехода. В окрестности температур $T < T_M$ состояние

жидкой фазы идентифицируется как метастабильное.

В целях объяснения взаимного сосуществования метастабильной жидкой и стабильной твердой фаз, приближения к критическому состоянию и поведению вещества в критической точке используют структурный подход [4–7]. Для учета изменений термодинамических переменных в гетерогенных системах вводят полную инвариантность F — величину, не зависящую от числа фаз. В закрытой системе отсутствует обмен веществом с окружающей средой, поэтому $F = 2$ [1]. Поскольку температура, давление и составы фаз остаются постоянными, фазовые реакции описывают как перераспределение массы фаз при сохранении общей массы каждого компонента.

Согласно предсказаниям теории, при фазовом переходе происходит изменение симметрии системы, которая характеризуется так называемым параметром порядка. Его выбирают так, чтобы он был равен нулю по одну сторону фазовой границы. В жидкой системе порядок если и существует, то весьма кратковременно, так как он разрушается под влиянием тепловых атомарных флуктуаций. Для промышленных сплавов в качестве параметра порядка фазового перехода используют долю упо-

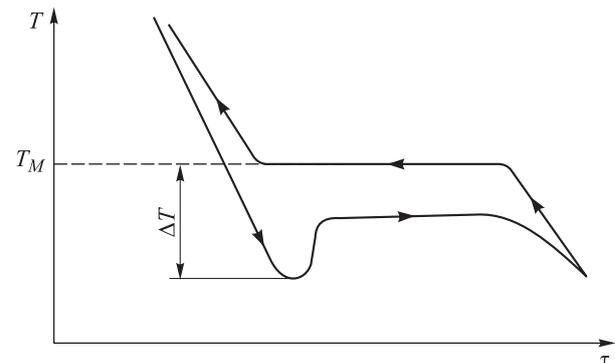


Рис. 2. Переохлаждение расплава при затвердевании

рядочившихся атомов. Теория допускает, что за параметр порядка можно условно принять разность плотностей сосуществующих фаз.

Более общим по отношению к структурному является системный подход, одним из основоположников которого стал биолог-теоретик Л. Бергаланфи. Решение поставленной проблемы предлагается искать, максимально абстрагируясь от конкретной физической природы исследуемого явления. Основным принципом изучения считается изоморфизм (аналогичность) явлений различного рода: технических, биологических и др. На пути от конкретной проблемы к изучению явления требуется рассмотреть его свойства, используя идею декомпозиции и соответствующие структуры, их элементы, связи и методы описания.

Цель работы — уточнение концепции самоорганизации затвердевания металлов и сплавов.

Выберем предельно простую двухкомпонентную металлическую систему, где оба вещества A и B находятся в состоянии α -фазы. Предположим, что при химическом взаимодействии они образуют однородные как жидкий, так и твердый идеальные растворы. Примем также, что изменение внутренней энергии такой системы можно выразить через химические потенциалы и молярные величины веществ A и B .

Без учета химического взаимодействия химический потенциал смеси веществ A и B g^α связан с их химическими потенциалами g_A^α и g_B^α при молярных долях $(1-x)$ и x соотношением

$$g^\alpha = (1-x)g_A^\alpha + xg_B^\alpha.$$

При наличии силы, вызывающей химическое взаимодействие веществ A и B , химический потенциал однородного идеального раствора примет вид

$$f^\alpha = g^\alpha - \Delta_M f^\alpha,$$

где $\Delta_M f^\alpha$ — энергия смешения, хранящаяся в системе в скрытой (латентной) форме. Энергия смешения приводит изолированный идеальный раствор в состояние равновесия. Раствор может быть как жидким, так и твердым.

Для гетерогенной системы, в которой λ и $(1-\lambda)$ — доли жидкого и твердого растворов, получим:

• химический потенциал условной смеси чистых веществ

$$g = (1-\lambda)g^S + \lambda g^L;$$

• химический потенциал смеси идеальных растворов

$$f = (1-\lambda)f^S + \lambda f^L;$$

• изменение энтальпии системы при смене фазового состояния

$$\Delta h^{SL} = g^L - g^S.$$

В графической форме зависимость свободной энергии от долей жидкого и твердого растворов этой двухкомпонентной гетерогенной системы изображена на рис. 3. Левая сторона диаграммы ($\lambda = 1$) соответствует жидкой фазе, а правая сторона ($\lambda = 0$) — твердой. Между ними находятся структурные единицы (объекты), представленные смесью соответствующих объектов жидкой и твердой фаз. Свободная энергия, имеющаяся у единиц структуры для совершения работы в необратимом процессе, определяет их энергетическое состояние и является функцией состояния данных объектов. Поскольку физическое состояние и функция состояния объектов (атомов) веществ A и B изменяются одновременно, рассматриваемые атомы гетерогенной структуры отнесены к базисным.

