УДК 669.046:621.746.62 DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-91-102

САМООРГАНИЗОВАННЫЙ ОБМЕН ВЕЩЕСТВОМ И ОБРАЗОВАНИЕ НОВЫХ ФАЗ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В.И. Семёнов Monakhov.I.Nikita@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Для неравновесной ситуации, соответствующей затвердеванию металлов и сплавов, предложен новый принцип учета изменений параметров, определяющих термодинамическое состояние реагирующих веществ сплава для фазового перехода из неупорядоченности к новым организованным структурам. Выявлена концепция, определившая возможность разработки новых технологий, способных играть существенную роль в создании материалов сложного строения, удовлетворяющих различным требованиям

Ключевые слова

Металл, фаза, превращение, неустойчивость, свойства, структура, процесс, стадия, химический потенциал

Поступила в редакцию 17.04.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

На протяжении достаточно долгого времени поведение металлов при затвердевании для объяснения образования новых фаз предсказывали по равновесным состояниям металлической системы и фазовым диаграммам [1].

С интенсивным развитием новых металлургических технологий, позволивших создавать неравновесные материалы сложного строения и контролировать их создание, потребовалось представить затвердевающий металлический расплав системой, демонстрирующей признаки естественного поведения, отличающиеся тем, что носят целенаправленный характер. Эта особенность проявляется при переходе жидкого металла в неравновесное состояние в ходе необратимого процесса — эволюции от разрушения слабоупорядоченных жидких структур вблизи равновесия, из-за способности создавать новый порядок (самоорганизованного обмена веществом) и новые фазы, естественного поведения по отношению к воздействию со стороны внешней среды и намеренного превращения в кристаллические структуры металлов.

Эволюция поведения частиц (атомов) имеет случайный и произвольный характер, но естественный отбор придает ему вид намерения и цели. Обратимся к примеру. Пусть сплав представляет собой систему частиц двух веществ A и B с молярными долями $(1 - x)$ и x. Оба компонента находятся в α-фазе как в жидком (L), так и в твердом (S) состоянии. Их химические потенциалы g_A^α и g_B^α известны. Используя понятия жидкой и твердой фаз этой системы, мы можем наблюдать следующие ситуации. Во-первых, вещества A и B присутствуют в этих фазах в виде механической смеси. Свободная энергия такой α-фазы

$$g^\alpha = (1-x)\, g_A^\alpha + x g_B^\alpha. \qquad (1)$$

Во-вторых, учитывая возможность проявления среди частиц (атомов) веществ *A* и *B* химического сродства, результатом может быть образование идеального α-раствора. Свободная энергия этой α-фазы определится соотношением

$$f^{\alpha} = g^{\alpha} - \Delta_M f^{\alpha}, \tag{2}$$

где $\Delta_M f^{\alpha}$ — энергия смешения. Для изучения особенности поведения вещества важно, что энергия смешения $\Delta_M f^{\alpha}$ в теплоту не переходит, а ее значение отлично от нуля. Она находится в системе в скрытой форме. Функция энергии смешения вытекает из необходимости приведения идеального раствора в однородное устойчивое состояние.

В-третьих, при образовании гетерогенной системы, в которой λ — доля жидкой фазы, $(1-\lambda)$ — доля твердой фазы, потенциал g свободной энергии смеси α-фаз чистых веществ, потенциал f свободной энергии смеси идеальных α-растворов и изменение энтальпии Δh^{SL} при смене фазового состояния веществ, согласно первому началу термодинамики, можно записать так:

$$g = (1-\lambda) g^S + \lambda g^L; \tag{3}$$

$$f = (1-\lambda) f^S + \lambda f^L; \tag{4}$$

$$\Delta h^{SL} = g^L - g^S. \tag{5}$$

Зависимость потенциалов g и f свободной энергии с учетом молярных долей жидкой и твердой фаз данной гетерогенной системы в графической форме в виде диаграммы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Изменение потенциалов свободной энергии гетерогенной системы от долей жидкой и твердой фаз

Опираясь на термодинамический аппарат исследований, проследим и оценим набор правил, которому подчиняется поведение веществ *A* и *B* при плавлении и затвердевании, т. е. переходах из твердой фазы в жидкую и обратно под

действием поглощения или выделения скрытой теплоты Q. Такой фазовый переход происходит при определенной температуре фазового перехода $T_{\text{ф.п}}$. При подходящих условиях (без обмена теплотой Q с окружающей средой) обе фазы (жидкая и твердая) гетерогенной системы могут совместно существовать в состоянии теплового равновесия, занимая разные объемы.

