

РАЗДЕЛ II. ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 669.017:536.421

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-2-78-86

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕЖФАЗНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Балакин Ю.А.¹, Юнусов Х.Б.², Будник А.А.¹, Соколов И.В.¹, Хаулин А.Н.²

¹Московский государственный университет технологий
и управления (МГУТУ) им. К.Г. Разумовского, Российская Федерация
109004, г. Москва, ул. Земляной Вал, д.73

²Московский государственный областной университет
105005, Москва, ул. Радио, д.10А, Российская Федерация

Аннотация. В работе на основе метода неравновесной термодинамики разработана математическая модель кинетики поверхностного натяжения на границе раздела фаз при кристаллизации металлов. Расчеты по модели показали увеличение поверхностного натяжения на 27-28% по сравнению с жидким состоянием. Эти, полученные в данной работе результаты, удовлетворительно согласуются с известными данными в литературных источниках. Установлена связь кинетики межфазного поверхностного натяжения и объемов твердой фазы, выделяющихся из кристаллизующегося расплава. Она показала, что изменения поверхностного натяжения связаны с формированием структурных зон затвердевающей отливки и ее литейными свойствами.

Ключевые слова: расплав, металл, поверхностное натяжение, кристаллизация, термодинамика.

IMPACT OF EXTERNAL INFLUENCE ON INTERFACIAL INTERACTION DURING CRYSTALLIZATION OF METALS

Yu. Balakin¹, Kh. Yunusov², A. Budnik¹, I. Sokolov¹, A. Khaulin²

¹*K.G. Razumovskiy Moscow State University of Technologies and Management
ul. Zemlyanoi val 73, 109004 Moscow, Russia;*

²*Moscow State Regional University
ul. Radio 10a, 105005 Moscow, Russia*

Abstract. Using the method of nonequilibrium thermodynamics, we have developed a mathematical model of the kinetics of surface tension at a phase interface during crystallization of

metals. The model calculations show an increase in surface tension up to 27%–28% in comparison with that of the liquid state. The results obtained in this work are in satisfactory agreement with the known data from the literature. The relationship between the kinetics of the interfacial surface tension and the volume of the solid phase emanating from the crystallizing melt is established. It is shown that the changes in surface tension are associated with the formation of structural zones of the solidifying casting and its casting properties.

Key words: melt, metal, surface tension, crystallization, thermodynamics.

Проблема формирования требуемой потребителю структуры и уровня свойств слитков и отливок является для химиков, металлургов и литейщиков весьма актуальной. Эти вопросы особенно остро стоят в литейном производстве, где используют литейные сплавы, структура которых образуется в результате процесса кристаллизации. Если при производстве заготовки не происходит фазовой перекристаллизации или значительного изменения растворимости компонентов в твердом состоянии, то структура литья при последующей термообработке существенно не меняется. Следовательно, специалистам заготовительного производства важно научиться управлять формированием макро- и микро строения металлов и сплавов в процессе их кристаллизации [3].

Известны как традиционные способы управления дисперсностью структуры затвердевающих металлов, например модифицирование, так и физические способы внешнего воздействия (ВнВ) на процессы в жидких и кристаллизующихся металлах и сплавах, особенно на границах раздела фаз [5]. Одно из важных физико-химических свойств – межфазное поверхностное натяжение (ПН) существенно влияет на формирование структуры литого металла. Однако возможности и механизмы влияния методов ВнВ на его кинетику при кристаллизации

изучены еще недостаточно. Особенно этот пробел значителен при рассмотрении изменений межфазного ПН в начале процесса кристаллизации металлов.

Так, при построении диаграмм состояния сплавов полагали границу раздела фаз плоской, радиус частиц возникающих при кристаллизации большой, поэтому межфазную энергию считали постоянной и минимальной во время затвердевания. Фактически частицы зародышей твердой фазы малы, да и граница раздела фаз не плоская, а криволинейная. В результате на границе раздела фаз будет происходить повышение межфазной энергии, и условия равновесия будут изменяться [8].