Каждая из фаз системы представлена двумя структурными объектами: жидкая — смесью жидких веществ A и B с химическим потенциалом g^L и идеальным жидким раствором с химическим потенциалом f^L , а твердая — смесью твердых веществ A и B с химическим потенциалом g^S и идеальным твердым раствором с химическим потенциалом f^S .

Будучи в состоянии смеси, чистые вещества A и B могут вступить в химическое взаимодействие друг с другом. Такая система не может находиться в состоянии равновесия и переходит в состояние идеального раствора (жидкого или твердого), где остается устойчивой при любых флуктуациях. Устойчивость равновесных состояний жидкого и твердого растворов обеспечивает латентная энергия смешения ($\Delta_M f^L$ и $\Delta_M f^S$). При взаимных переходах в состояние равновесия свободная энергия базисных объектов системы изменяется одновременно скачком.

Изложенное позволяет заключить, что равновесная система в виде идеального раствора может вернуться в состояние смеси чистых компонентов. Законы физики позволяют представить, что такая возможность для идеального жидкого раствора появляется при переохлаждении, а для идеального твердого — при под-

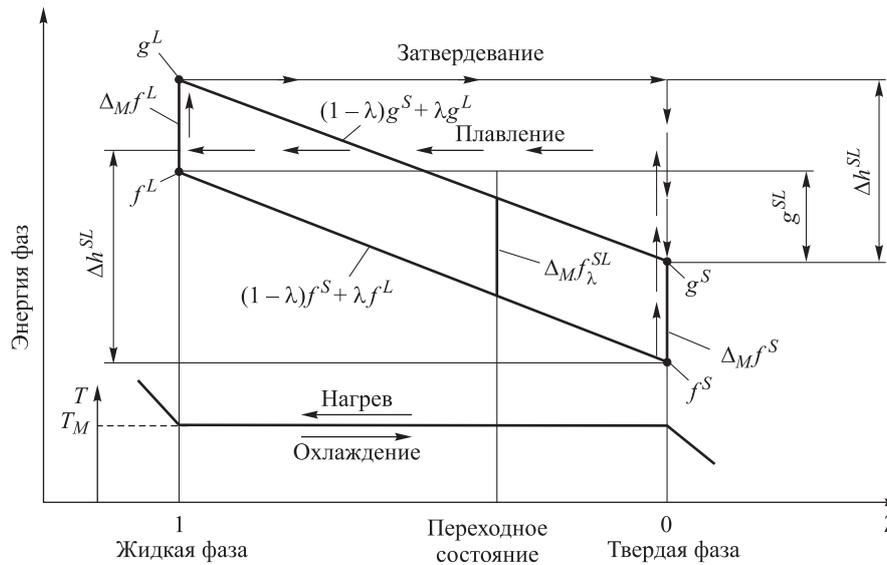


Рис. 3. Диаграмма состояний базисных структурных объектов идеализированной двухкомпонентной металлической системы

воде теплоты. Целенаправленный характер внешнего воздействия способен изменять внутреннюю энергию веществ гетерогенной системы так, что у ее части теряется равновесие. Следовательно, можно предсказывать условие перехода из одного агрегатного состояния в другое. Разумеется, при плавлении и затвердевании базисные атомы исходных компонентов системы дополнительно должны переходить в состояние чистого вещества.

Диаграмма состояний позволяет рассмотреть критическое поведение чистого вещества. Согласно теории переходного состояния [1], развитой на основе принципов статистической механики, реагенты A и B должны образовать переходное состояние $(AB)^\ddagger$. После этого переходное состояние реагентов необратимо превращается в продукты с изменившимся внутренним состоянием или в продукты их химического взаимодействия.

