

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-4-10

Математическая модель пропитки расплавом металлических порошков с использованием вибрационного воздействия

© 2017 г. И.Э. Игнатьев, Э.А. Пастухов, О.В. Романова

Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 18.12.15 г., доработана 27.09.16 г., подписана в печать 10.10.16 г.

В виде математических зависимостей представлена модель процесса пропитки расплавом металлических порошков под воздействием низкочастотной вибрации. Рассмотрено влияние на степень пропитки таких факторов, как дисперсность порошка, его смачивание расплавом, вязкость расплава, условия и параметры вибрационного воздействия. Результаты моделирования подкрепляются экспериментальными данными, полученными с использованием виброобработки и без нее. Выработаны рекомендации по подбору амплитудно-частотных параметров.

Ключевые слова: расплав, порошковый массив, пропитка, низкочастотное воздействие.

Игнатьев И.Э. – докт. техн. наук, ст. науч. сотр. Института металлургии (ИМЕТ) УрО РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). Тел.: (343) 232-90-14. E-mail: igx2@mail.ru.

Пастухов Э.А. – докт. хим. наук, чл.-кор. РАН, гл. науч. сотр. ИМЕТ УрО РАН. Тел.: (343) 267-89-51. E-mail: past@imet.mplik.ru.

Романова О.В. – аспирант ИМЕТ УрО РАН. Тел.: (343) 232-90-49. E-mail: pridlize@mail.ru.

Для цитирования: Игнатьев И.Э., Пастухов Э.А., Романова О.В. Математическая модель пропитки расплавом металлических порошков с использованием вибрационного воздействия // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 1. С. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-4-10.

Ignat'ev I.E., Pastukhov E.A., Romanova O.V.

Mathematical model of metal powder melt impregnation with application of vibration treatment

The paper presents a model of metal powder melt impregnation under low-frequency vibration in the form of mathematical dependencies. The effect of such factors as powder size, powder wetting with a melt, melt viscosity, conditions and parameters of vibration treatment on the impregnation degree is considered. The simulation results are supported by the experimental data obtained with the use of a vibration treatment and without it. The paper formulates recommendations on the selection of amplitude-frequency parameters.

Keywords: melt, powder mass, impregnation, low-frequency treatment.

Ignat'ev I.E. – Dr. Sci. (Tech.), senior researcher of the Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Science (IMET UB RAS) (620016, Russia, Ekaterinburg, Amundsen str., 101). E-mail: igx2@mail.ru.

Pastukhov E.A. – Dr. Sci. (Chem.), corresponding member of RAS, chief researcher, adviser of IMET UB RAS. E-mail: past@imet.mplik.ru.

Romanova O.V. – postgraduate student of IMET UB RAS. E-mail: pridlize@mail.ru.

Citation: Ignat'ev I.E., Pastukhov E.A., Romanova O.V. Matematicheskaya model' propitki rasplavom metallicheskih poroshkov s ispol'zovaniem vibratsionnogo vozdeistviya. Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya. 2017. No. 1. P. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-4-10.

Введение

Пропитка порошка расплавом — один из способов создания композиционного материала. Качество получаемого композита в значительной степени определяется степенью заполнения пор порошкового массива и смачиванием его частиц расплавом. Факторами, препятствующими выполнению этих условий, могут являться изначально

но тупой угол смачивания (слишком длительный период перехода несмачивания в смачивание), малый размер порошковых частиц, повышенная вязкость расплава и т.п. [1]. На вязкость расплава и угол смачивания можно повлиять, например, повышением температуры расплава, однако такой способ не всегда технологичен [2], поэтому зача-

стую процесс пропитки сопровождают постоянным давлением или вибрационным воздействием на расплав [3–5].

Сопровождение пропитки вибрацией вызывает необходимость определять ее амплитуду и частоту, с тем чтобы выполнить условия беспористости и достижения смачивания. Следовательно, требуется математическая модель, учитывающая основные факторы, влияющие на результат пропитки. В недавних статьях, например [6–17], вопрос математического моделирования подобных процессов затронут, что говорит о его актуальности. Представленная в данной работе модель разработана для объяснения полученных нами ранее экспериментальных результатов.

Основная часть

Пропитка порошкового массива расплавом без вибрационного воздействия

Рассмотрим просачивание расплава под действием своей силы тяжести сквозь порошковый массив. Пусть порошок в тигле (форме) с площадью поперечного сечения S занимает объем, равный hS . Примем, что частицы порошка имеют сферическую форму и диаметр d . Тогда металлообъем порошкового массива составляет $hS\theta = N\pi d^3/6$, где θ — относительная плотность, N — количество частиц.