Воздействие на кристаллизацию, например, упругими колебаниями, как утверждается теоретически или показывается в эксперименте, приводит к некоторому снижению межфазного натяжения на границе раздела фаз и в результате к измельчению структуры литого металла или сплава [2; 3; 6; 10]. Однако какова кинетика этого процесса не сообщается. Способов измерения межфазного ПН в ходе процесса, затвердевания отливки не разработано, поэтому изучение данной проблемы актуально.

Известные выражения параметров кристаллизации: скорости зарождения и роста кристаллов существенно

зависят от межфазного натяжения на границе раздела фаз, но фактора времени в явном виде не содержат, т.к. получены на основе классической термодинамики. Кинетические уравнения объемной кристаллизации также не содержат этот параметр или не учитывают его изменения во время кристаллизации.

Однако процесс кристаллизации металлов и сплавов обычно является неравновесным [2-3; 5-6], поэтому для описания кинетики его параметров, в частности межфазного ПН, более целесообразно применить методы термодинамики необратимых процессов. Известно, что при отклонении от равновесия производные параметров α_i состояния системы $\partial\alpha_i/\partial t$ по времени t становятся отличными от нуля. Эти скорости изменения параметров $\partial\alpha_i/\partial t$ становятся функционально зависимыми от производных термодинамических потенциалов Φ по данному параметру $\partial\Phi/\partial\alpha_i$. Отсюда следует существование линейных соотношений вида [9]:

$$\partial\alpha_i/\partial t = \kappa_{ij} \partial\Phi/\partial\alpha_j, \quad (1)$$

где суммирование предполагается по дважды встречающемуся индексу j ; κ_{ij} – коэффициент пропорциональности. Обозначив $\partial\alpha/\partial t = J$ – обобщенной скоростью, $\partial\hat{O}/\partial t = X$ – обобщенной силой можно выражение (1) записать в упрощенной форме:

$$J_i = L_i \cdot X_i, \quad (2)$$

как линейную зависимость обобщенной скорости от обобщенной силы, т.е. в виде известного соотношения Онзагера для процессов вблизи равновесия [9].

Тогда процесс гомогенной кристаллизации можно представить системой уравнений, описывающих сопряженные процессы в разных фазах:

$$\begin{aligned} J_1 &= L_1 \cdot X_1 + L_2 \cdot X_2, \\ J_2 &= L_2 \cdot X_1 + L_2 \cdot X_2. \end{aligned} \quad (3)$$

где индекс 1 – относится к твердой, а 2 – к жидкой фазам. Полагая, что $J_2 \rightarrow 0$, т.е. поток вещества и других параметров системы из твердой фазы в жидкую практически отсутствует, что характерно для внутренней диффузии в пористое тело, формирующееся из расплава зародыша твердой фазы [1], а также равенство сопряженных коэффициентов $L_2 = L_2$ в системе (3), получим упрощение этой системы до уравнения вида:

$$J_1 = L \cdot X_1, \quad (4)$$

где коэффициент $L = L_1 - L_2 / L_2$.

Если в качестве параметра α системы взять межфазное натяжение на границе раздела фаз σ , то известно, что он связан термодинамическим потенциалом Φ , а именно с изобарно-изотемическим потенциалом G зародыша твердой фазы, формирующегося в расплаве, значит, с учетом соотношений (1), (2) и (4) возможно существование следующего дифференциального уравнения:

$$\partial\sigma/\partial t = \kappa \partial G/\partial\sigma, \quad (5)$$

где $J_1 = \partial\sigma/\partial t$; $L = \hat{\epsilon}$; $X_1 = \partial G/\partial t$.

Следовательно, получено исходное выражение для разработки математической модели кинетики межфазного ПН как при обычной кристаллизации, так и при ВнВ на металл. С этой целью выражение (5) преобразовано с учетом

известного соотношения энергии Гиббса для изотропного зародыша сферической формы в расплаве к виду:

$$\partial\sigma/\partial t = k \partial/\partial t (4\pi\sigma r^2 - 4/3 \pi r^3 L\Delta T/T_0), \quad (6)$$

где: r – радиус зародыша твердой фазы, кристаллизующейся в условиях близких к равновесным, m ; L – удельная теплота кристаллизации, Дж/м³; T_0 и ΔT – температура кристаллизации и переохлаждение расплава металла, K .