Обмен веществом между жидкой и твердой фазами имеет смысл рассматривать в составе химической реакции, уравнение которой условно запишем в виде

$$L \leftrightarrows S. \tag{6}$$

Для оценки хода эволюции данной реакции обратимся к диаграммам на рис. 1, 2.

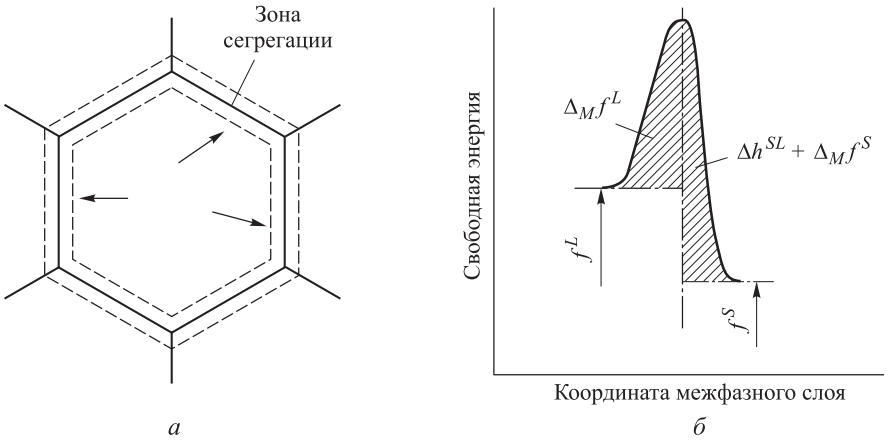


Рис. 2. Схемы к механизму фазового перехода:
а — фазовый *m*-элемент; *б* — барьер свободной энергии зоны сегрегации (межфазного слоя)

Попытка проследить предсказуемые и надежные математические соотношения между свойствами веществ A и B и как они связаны с ходом реакции (6) дала следующие результаты.

1. Ключевой чертой реакции (6) является то, что при материальном обмене между жидкой и твердой фазами оба вещества A и B, следуя единственному общему направляющему принципу превращений — эволюции к новым организованным структурам, устанавливает новые отношения, переходя предварительно в исходное состояние чистого компонента. Это дает частицам (атомам) вещества важные преимущества. Данная черта материального обмена в гетерогенной системе высказана впервые в работах Гиббса, предложившего следующее уравнение [2]:

$$dU = TdS - pdV + g_1 dm_1 + g_2 dm_2 + \ldots + g_n dm_n. \tag{7}$$

Суть гипотезы Гиббса в том, что изменение энергии dU некоторой гомогенной части гетерогенной системы должно быть пропорционально изменениям масс dm_1, dm_2, …, dm_n и химическим потенциалам g_1, g_2, …, g_n этих ве-

ществ. Многие идеи современной равновесной термодинамики берут начало из этой гипотезы. В теории фазовых превращений, упрощая информацию о термодинамике данной системы, термодинамические свойства расплава стали относить к свойствам идеального раствора и определять его как раствор, теплота смешения которого равна нулю, а энтропия смешения равна конфигурационной энтропии хаотического расположения атомов [2, 3]. Понятно, что это допущение радикально изменяет поведение частиц (атомов).

2. Уникальность хода материального обмена между гомогенными частями гетерогенной системы указанной чертой не ограничивается. Требуется, чтобы обмениваемое вещество $m_1, m_2,\ldots, m_n$, следуя физическим законам, имело способность (средство) предсказуемо демонстрировать естественное поведение в неравновесных условиях. Хорошая физическая возможность иметь необходимые средства вытекает из упорядоченности, а упорядоченность — из энергетического ресурса. Иначе говоря, вещество $m_1, m_2,\ldots, m_n$ должно преодолевать энергетический барьер (см. рис. 2). Способность извлекать полезную работу (преодолевать энергетический барьер) связана с предельной молярной концентрацией вещества. Очаги свободной энергии в виде сгустков концентрации вещества возникают в межфазном слое. Эта особенность подразумевает, что атомы способны адаптироваться путем перехода в новое состояние. Из этого общего направляющего принципа приходим к потенциалу свободной энергии:

$$G_{\max} = k\,T \lg C_{\max}. \tag{8}$$

Из диаграммы (см. рис. 1) понятно, что равенство (8) выполняется при

$$\Delta G^{SL}_{\max} = \Delta_M f^L. \tag{9}$$

В итоге, когда концентрация C достигает предельного значения $C_{\max}$, вещество преодолевает энергетический барьер $G_{\max}$ и вступает в переходное состояние. Эту цену приходится платить за неупорядоченное состояние частиц в жидкой фазе, а ей самой переходить в метастабильное состояние, приближаясь к границе равновесия через переохлаждение $\Delta T = T_{\text{ф.п}} - T$. При плавлении у частиц (атомов) вещества есть источник теплоты Q со стороны внешней среды, чтобы привести себя и свое окружение в равновесное состояние. Поэтому вещество при плавлении не перегревается. То, что вещество металлической системы само изменяет свое состояние в ответ на управляющий сигнал (в данном случае поток теплоты Q) из внешней среды, является той определяющей характеристикой развития необратимого процесса в неравновесной обстановке, которая может пониматься как намерение произвести «некомпенсированное преобразование» внутри системы в определенном направлении.

3. Термодинамическое поведение вещества в переходном состоянии определяется равенством (см. рис. 1):

$$f^L + \Delta_M f^L = f^S + \Delta_M f^S + \Delta h^{SL}, \tag{10}$$

которое позволяет сделать вывод, что атомы реагентов приспосабливаются к изменчивой среде путем одномоментного спонтанного изменения формы своего

строения в неравновесной обстановке. Используя понятия и методы переходного состояния [2] и опираясь на равенство (10), можно утверждать, что реагенты образуют переходное состояние $(AB)^{\#}$, которое лучше приспособлено к ситуации, и можно установить, что веществу требуется, а именно, такую модификацию внутренней энергии объекта (атома), которая связана с теплотой реакции фазового перехода, чтобы изменение энтальпии Δh^{SL} соответствовало теплоте Q,

$$\Delta h^{SL} = Q. \tag{11}$$

Итак, ключевой момент поведения частиц (атомов) вещества, вступившего в переходное состояние, должен пониматься не как возникающий из эволюционной импровизации, а как «идеальная обратимость», т. е. неизбежное следование физическим законам. Иначе говоря, в переходном состоянии «идеальная обратимость» в точности воспроизводится с помощью обратимого процесса, в котором изменение термодинамического состояния частиц (атомов) вещества обусловлено исключительно обменом теплоты. Изменение энтропии в таком процессе равно нулю. Поэтому такая идеальная обратимость должна быть универсальной. Все начинает выглядеть так, что в природе среди металлов, возможно, не существует ни одной необратимой системы. Неудивительно, что теплота плавления металлов равна теплоте затвердевания.

4. Следствием адаптации состояния и свойств частиц (атомов) вещества (материи) на микроскопическом уровне к окружающей среде может являться возможность точно предсказывать доминирующие признаки образования кристаллических структур [4–6].

Представление о структурах затвердевающего расплава, приспосабливающихся к изменчивым обстоятельствам через эффективное использование доступной свободной энергии, может восприниматься как пример общего физического принципа, регулирующего поведение неравновесных систем. Отсюда также следует, что необходим поиск ответа на другой вопрос: каков механизм устойчивого реагирования реакции (6) и, более того, почему оно не зависит от сложности структурной схемы самого перехода?

Конкретным примером устойчивой эволюции в неравновесной обстановке может служить формирование дендритных кристаллов, «платящих» строго определенную цену изменением своей ветвистости.

Похоже, что механизм воспроизведения дендритного строения на самом деле особенно хорош для стабилизации возрастающего несоответствия тепло- и массопереноса при изменении скорости охлаждения метастабильного расплава. Ветви дендрита прорастают в метастабильный расплав и располагаются так, что между ними образуются равновеликие дендритные ячейки, объем которых занимает метастабильный расплав. Величина и форма дендритных ячеек, дендритная ликвация, дендритная пористость — все это является главной характерной чертой дендритного строения. В рамках междисциплинарного подхода видно, что такие локальные процессы могут происходить с большой вероятностью при поддержании локального равновесия [2].