Над порошковым массивом в начальный момент времени $t = 0$ находится расплав массой $m = \rho SH$, где ρ — его плотность, H — толщина слоя. Поверхность расплава в начальный момент имеет координату $y = 0$ по вертикальной оси, направленной вниз. В процессе пропитки уровень расплава будет понижаться на величину y , погружая объем yS в равный ему объем пор порошкового массива $\bar{h}S(1 - \theta) = yS$, и глубина пропитки составит $\bar{h} = y/(1 - \theta)$. Продифференцировав последнее уравнение по времени, находим, что скорость движения расплава по порам относительно частиц массива равна $v = \dot{y}/(1 - \theta)$, где \dot{y} — скорость изменения координаты поверхности расплава.

Число частиц в слое площадью S и толщиной d равно $n_d = Nd/h = 6S\theta/(\pi d^2)$. Отсюда найдем длину контура пор (контура смачивания) в сечении S как $l = \pi dn_d = 6S\theta/d$, а также силу от поверхностного натяжения на границе «порошок—расплав—газ», способствующую или препятствующую пропитке в зависимости от величины угла смачивания ϑ : $F = \sigma l \cos \vartheta = 6S\theta \sigma \cos \vartheta/d$. Площадь поверхности труп-

бок тока (заполненных расплавом пор порошкового массива или капилляров) можно примерно оценить как

$$S_n = l\bar{h} = \frac{6S\theta}{d(1-\theta)} y.$$

Усредненный радиус капилляра, согласно работе [18], при относительной плотности порошкового массива $\theta = 0,6$ равен $r = 0,38d$. Отсюда касательное напряжение на стенке капилляра составляет

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial r} \cong \frac{\eta v}{0,38d} = 2,63 \frac{\eta \dot{y}}{d(1-\theta)},$$

где η — динамическая вязкость, а сила вязкого сопротивления равна

$$F_1 = \tau S_n = 15,6 \frac{S\theta\eta}{d^2(1-\theta)^2} y\dot{y}.$$

Уравнение движения расплава под воздействием силы тяжести относительно ординаты $y = 0$ запишется как

$$m\ddot{y} = mg + F - F_1, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, или

$$\ddot{y} = g + \frac{6\theta\sigma\cos\vartheta}{\rho Hd} - 15,6 \frac{\theta\eta}{\rho Hd^2(1-\theta)^2} y\dot{y}. \quad (2)$$

Начальные условия составляют $t = \dot{y} = y = 0$.

В случае несмачивания второе слагаемое правой части уравнения (2) будет отрицательным, и если оно по модулю больше g , то, очевидно, никакой пропитки не произойдет. Например, по этой причине даже в условиях вибрационного воздействия на жидкий сплав Вуда (плотность $\rho = 9720 \text{ кг/м}^3$; состав, %: 50Bi—25Pb—12,5Sn—12,5Cd) при температуре 90—140 °C не удалось хоть сколько-нибудь пропитать им находящийся на дне тигля алюминиевый порошковый массив (плотность 2700 кг/м³) с частицами дисперсностью 20—50 мкм: не всплыла ни одна алюминиевая частица, несмотря на почти 4-кратную разность в плотностях.

Допустим теперь, что сумма первых двух слагаемых правой части уравнения (2) положительна. Интегрируя обе части этого уравнения, с учетом начальных условий получим

$$\dot{y} = \left(g + \frac{6\theta\sigma\cos\vartheta}{\rho Hd} \right) t - \frac{15,6\theta\eta}{\rho Hd^2(1-\theta)^2} y^2. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что положительная величина указанной суммы не гарантирует обя-

зательной пропитки порошкового массива, поскольку течению расплава препятствует вязкое сопротивление. Линейный рост скорости по времени движения расплава по капиллярам (первое слагаемое правой части) тормозится возрастанием сопротивления этому продвижению (второе слагаемое) пропорционально квадрату глубины пропитки (y^2) вследствие увеличения поверхности трения о стенки капилляров и обратно пропорционально квадрату диаметра порошковых частиц (d^2). Чем мельче частицы, тем уже капилляры, и влияние размера частиц на качество пропитки может оказаться очень существенным. Например, в экспериментах по пропитке порошков вольфрама расплавом меди при температуре 1300 °С, несмотря на удовлетворительное ($\theta \approx 80^\circ$) смачивание, насыпной слой из субмикронных W-частиц практически не пропитывался жидкой медью, а из микронных — пропитывался полностью, хотя в сплаве при этом имелись рыхлоты.