На диаграмме (см. рис. 3) нетрудно заметить наличие аналогий между идеальными жидким и твердым растворами: их реагенты, переходя в состояние чистого вещества, имеют одинаковый уровень внутренней энергии. Значение внутренней энергии базисного объекта «переходное состояние» устанавливает равенство

$$f^L + \Delta_M f^L = f^S + \Delta_M f^S + \Delta h^{SL}. \quad (1)$$

Термодинамическое равенство (1), диктующее ход эволюции состояния вещества одного и того же состава, приводит к важному следствию: эволюция начинается с того, что чистое

вещество подвергается одномоментному внутреннему изменению, вызванному необходимостью в ходе необратимого преобразования обмениваться определенным количеством свободной энергии (теплоты), эквивалентом которой является энтальпия Δh^{SL} . Понятие одномоментного обмена определенным количеством энергии применимо и к латентной энергии $\Delta_M f^L$ и $\Delta_M f^S$.

Исходя из особенностей термодинамического состояния, равенство (1) характеризует физический смысл существования обратимости в природе и указывает на ее универсальность: априори очевидно, что обратимый процесс эволюционирует в изолированной системе без изменения энтропии. Поэтому фазовый переход — это не просто превращение одной формы распределения вещества в пространстве в другую, а форма распределения с одномоментным скачкообразным обратимым универсальным изменением внутренней энергии и строения базисных структур природного вещества.

Учитывая изложенную специфику поведения вещества в ходе некомпенсированного преобразования, рассмотрим условия, показывающие, что смена агрегатного состояния промышленных сплавов является не случайным, а закономерным процессом, в частности, для затвердения.

Первым таким условием из опыта металлургии является переохлаждение расплава ниже точки равновесной температуры плавления T_M

(см. рис. 2). В переохлажденном состоянии (ниже температуры T_M) возможно устойчивое существование жидкого металла. Это есть так называемое метастабильное состояние, иллюстрирующее необходимость целенаправленно преодолевать барьер устойчивости равновесной системы. Поскольку полная энергия метастабильной системы монотонно уменьшается, возникает вопрос об ее устойчивости к переохлаждению ΔT относительно равновесной температуры плавления T_M . И наконец, чем больше скорость охлаждения, тем значительнее переохлаждение ΔT .

Небезынтересно отметить, что основная отличительная особенность всех таких метастабильных систем заключается в том, что неравновесными становятся не все, а лишь локальные кластеры (центральные атомы со своим ближним окружением). Таким образом, здесь выполняется парадигма «порядок превращения через неравновесность». Это особое явление предложено рассматривать случайным локальным «дефектом равновесности». Энергия $\Delta_M f^L$, скрытая в кластерах, становится свободной одновременно.

Следующий этап развития может быть отмечен появлением градиента плотности свободной энергии. Некомпенсированные термодинамические силы, действующие на основе принципа аддитивности, одновременно создают в метастабильном расплаве новую пространственную структуру (рис. 4, а) в виде совокупности локальных объемов с общей зоной сегрегации. Вещество, которое становится неравновесным, получает возможность перестраиваться предсказуемо на принципе локального равновесия методом восходящей диффузии.

Термодинамические силы, имеющие целенаправленный характер и действующие согласованно и однородно, «переносят» атомы распадающихся кластеров кратчайшим путем в зону сегрегации. Необратимая перестройка, происходящая при постоянных температуре и давлении, параллельно сопровождается тем, что работа термодинамических сил свободной энергии сохраняется при атомах как энергия «активации диффузии». Благодаря целенаправленному поведению, базисные атомы обмена, совершив перемещение, возвращаются в свободное состояние.

Откликом на агрегацию чистого вещества в зоне сегрегации становится возможность увеличения химической активности. Рост концентрации вещества до уровня критического предсказуемо приводит к наступлению переходного состояния (рис. 4, б). Поэтому приходится отказаться от представления зарождения и роста новой фазы как бездиффузионного или сдвигового перехода отдельных атомов из одной фазы в другую через межфазную границу.

Уникальность превращения вытекает из преодоления энергетического барьера переходного состояния, перехода вещества в состояние реагента и его участия в фазовой реакции, продуктом которой является твердая фаза. Ясно, что ход затвердевания металлов и сплавов продиктован физическими законами. Следование физическим законам порождает новый уровень структурной организации.

Способность управлять затвердеванием напрямую зависит от времени установления стационарного состояния потока вещества, идущего на образование желаемых структур.