Рассмотрим дендритную ликвацию, предполагая возможность использования скрытой свободной энергии и выстраивая перенос диффундирующих частиц с помощью молекулярно-кинетической теории диффузии. Появление потенциала свободной энергии $G_{\max}^{SL}$ в метастабильном расплаве вызвано переохлаждением. Его значение устанавливает равенство (9). Поскольку с данным потенциалом связаны смысл и намерение перехода в твердое состояние из жидкого, то развитие в этом направлении эволюционного процесса выражает индекс «*SL*». Градиент $G_{\max}^{SL}$ создает некомпенсированную термодинамическую силу:

$$\Phi_{SL} = \text{grad}\, G_{\max}^{SL}. \tag{12}$$

Необходимо отметить, что основная отличительная особенность метастабильного расплава как стабильной системы проявляется в том, что в нем возникают лишь отдельные очаги неравновесности в пределах локальных микрообъемов — кластеров, представленных центральным атомом и его ближним окружением. Это особое явление предложено рассматривать случайным локальным «дефектом равновесности». Латентная энергия $\Delta_M f^L$, скрытая в кластере, становится свободной.

Некомпенсированные термодинамические силы Φ_{SL}, действующие на принципе аддитивности, одномоментно создают в метастабильном расплаве новую пространственную структуру (рис. 2, *а*) в виде совокупности локальных объемов с общей зоной сегрегации. Вещество, которое становится неравновесным, получает возможность перестраиваться. Термодинамические силы Φ_{SL}, имея целенаправленный характер, действуя согласованно и однородно, «переносят» атомы, распадающихся кластеров кратчайшим путем в зону сегрегации. Скорость изменения массы m_{SL}^m таких частиц пропорциональна изменению их концентрации:

$$\frac{dm_{SL}^m}{d\tau} = \frac{dC_{SL}}{d\tau} V_m, \tag{13}$$

где индекс «m» указывает на структурный уровень.

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

$$\frac{dm_{SL}^m}{d\tau} = -D \frac{dC_{SL}}{dr} S_m, \tag{14}$$

где D — коэффицент диффузии. Преобразуя равенства (13) и (14), получаем

$$\frac{dC_{SL}}{d\tau} = -\frac{D}{R_m} \frac{dC_{SL}}{dr}, \tag{15}$$

где $R_m = V_m / S_m$. Физический смысл параметра R_m указывает на то, что его величина самоустанавливается не как возникающая из эволюционной импровизации, причиной которой могут быть тепловые флуктуации, а как неизбежное следствие физических законов. Иными словами, дистанция переноса силами Φ_{SL} частиц SL должна быть согласована со скоростью нарастания их массы

m_{SL}^{m}, так как подвижность самих частиц (атомов) ограничена коэффициентом диффузии D.

В случае когда вещество претерпевает фазовое превращение, диффузионные потоки ограничены локальными объемами V_m. С позиции термодинамики объемы V_m представляют собой закрытые термодинамические системы. Окружающая среда поглощает выделяемую веществом теплоту. Чтобы конкретизировать внешние условия, используются следующие равенства [5, 6]:

$$\tau_{SL} = R_m / \overline{v}_{SL}; \tag{16}$$

$$\tau_{\text{охл}} = \Delta T / v_{\text{охл}}; \tag{17}$$

$$\tau_{SL} = \tau_{\text{охл}}, \tag{18}$$

где $\overline{v}_{SL}$ — среднее время переноса частицы SL к S_m-поверхности; $\tau_{\text{охл}}$ — скорость охлаждения метастабильного расплава. Есть основания полагать, что время $\tau_{\text{охл}}$, в течение которого переохлаждение достигает критической величины ΔT, и время τ_{SL} — длительность переноса SL-частицы границы S_m должны быть связаны.

Материальный обмен в объеме V_m можно выразить через поток вещества массой m_{SL}, имеющего концентрацию C_{SL} и скорость v_{SL}:

$$\frac{1}{S_m}\frac{dm_{SL}}{d\tau} = v_{SL} C_{SL}. \tag{19}$$

Для объема V_m с использованием равенств (8), (14) и (15) соотношение (19) приводится к виду

$$\overline{v}_{SL} = \frac{G_{\max}^{SL}}{kT}\frac{D}{\overline{r}} = \frac{\overline{\Phi}_{SL}}{kT} D, \tag{20}$$

где $G_{\max}^{SL}$ — потенциал силового поля свободной энергии на атом реакции, в ходе которой SL-частицы получают скорость переноса v_{SL}, знак «–» указывает на средние значения параметров: скорости v_{SL}, дистанции переноса r и действующей сопряженной силы Φ_{SL}.