Величины, входящие в состав коэффициента (k) подбирали с учетом размерности и физического смысла величин, определяющих моделируемое явление, и в результате получили:

$$[k] = [H^2 / (m^2 \text{ с Дж})] = [H/m] [m^{-3} \text{ с}^{-1}] \\ [(m/c)^3] [m^{-2}] [c^3] \quad (7)$$

Подставляя вместо размерностей соответствующие им величины, получим:

$$k = \sigma \pi c^3 \tau^3 / F, \quad (8)$$

где: F – площадь зародыша твердой фазы, τ – время кристаллизации. Тогда уравнение (6) с учетом (8) примет вид:

$$\partial\sigma/\partial t = (\sigma \pi c^3 \tau^3 / F) \partial/\partial t (4\pi\sigma r^2 - 4/3 \pi r^3 L\Delta T/T_0), \quad (9)$$

определяющий кинетику зависимости ПН от физико-химических свойств расплава и параметров его кристаллизации в условиях, близких к равновесным. Это и есть дифференциальное уравнение, представляющее математическую модель кинетики ПН.

Общее решение данного уравнения проводили с учетом площади зародыша $F = 4\pi r^2$ и пропорции, вытекающей из

определения размера равновесного критического зародыша твердой фазы r_p :

$$L\Delta T/T_0 = 2\sigma/r_p.$$

В итоге получили общее решение уравнения модели:

$$\ln\sigma = [(2/3)(r/r_p) - 1] (\pi c^3 \tau^4 / 4) + \ln C, \quad (10)$$

где C – постоянная интегрирования, найденная из начальных условий: $\tau = 0$; $\sigma = \sigma_p$, тогда $C = \sigma_p$. Здесь σ_p – межфазное ПН при изотермической кристаллизации. Потенцируя (10) с учетом значения постоянной интегрирования, получим функцию $\sigma = \sigma(t)$ в явном виде:

$$\sigma = \sigma_p \exp \left[\left(1 - \frac{r}{r_p}\right) \left(\frac{\pi c^3 \tau^4}{6}\right) \right]. \quad (11)$$

Однако эта зависимость содержит неопределенную величину r – размер зародыша твердой фазы, кристаллизующегося в условиях, близких к равновесным. Этот размер квазиравновесного зародыша, в свою очередь, зависит от ПН на границе раздела фаз.

Если рассматривать кристаллизацию как процесс, проходящий при небольшом удалении от равновесия, то можно предположить, что при квазиравновесии, как и при равновесии, радиус зародыша пропорционален межфазному ПН. С учетом этой пропорции интегрирование (9) при аналогичных начальных условиях дает значение постоянной $C = -0,5$, а решение (11) упрощается к виду:

$$\sigma = 3\sigma_p / [2 + \exp(-\pi c^3 \tau^4 / 4)].$$

Данное выражение позволяет оценить кинетику ПН при неравновес-

ной кристаллизации, если известны параметры n и c , которые могут быть найдены опытным путем для обычной кристаллизации по размеру зерна в отливке [2]. Для начального этапа кристаллизации при $t \rightarrow 0$ последнее выражение после разложения в ряд экспоненты приводится к виду, удобному для анализа:

$$\sigma \approx \sigma_p / [1 - (nc^3 t^4 / 12)].$$

Легко заметить, что для начала кристаллизации $\sigma \approx \sigma_p$, однако затем, если время нарастает в интервале $0 < t < 1,41(nc^3)^{-1/4}$ межфазное ПН увеличивается от σ_p в начале затвердевания до $1,27 \sigma_p$ в конце этого интервала времени. Причем, по данным Г.Ф. Баландина, при времени кристаллизации $t_1 = 1,45(nc^3)^{-1/4}$ затвердевает 99% объема отливки [6]. Экстраполируя это время со временем t , получен результат затвердевания более 96% объема отливки. Следовательно, к окончанию затвердевания практически всего объема металла отливки межфазное поверхностное натяжение возрастет на 27-28% от аналогичной величины для жидкого расплава в начале кристаллизации.