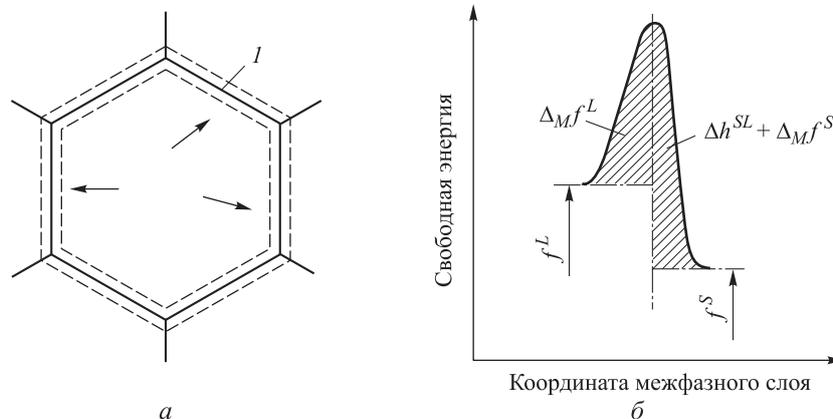


Рис. 4. Схемы к механизму фазового перехода:

а — фазовый m -элемент (I — зона сегрегации); б — барьер свободной энергии зоны сегрегации (межфазного слоя)

Это делает необходимым исследование эффекта нестационарности.

Причиной, по которой при фазовом переходе создается поток вещества, является потенциал свободной энергии:

$$\Delta G_{\max}^{SL} = \Delta_M f^L, \quad (2)$$

где ΔG_{\max}^{SL} — изменение плотности свободной энергии на атом силового поля реакции, в ходе которой SL -частицы получают скорость переноса v_{SL} .

Его градиент создает систему некомпенсированных термодинамических сил

$$\Phi_{SL} = \text{grad } \Delta G_{\max}^{SL}, \quad (3)$$

Начальная гомогенность метастабильного расплава нарушается, а его пространство структурируется.

Рассматривая общий случай, будем использовать основные соотношения молекулярно-кинетической теории диффузии. В условиях действия сил Φ_{SL} в объеме V_m структурированного пространства эффективная скорость возрастания массы m_{SL}^m при обмене SL -частицами пропорциональна скорости изменения их концентрации C_{SL} :

$$\frac{dm_{SL}^m}{d\tau} = \frac{dC_{SL}}{d\tau} V_m. \quad (4)$$

По закону Фика скорость переноса диффузией вещества массой m_{SL}^m к субгранице S_m объемом V_m равна

$$\frac{dm_{SL}^m}{d\tau} = -D \frac{dC_{SL}}{dr} S_m, \quad (5)$$

где D — коэффициент диффузии; r — дистанция диффузионного переноса.

Преобразовав равенства (4) и (5), получим

$$\frac{dC_{SL}}{d\tau} = -\frac{D}{R_m} \frac{dC_{SL}}{dr}, \quad (6)$$

где $R_m = V_m/S_m$.

Физический смысл параметра R_m указывает на то, что его значение самоустанавливается так, чтобы соответствовать индукционному периоду — промежутку времени между концом существования метастабильного жидкого металла и самопроизвольным образованием в нем новой структуры в виде локальных объемов V_m (пространств), связанных общей зоной сегрегации, и наступлением диффузионного переноса SL -частиц.

Если предположить, что объемы V_m представляют собой закрытые системы, которые обмениваются с окружающей средой энергией (теплотой), но не веществом, то становятся справедливыми следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \tau_{SL} &= R_m / \bar{v}_{SL}; \\ \tau_{охл} &= \Delta T / v_{охл}; \\ \tau_{SL} &= \tau_{охл}, \end{aligned} \quad (7)$$

где τ_{SL} — продолжительность выхода частиц SL на субграницу (S_m -поверхность); \bar{v}_{SL} — среднее время переноса частицы SL к S_m -поверхности; $\tau_{охл}$ — продолжительность индукционного периода; $v_{охл}$ — скорость охлаждения метастабильного расплава.

Равенство (7) отражает то обстоятельство, что параметры τ_{SL} и $\tau_{охл}$ связаны между собой.

Обмен веществом объемом V_m с его субграницей S_m можно выразить через поток вещества массой m_{SL} , имеющего концентрацию C_{SL} и скорость v_{SL} :

$$\frac{1}{S_m} \frac{dm_{SL}}{d\tau} = v_{SL} C_{SL}. \quad (8)$$

С учетом формул (4) и (5) соотношение (8) приобретает вид

$$\bar{v}_{SL} = \frac{\Delta G_{\max}^{SL}}{kT} \frac{D}{\bar{r}} = \frac{\bar{\Phi}_{SL}}{kT} D, \quad (9)$$

где \bar{v}_{SL} — средняя скорость переноса; k — постоянная Больцмана; \bar{r} и $\bar{\Phi}_{SL}$ — средние значения дистанции переноса и действующей сопряженной силы.