Далее, после очевидного преобразования равенства (18), получаем формулу

$$R_m = \sqrt{\frac{AD\Delta T}{RT}} v_{\text{охл}}^{-1/2}. \tag{21}$$

Можно принять, что

$$d = 2R_m, \tag{22}$$

где d — дендритный параметр. Отсюда становится удобно сопоставить равенство (21) с общепринятым равенством [1, 7]:

$$d = a v_{\text{охл}}^{-n}, \tag{23}$$

где a и n — постоянные. Постоянная a связана со свойствами сплава; постоянная n мало зависит от состава сплава и в основном находится в диапазоне от 1/2 до 1/4.

Очевидная корреляция между соотношениями (21) и (23) может служить одним из возможных методов проверки адекватности развитой концепции модели неравновесной кристаллизации металлов и сплавов. Ничего в этой эволюционной концепции не предполагает постепенного привыкания к окружающей среде и наследования признаков. Устойчивость эволюционной адаптации можно объяснить тем, что на атомном уровне частицы (атомы) вещества одномоментно изменяют свое внутреннее состояние и свойства в переходном состоянии, а процессы тепло- и массопереноса являются стационарными.

Обсуждение результатов. 1. Долгое время считалось, что затвердевание металлов (фазовое превращение первого рода) связано (подчиняется набору правил) с флуктуациями различных величин, таких как температура, число молей, объем и др. Чтобы понять обусловленность и физический смысл некомпенсированного превращения вещества метастабильного расплава в кристаллическое вещество твердой фазы в неравновесных условиях, принимали основное допущение, определяя идеальный раствор как раствор, теплота смешения которого равна нулю, а энтропия смешения равна конфигурационной энтропии хаотического расположения атомов [3]. Следует подчеркнуть, что такое допущение является весьма спорным, поскольку термодинамический потенциал свободной энергии смеси чистых веществ выше, чем термодинамический потенциал свободной энергии образованного ими идеального раствора. Причина обусловлена химическими реакциями и явлением переноса. К тому же затраченная внутренняя энергия превращается в работу, а работа, выполненная при T, p = const, становится свободной энергией, которая скрыта в самой системе, т. е. находится в скрытой (латентной) форме. В нашем более общем подходе главная задача — получение выражения для приращения термодинамического потенциала свободной энергии, возбуждающего необратимый процесс, возвращающий вещество метастабильного идеального раствора к первоначальному состоянию [5, 6].

2. Из приведенного термодинамического описания двухкомпонентной металлической идеализированной системы и принятых предположений об атомных взаимодействиях и механизме элементарных актов важно отметить, что концептуально главным предметом можно считать наиболее общие и новые действующие правила, позволяющие подробнее и глубже проникать в суть явления. Здесь впервые декларируется и учитывается роль скрытой свободной энергии в формировании агрегатных состояний, перестройке структуры метастабильного расплава, материальном обмене между частями системы и переходном состоянии отдельных частиц (атомов), несущих смену старых качеств на новые как естественные следствия выгодных возможностей движения, эффективно использующего энергию. Особо важно подчеркнуть, что фазовый переход является обратимым процессом, протекающим без производства энтропии.

В сущности, некомпенсированное превращение при неравновесных обстоятельствах стало возможным рассматривать и точно предсказывать его ход, опираясь на физические законы.

3. Одномоментное скачкообразное изменение физического состояния и физико-химических свойств объектов (атомов) при стационарности процессов тепло- и массопереноса — это центральная идея, из которой выясняется возможность учета взаимного влияния явлений различной физической природы. Такой подход дает дополнительные, полезные практике возможности выбора пути эволюционного развития, отталкиваясь от физических принципов и ограничений.