Эмпирические и полуэмпирические зависимости межфазного ПН показывают [10] увеличение его пропорционально: плотности расплава, скорости распространения звука в жидкости и т.п. Указанные величины при переходе металла из жидкого в твердое состояние возрастают, значит, должно увеличиваться и ПН на межфазной границе в процессе затвердевания отливки, что подтверждает разработанная математическая модель.

Оценка уровня возрастания ПН при кристаллизации может быть про-

ведена также с учетом эмпирической зависимости, приведенной в монографии [11], вида:

$$\sigma = k_1 \rho / A,$$

где: ρ - плотность металла, кг/м^3 ; A - атомный вес, кг ; k_1 - эмпирический коэффициент, равный для металлов $7,87 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$. Тогда отношение межфазных ПН металла в начале и в конце кристаллизации можно принять пропорциональным соотношению их плотностей в жидком $\rho_{\text{ж}}$ и твердом $\rho_{\text{т}}$ состояниях:

$$\rho_{\text{т}} / \rho_{\text{ж}} \approx \sigma / \sigma_p.$$

Расчеты этого отношения для железа при значениях плотностей $\rho_{\text{т}} = 7,87 \cdot 10^3$ и $\rho_{\text{ж}} = 7,00 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ [1] дают результат $\sigma / \sigma_p \approx 1,12$. При этом погрешность составляет не более 12%. В одной из последних обзорных статей по изменению межфазного поверхностного натяжения в широком интервале температур приведены данные о его возрастании при кристаллизации на $18 \pm 3\%$ [4].

Погрешность с расчетами по предлагаемой модели составляет 6-10%. Следовательно, сравнение расчетных и опубликованных данных показывает их удовлетворительное совпадение. Это свидетельствует об адекватности описания, в рамках предложенной модели, кинетики межфазного ПН при кристаллизации металлов.

Представляет практический интерес рассмотреть взаимосвязь кинетики межфазного ПН и формирования структуры отливки при выделении твердой фазы из расплава. С этой целью результаты расчетов кинетики межфазного ПН объединены (см. табл.) с данными по увеличению количества затвердевшего объема металла.

Таблица

**Результаты расчетов изменения межфазного поверхностного натяжения
от времени и количества твердой фазы, выделившейся
при кристаллизации металла**

Время в долях величины $\tau = 1,41(nc^3)^{-1/4}$, с										
0	0,1	0,25	0,4	0,5	0,6	0,75	0,8	0,9	1,0	1,03*
Отношение σ/σ_p										
1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,04	1,10	1,13	1,19	1,27	1,28
Отношение объема твердой фазы к объему расплава, %										
0	10	24	38	48	58	72	87	92	96	99

Примечание* при $\tau_1 = 1,45(nc^3)^{-1/4}$ по данным [10].

Анализ табличных данных показал, что значимое увеличение межфазного ПН от 2 до 10 % происходит при выделении от 48 до 72% твердой фазы. Это соответствует, в рамках квазиравновесной модели кинетики ПН при кристаллизации металлов, формированию компактных дендритов и глобулярных форм при затвердевании отливки и границе выливаемости [3]. С этой границей совпадает, или располагается несколько выше по диаграмме состояния, т.е. при $\sigma/\sigma_p = 1,01-1,02$, граница остановки потока жидкого металла в каналах литейной формы (линия нулевой жидкотекучести). При этом выделяется 38-48% твердой фазы.

Наконец, несколько ниже границы выливаемости по диаграмме состояния, располагается линия образования твердого скелета с момента достижения которой начинает возникать линейная усадка отливки [3; 5]. Это момент соответствует увеличению межфазного ПН от 10 до 19% и выделению твердой фазы от 72 до 92%. Следовательно, изучая кинетику межфазного ПН, возможно получить важные сведения по формированию структурных зон затвердевающей отливки и литейным свойствам металлов.