После очевидного преобразования равенство (7) приводим к выражению

$$R_m = \sqrt{\frac{G_{SL} D \Delta T}{RT}} v_{охл}^{-1/2}, \quad (10)$$

где G_{SL} — энергия активации SL -частиц.

Таким образом, исследование эффекта нестационарности показало, что фазовый переход следует рассматривать как стационарный процесс, а объекты новой структурной организации метастабильного расплава справедливо считать базисными.

Из работ [7, 8] известно уравнение, связывающее дендритный параметр d и скорость охлаждения расплава,

$$d = a v_{охл}^{-n}, \quad (11)$$

где a — постоянная, зависящая от свойств сплава; n — постоянная, мало зависящая от со-

става сплава, $n = 1/4 \dots 1/2$ (для равноосных зерен $n = 1/3$).

При оценке явлений переходного периода допустимо принять, что $d = 2R_m$. Тогда выражения (10) и (11) приемлемо согласуются по виду структуры. Это позволяет предположить, что сравнение этих выражений может быть одним из возможных методов проверки адекватности развитой концепции затвердевания металлов и сплавов.

Вывод

Предложена обновленная концепция, позволяющая предсказывать ход эволюции затвердевания металлов и сплавов. Эволюция металлической системы является самоорганизованной, так как все действия совершаются по

принципу максимального использования свободной энергии, хранящейся в скрытой форме. Фундаментальное свойство такого превращения состоит в способности перехода из неупорядоченного состояния в упорядоченное. Включая в эволюционный процесс факторы, влияющие на плотность свободной энергии, можно рассматривать образование кристаллических зон в теле литых изделий [9, 10] и индивидуальных дефектов литой структуры [11]. Это означает, что в настоящее время можно управлять получением литого изделия сложного строения [12]. Следующий этап развития концепции позволит искать и исследовать новые ресурсы, достичь более глубокого понимания необратимых процессов, найти новые многообещающие приложения [13–14].

Литература

- [1] Пригожин И., Кондепуди Д. *Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур*. Москва, Мир, 2002. 464 с.
- [2] Убеллоде А.Р. *Расплавленное состояние вещества*. Москва, Металлургия, 1982. 376 с.
- [3] Гаврилин Н.В. *Плавление и кристаллизация металлов и сплавов*. Владимир, Изд-во Владим. гос. ун-та, 2000. 260 с.
- [4] Stanley H.E. *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*. New York, Clarendon Press, 1971. 333 p.
- [5] Ма Ш. *Современная теория критических явлений*. Москва, Мир, 1980. 296 с.
- [6] Pfeuty P., Toulouse G. *Introduction to the Renormalization Group and to Critical Phenomena*. New York, John Wiley & Sons, 1977. 200 p.
- [7] Dantzig J.A., Rappaz M. *Solidification*. Lausanne, EPFL Press, 2009. 618 p.
- [8] Эскин Г.Н. Недендритная кристаллизация легких сплавов при ультразвуковой обработке расплава. *Металлургия машиностроения*, 2003, № 4, с. 11–15.
- [9] Семенов В.И. *Затвердевание литейных сплавов. Ч. 1. Подходы, концепция самоорганизации, принципы и механизмы*. Москва, «Спутник+», 2014. 219 с.
- [10] Семенов В.И. Затвердевание металлов и сплавов. *Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформаций и термической обработки легких сплавов. Сб. тр. науч.-техн. конф.*, Москва, 18 мая 2016 г., ФГУП ВИАМ, 2016, ч. 2. URL: <http://conf.viam.ru/conf/203/proceedings> (дата обращения 16 июня 2016).
- [11] Семенов В.И., Андреев В.В. Факторы зарождения и формирования включений графита в чугунах. *Металлургия машиностроения*, 2014, № 2, с. 14–17.
- [12] Семенов В.И., Назаратин В.В., Андреев В.В., Нуралиев Ф.А. Влияние перитектического превращения на характер затвердевания, структуру и свойства стальных отливок. *Сталь*, 2016, № 11, с. 58–64.
- [13] Семенов Б.И., Рапохина С.С., Седых А.М. Новые точки роста в традиционных технологиях заготовительного производства. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 13, 46 с. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/218906.html> (дата обращения 15 марта 2017).
- [14] Нго Т.Б., Джиндо Н.А., Семенов А.Б., Семенов Б.И. Тиксоформинг высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 9, с. 36. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/380.html> (дата обращения 15 марта 2017).