Целенаправленный характер поведения частиц (атомов) исходит от их физической природы. Этот путь плодотворен тем, что имеет случайные и производственные черты. При локальной перестройке частицы (атомы) переходят из метастабильного расплава в зону сегрегации (межфазного слоя). Стремление системы уменьшить избыточную энергию этой границы в зоне взаимного контакта вещества стимулирует образование новой фазы. В этой гетерогенной зоне каждую фазу сопровождает поле свободной энергии, особый характер которой заключен в способности к диссипации. Диссипация свободной энергии увеличивает скорость роста частиц новой фазы. Предпочтение получает та фаза, концентрация которой превалирует. Поэтому естественный отбор придает росту зародыша ведущей фазы вид намерения и цели — создание термодинамически более устойчивой фазы. Структура фазовой границы имеет возможность находиться в постоянном развитии.

Как показывает такой анализ, трудно понять развитие некомпенсированного превращения без поддержания порядка с помощью самоорганизации. При самоорганизации появляется возможность адаптироваться к превалирующей окружающей среде. Таким образом, самоорганизованная эволюция затвердевающего нестабильного расплава происходит как взаимосвязанная намерением и целью развития двух самоорганизованных подсистем: с одной стороны, зарождающихся и, с другой стороны, растущих областей новой фазы.

4. В связи со сказанным можно утверждать, что между термодинамическими состояниями базисных объектов (атомов) металлической системы, стационарным состоянием процессов тепло- и массопереноса и перестройкой атомной структуры при затвердевании существуют тесные связи. Природа этих связей наиболее полно проявляется на атомарном и микрометровом уровнях. Как показали проведенные исследования, природные черты этих связей раскрываются в равной степени полно как на эвтектических, так и сплавах типа твердого раствора [5, 6].

Выводы. 1. Следует принять действующую самоорганизацию некомпенсированного превращения вещества метастабильной жидкой фазы в кристаллическое вещество твердой фазы, но одновременно необходимо в реальных условиях контролировать и ограничить часть ролей и сторон ответственности основного «действующего лица» — свободной энергии для адаптации процесса кристаллизации к желаемым структурам путем воздействия на состояние межфазных границ гетерогенной системы.

2. Необходимое условие получения максимума недендритной и предельно измельченной неравновесной дендритной структур состоит в том, чтобы путем внешнего воздействия совершить максимальную работу, перестраивая частицы

(атомы) и дефекты их упаковки, и направить энергетический эквивалент этой работы на оптимизацию энергетического состояния межфазных границ. Уже можно видеть многочисленные приложения самых различных металлургических процессов [8–10].

3. За самоорганизованными процессами кристаллизации металлов и сплавов стоит физика процессов атомного уровня, которая не позволяет скрытой свободной энергии рассеиваться в виде бесполезной теплоты, теряться среди случайных движений частиц (атомов). Путем самоорганизации мера этой неупорядоченности (энтропия) сведена к нулю. Если бы этого не происходило, то фазовая реакция $L \leftrightarrows S$ неизбежно пришла бы к состоянию равновесия, а этого не происходит. Эволюция фазовой реакции $L \leftrightarrows S$ сама по себе есть лишь частный случай более общего природного явления: затрат и выгод через информацию. Реакция $L \leftrightarrows S$ является гибкой и достаточно чувствительной, чтобы выгодно реагировать на изменения в окружающей среде. Выгода определяет возможность многообразия, но оно должно быть ограничено центральным законом, который мы наблюдаем в природе, — это формализм первого начала термодинамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dantzig J.A., Rappaz M.* Solidification. Lausanne: EPFL Press, 2009. 618 p.

2. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.

3. *Кристиан Дж.* Теория превращений в металлах и сплавах. Термодинамика и общая кинетическая теория. Ч. 1. М.: Мир, 1978. С. 239–248. С. 585–661.

4. *Walgraef D.* Spatio-temporal pattern formation. Springer, 1997. 306 p.

5. *Семёнов В.И.* Затвердевание литейных сплавов. Ч. 1. Подходы, концепция самоорганизации, принципы и механизмы. М.: Спутник+, 2014. 224 с.

6. *Семёнов В.И.* Затвердевание металлов и сплавов // Сборник трудов научно-технической конференции «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформаций и термической обработки легких сплавов». Ч. 2.
URL: https://conf.viam.ru/collections/758 (дата обращения: 16.06.2016).

7. *Эскин Г.Н.* Недендритная кристаллизация легких сплавов при ультразвуковой обработке расплава // Металлургия машиностроения. 2003. № 4. С. 11–15.