Известно, что для большинства сплавов характерно отрицательное смачивание жидким металлом границы раздела фаз, т.к. краевой угол смачивания θ превышает прямой, тогда $\cos\theta < 0$. Это свидетельствует о сравнительно прочной связи атомов в самом металле и более слабом притяжении их на границе раздела фаз и в жидком металле [7]. Если обозначить адгезию фаз

$$W_a = \sigma_t + \sigma_{ж} - \sigma_{тж},$$

где: σ_t , $\sigma_{ж}$, $\sigma_{тж}$ – поверхностное натяжение металла в твердом, жидком состоянии и на границе раздела этих фаз соответственно, а когезию жидкости

$$W_k = 2\sigma_{ж},$$

то из известного соотношения $\cos\theta = (\sigma_t - \sigma_{тж})/\sigma_{ж} = 2(W_a/W_k) - 1$ вытекает, что отрицательное смачивание имеет место при $2W_a < W_k$.

Следовательно, повышение межфазного натяжения на границе раздела фаз $\sigma_{тж}$ при затвердевании приводит к увеличению краевого угла смачивания θ и уменьшению сил адгезии фаз. В результате этих явлений понижается прочность формирующейся из расплава твердой фазы, происходит ухудшение смачиваемости узких капилляров и пор формовочных материалов, что

отрицательно отражается на заполняемости литейных форм, снижая показатели выхода годного литья. Мероприятия по уменьшению межфазного ПН с помощью ВнВ рассмотрены во втором сообщении.

На основе метода неравновесной термодинамики разработана математическая модель кинетики межфазного ПН при кристаллизации металлов. Расчеты по модели показали увеличение данного параметра в конце затвер-

девания на 27-28% по сравнению с его значением в начале кристаллизации, что удовлетворительно согласуется с известными данными и указывает на достоверность полученной модели.

Установлена связь кинетики межфазного ПН и объемов твердой фазы, выделяющихся из кристаллизующегося расплава. Она показала, что изменения ПН связаны с формированием структурных зон затвердевающей отливки и ее литейными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин Ю.А., Гладков М.И. Влияние внешнего воздействия на кинетику кристаллизации металлов // Электromеталлургия. 2007. №3. С. 6–12.
2. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. М: Машиностроение, 1965. 255 с.
3. Воздвиженский В.М, Грачёв В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технологии их плавки в машиностроении: учебное пособие. М.: Машиностроение, 1984. 423 с.
4. Ефимов В.Е. Влияние температуры и содержания кислорода на поверхностную энергию и натяжение твердых и жидких металлов // Известия РАН. Металлы. 2000. № 5. С. 33–43.
5. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 272 с.
6. Математическое моделирование влияния вибрации на рафинирование расплавов металлов / Ю.А. Балакин и др. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2015. № 4. С. 51–58.
7. Попель С.И., Царевский Б.В., Джемилев Н.К. Поверхностное натяжение сплавов на основе железа // Литейные свойства сплавов: труды первого совещания по литейным свойствам сплавов. Ч. 1. Киев: Наукова думка, 1968. С. 113-122.
8. Попова Л.Е. Кинетика кристаллизации сплавов: курс лекций. Свердловск: УПИ, 1976. 40 с.
9. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: Иностранная литература, 1960. 127 с.
10. Применение ультразвука в промышленности / Под ред. А.И. Маркова. М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
11. Рабинович Б.В. Введение в литейную гидравлику. М.: Машиностроение, 1966. 423 с.

REFERENCES

1. Balakin Yu.A., Gladkov M.I. Vliyaniye vneshnego vozdeistviya na kinetiku kristallizatsii metallov [The impact of external influence on the kinetics of crystallization of metals] // Elektrometallurgiya. 2007. no. 3. Pp. 6–12.
2. Balandin G.F. Formirovaniye kristallicheskogo stroeniya otlivok [The formation of crystalline structure of castings]. M., Mashinostroeniye, 1965. 255 p.
3. Vozdvizhenskii V.M, Grachev V.A., Spasskii V.V. Liteinye splavy i tekhnologii ikh plavki v mashinostroenii: uchebnoye posobie [Casting alloys and their melting technology in mechanical engineering: textbook]. M., Mashinostroeniye, 1984. 423 p.