References

- [1] Prigozhin I., Kondepudi D. *Sovremennaiia termodinamika. Ot teplovykh dvigatelei do dissipativnykh struktur* [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures]. Moscow, Mir publ., 2002. 464 p.
- [2] Ubellode A.R. *Raspavlennoe sostoianie veshchestva* [Molten state of matter]. Moscow, Metallurgii publ., 1982. 376 p.
- [3] Gavrilin N.V. *Plavlenie i kristallizatsiia metallov i splavov* [Melting and crystallization of metals and alloys]. Vladimir, VSU publ., 2000. 260 p.
- [4] Stanley H.E. *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*. New York, Clarendon Press, 1971. 333 p.
- [5] Ma Sh. *Sovremennaiia teoriia kriticheskikh iavlenii* [The modern theory of critical phenomena]. Moscow, Mir publ., 1980. 296 p.
- [6] Pfeuty P., Toulouse G. *Introduction to the Renormalization Group and to Critical Phenomena*. New York, John Wiley & Sons, 1977. 200 p.
- [7] Dantzig J.A., Rappaz M. *Solidification*. Lausanne, EPFL Press, 2009. 618 p.
- [8] Eskin G.N. Nedendritnaia kristallizatsiia legkikh splavov pri ul'trazvukovoi obrabotke rasplava [Nidentity solidification of light alloys under ultrasonic melt treatment]. *Metallurgiiia mashinostroeniia* [Metallurgy engineering]. 2003, no. 4, pp. 11–15.
- [9] Semenov V.I. *Zatverdevanie liteinykh splavov. Ch. 1. Podkhody, kontseptsiiia samoorganizatsii, printsipy i mekhanizmy* [Solidification of casting alloys. Part 1. Approaches, the concept of self-organization principles and mechanisms]. Moscow, «Sputnik+» publ., 2014, 219 p.
- [10] Semenov V.I. *Zatverdevanie metallov i splavov* [Solidification of metals and alloys]. *Metallovedenie i sovremennye razrabotki v oblasti tekhnologii lit'ia, deformatsii i termicheskoi obrabotki legkikh splavov. Sb. tr. nauch.-tekhn. konf.* [Metallography and modern developments in technology of casting, deformation and heat treatment of light alloys. Proceedings of the scientific-technical conference]. Moscow, 18 May 2016, Moscow, FGUP VIAM publ., 2016, pt. 2. Available at: <http://conf.viam.ru/conf/203/proceedings> (accessed 16 June 2016).
- [11] Semenov V.I., Andreev V.V. *Faktory zarozhdeniia i formirovaniia vklucheniia grafita v chugunakh* [Factors of Origination and Formation of Graphite Inclusions in Cast Irons]. *Metallurgiiia mashinostroeniia* [Metallurgy engineering]. 2014, no. 2, pp. 14–17.
- [12] Semenov V.I., Nazaratina V.V., Andreev V.V., Nuraliev F.A. *Vliianie peritekticheskogo prevrashcheniia na kharakter zatverdevaniia, strukturu i svoistva stal'nykh otlivok* [Perfection-are the impact of transformation on the character of the solidification, structure and properties of steel castings]. *Stal'* [Steel in Translation]. 2016, no. 11, pp. 58–64.
- [13] Semenov B.I., Rapokhina S.S., Sedykh A.M. *Novye tochki rosta v traditsionnykh tekhnologiakh zagotovitel'nogo proizvodstva* [A new growth point in the traditional technology of blank production]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and education. Bauman MSTU]. 2011, no. 13, 46 p. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/218906.html> (accessed 15 March 2017).
- [14] Ngo T.B., Dzhindo N.A., Semenov A.B., Semenov B.I. *Tiksoforming vysokoprochnykh splavov sistemy Al-Zn-Mg-Cu* [Thixoforming Al-Zn-Mg-Cu wrought aluminium alloys]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation]. 2012, vol. 9, p. 36. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/380.html> (accessed 15 March 2017).

Статья поступила в редакцию 17.04.2017

Информация об авторе

СЕМЕНОВ Вячеслав Иванович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Monakhov.I.Nikita@gmail.com).

Information about the author

SEMENOV Vyacheslav Ivanovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Foundry Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Monakhov.I.Nikita@gmail.com).