8. *Семёнов Б.И., Рапохина С.С., Седых А.М.* Новые точки роста в традиционных технологиях заготовительного производства // Наука и образование: научное издание. 2011. № 8. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/218906.html

9. *Нго Т.Б., Джиндо Н.А., Семёнов А.Б., Семёнов Б.И.* Тиксоформинг высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 9.
DOI: 10.18698/2308-G033-2012-9-380 URL: http://engjournal/catalog/machin/rocket/380.html

10. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного металлопорошкового литья / Е.Н. Каблов, А.Г. Евгенов, О.Г. Оспенникова, Б.И. Семёнов, А.Б. Семёнов, В.А. Королёв // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 9. С. 62–80. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-9-62-80

Семёнов Вячеслав Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Семёнов В.И. Самоорганизованный обмен веществом и образование новых фаз при затвердевании металлов и сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 3. С. 91–102. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-91-102

SELF-ORGANISED MATTER EXCHANGE AND FORMATION OF NEW PHASES DURING SOLIDIFICATION OF METALS AND ALLOYS

V.I. Semenov Monakhov.I.Nikita@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

For the case of a non-equilibrium situation that corresponds to solidification of metals and alloys, we suggest a new principle of taking into account the changes in parameters that define the thermodynamic state of the substances reacting in the alloy during a phase transition from disorder to new regular structures. We detected a concept leading to the possibility of developing new technologies capable of contributing significantly to creating complex materials that satisfy various requirements

Keywords

Metal, phase, transformation, instability, properties, structure, process, stage, chemical potential

Received 17.04.2017
© BMSTU, 2018

REFERENCES

[1] Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Lausanne, EPFL Press, 2009. 618 p.

[2] Prigozhin I., Kondepudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures]. Moscow, Mir Publ., 2002. 461 p.

[3] Christian J.W. The theory of transformations in metals and alloys. Vol. 1-2. Pergamon, 2002. 1200 p. (Russ. ed.: Teoriya prevrashcheniy v metallakh i splavakh. Termodinamika i obshchaya kineticheskaya teoriya. Ch. 1. Moscow, Mir Publ., 1978. Pp. 239–248; pp. 585–661.)

[4] Walgraef D. Spatio-temporal pattern formation. Springer, 1997. 306 p.

[5] Semenov V.I. Zatverdevanie liteynykh splavov. Ch. 1. Podkhody, kontseptsiya samoorganizatsii, printsipy i mekhanizmy [Cast alloy freezing. P. 1. Approaches, self-organization conception, principles and mechanisms]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2014. 224 p.

[6] Semenov V.I. Zatverdevanie metallov i splavov. *Sb. tr. nauch.-tekh. konf. «Metallovedenie i sovremennye razrabotki v oblasti tekhnologiy lit'ya, deformatsiy i termicheskoy obrabotki legkikh splavov». Ch. 2* [Proc. Sci.-Tech. Conf. "Material engineering and modern developments in field of cast technologies, deformations and thermal treatment of light alloys". P. 2]. Available at: https://conf.viam.ru/collections/758 (accessed: 16.06.2016).

[7] Eskin G.N. Non-dendritic crystallization of light alloys in process of ultrasound melt treatment. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy of Machinery Building], 2003, no. 4, pp. 11–15 (in Russ.).

[8] Semenov B.I., Rapokhina S.S., Sedykh A.M. The new trends in traditional procuring production technologies. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2011, no. 8 (in Russ.). Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/218906.html

[9] Ngo T.B., Dzhindo N.A., Semenov A.B., Semenov B.I. Thixoforming Al–Zn–Mg–Cu wrought aluminium alloys. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 9 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-G033-2012-9-380
Available at: http://engjournal/catalog/machin/rocket/380.html

[10] Kablov E.N., Evgenov A.G., Ospennikova O.G., et al. Metal power compositions for the EP648 heat resistant alloy manufactured by all-russian research institute for aircraft materials VIAM for selective laser melting, laser metal deposition and metal injection molding technologies. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2016, no. 9, pp. 62–80 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2016-9-62-80

Semenov V.I. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Semenov V.I. Self-Organised Matter Exchange and Formation of New Phases During Solidification of Metals and Alloys. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 3, pp. 91–102 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-91-102