4. Efimov V.E. Vliyanie temperatury i sodержaniya kisloroda na poverkhnostnuyu energiyu i natyazhenie tverdykh i zhidkikh metallov [The effect of temperature and oxygen content on the surface energy and tension of solids and liquid metals] // *Izv. Ross. Akad. Nauk. Seriya Metally*. 2000. no. 5. Pp. 33–43.
5. Efimov V.A., El'darkhanov A.S. Fizicheskie metody vozdeistviya na protsessy zatverdevaniya splavov [Physical methods of influence on the processes of solidification of alloys]. M., Mashinostroenie, 1998. 272 p.
6. Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya vibratsii na rafinirovanie rasplavov metallov [Mathematical modeling of vibration effects on the refining of metal melts] // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2015. no. 4. Pp. 51–58.
7. Popel' S.I., Tsarevskii B.V., Dzhemilev N.K. Poverkhnostnoe natyazhenie splavov na osnove zheleza [The surface tension of alloys based on iron] *Liteinye svoystva splavov: trudy pervogo soveshchaniya po liteinym svoystvam splavov. Ch. 1* [Casting properties of alloys: proceedings of the first meeting on casting properties of alloys. Part 1]. Kiev, Naukova dumka, 1968. Pp. 113–122.
8. Popova L.E. Kinetika kristallizatsii splavov: kurs lektsii [The crystallization kinetics of alloys: lectures]. Sverdlovsk, UPI, 1976. 40 p.
9. Prigogine I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. New York, Interscience, 1961. 147 p.
10. Primenenie ul'trazvuka v promyshlennosti [Application of ultrasound in industry / ed. by A.I. Markov]. M., Mashinostroenie, 1975. 240 p.
11. Rabinovich B.V. Vvedenie v liteinuyu gidravliku [Introduction into casting hydraulics]. M., Mashinostroenie, 1966. 423 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Балакин Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники, проектирования машин и автоматов Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского;
e-mail: ur.balakin@mail.ru

Юнусов Худайназар Бекназарович – кандидат химических наук, доцент, декан биолого-химического факультета Московского государственного областного университета;
e-mail: hb.yunusov@mgou.ru

Будник Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры управления качеством инновационных производств Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского;
e-mail: boss.budnik@mail.ru

Соколов Игорь Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством инновационных производств Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского;
e-mail: i.volokos@mail.ru

Хаулин Алексей Николаевич – кандидат педагогических наук, декан факультета технологии и предпринимательства Московского государственного областного университета;
e-mail: an.haylin@mgou.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Balakin Yuri. A. – candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor of the Chair of Electrical Engineering and Machine Design at the K.G. Razumovskiy Moscow State University of Technologies and Management;
e-mail: ur.balakin@mail.ru;

Yunusov Khudainazar B. – candidate of chemical sciences, associate professor, dean of the Department of Biology and Chemistry at the Moscow State Regional University;
e-mail: hb.yunusov@mgou.ru;

Budnik Aleksandr A. – candidate of technical sciences, assistant professor of the Chair of Quality Management of Innovative Productions at the K.G. Razumovskiy Moscow State University of Technologies and Management;
e-mail: e-mail: boss.budnik@mail.ru;

Sokolov Igor V. – candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor of the Chair of Quality Management of Innovative Productions at the K.G. Razumovskiy Moscow State University of Technologies and Management;
e-mail: e-mail i.volokos@mail.ru;

Khaulin Alexei N. – candidate of pedagogical sciences, dean of the Department of Technology and Business at the Moscow State Regional University;
e-mail: an.haylin@mgou.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Балакин Ю.А., Юнусов Х.Б., Будник А.А., Соколов И.В., Хаулин А.Н. Влияние внешнего воздействия на межфазное взаимодействие при кристаллизации металлов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 2. С. 78-86.

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-2-78-86

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

Yu. Balakin, Kh. Yunusov, A. Budnik, I. Sokolov, A. Khaulin. Impact of external influence on interfacial interaction during crystallization of metals // Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural sciences. 2016. no 2. pp. 78-86.

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-2-78-86