Дальнейшее интегрирование уравнения (3) вызывает сложности, поэтому введем упрощение: зафиксируем в третьем слагаемом его правой части конечную глубину проникновения расплава в порошок ($y = \bar{y}$) и усредним при интегрировании ее значение за время пропитки ($z = \bar{y}/2 = \text{const} \leq h/2$). Тогда, с учетом начальных условий, получим следующее решение:

$$y = \left(g + \frac{6\theta\sigma\cos\theta}{\rho Hd} \right) t + \frac{g\rho Hd + 6\theta\sigma\cos\theta}{15,6\eta z} \times \\ \times d(1-\theta)^2 \left[\exp\left(-\frac{15,6\theta\eta z}{\rho Hd^2(1-\theta)^2} t \right) - 1 \right], \quad (4)$$

$$\dot{y} = \left(g + \frac{6\theta\sigma\cos\theta}{\rho Hd} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{15,6\theta\eta z}{\rho Hd^2(1-\theta)^2} t \right) \right]. \quad (5)$$

Из уравнения (4) длительность пропитки порошкового массива на глубину $y = 2z = h$ определится численно как $\bar{t} = t(h)$. Следует заметить, что на всем временном интервале $0 < t \leq \bar{t}$ вычисляемое по уравнению (5) значение \dot{y} оказывается исключительно положительным. Это отчасти противоречит следствию из уравнения (3) о возможности застопоривания процесса пропитки на каком-то этапе (случай $\bar{y} < h$) и является результатом введения параметра z . Уравнение (5) позволяет количественно определить скорость пропитки на глубину y , но качественную картину влияющих на эту скорость факторов лучше представляет уравнение (3).

Если в уравнениях (3)—(5) заменить константу

g на $\bar{g} = g + \bar{p}/(\rho h)$, то получим скорость и глубину пропитки при воздействии внешнего дополнительного давления \bar{p} , которое приводит к увеличению значений y и \dot{y} или к сокращению длительности пропитки всего объема порошка. Создание сколь необходимо большого давления на расплав (например, поршнем) снимало бы проблему пропитки, если бы не один неучтенный нами фактор — упругое сопротивление продвижению фронта расплава газом, оставшимся в порах порошкового массива. Если допустить, что газ — ассоциация пузырьков, каждый из которых размером с пору, то такой пузырек не только опирается на стенки поры, но и связан с ними силами Ван-дер-Ваальса. Для всплытия на поверхность под действием архимедовой силы газовый пузырек должен быть погружен в расплав, но, чтобы обеспечить такое погружение, струйка расплава должна оттеснить его от стенок поры или «разрезать», преодолев межфазное натяжение. С мелким пузырьком такие процедуры осуществить труднее, чем с крупным, ввиду меньшего радиуса и, следовательно, большего избыточного давления Паскаля (т.е. большей упругости, большего сопротивления изменению формы), более прочной связи со стенками поры (большого сокращения поверхностной энергии на контактных площадках). Именно присутствием мелких пузырьков объясняются рыхлоты в сплаве, получаемом при пропитке медью вольфрамового порошка с размером частиц >1 мкм, и невозможность пропитки субмикронного порошка. Осуществлять более полную дегазацию материала при пропитке позволяет включение в этот процесс вибрационного воздействия на расплав.

Пропитка порошкового массива с вибрационным воздействием на расплав

Вибрационное воздействие на расплав можно производить различными способами, например колебаниями тигля с расплавом или колебаниями поршня со стороны поверхности расплава при неподвижном тигле. Рассмотрим последний из них. При поршневом вибрационном воздействии на жидкую среду усилие этого воздействия в значительной степени определяется не только частотой и амплитудой колебаний поршня, но и геометрическими размерами зазора между боковыми стенками поршня и тигля [19]. В зависимости от ширины и высоты зазора передаваемый в жидкость гармонический сигнал трансформируется в сумму синусоидальной составляющей $p\sin(\omega t)$ и неко-

торой константы p_0 . Подставляя эти параметры в уравнение (2) и упрощая его так же, как при выводе выражения (4), получим уравнение движения расплава под действием вибрации:

$$\ddot{y} = g + \frac{6\theta\sigma\cos\vartheta}{\rho Hd} - 15,6 \frac{\theta\eta}{\rho Hd^2(1-\theta)^2} \frac{h}{2} \dot{y} + p_0 - p\sin(\omega t) = K - q\dot{y} - p\sin(\omega t), \quad (6)$$

$$\text{где } K = g + \frac{6\theta\sigma\cos\vartheta}{\rho Hd} + p_0, \quad q = 15,6 \frac{\theta\eta}{\rho Hd^2(1-\theta)^2} \frac{h}{2}.$$

Решение (6) с учетом начальных условий $y(t=0) = \dot{y}(t=0) = 0$ примет вид

$$y = \frac{P}{\omega^2 + q^2} \times \left\{ \sin(\omega t) + \frac{q}{\omega} [\cos(\omega t) - 1] + \frac{\omega}{q} [\exp(-qt) - 1] \right\} + \frac{K}{q^2} [\exp(-qt) - 1] + \frac{Kt}{q}, \quad (7)$$

$$\dot{y} = \frac{p\omega}{\omega^2 + q^2} \left[\cos(\omega t) - \frac{q}{\omega} \sin(\omega t) - \exp(-qt) \right] + \frac{K}{q} [1 - \exp(-qt)]. \quad (8)$$

Это решение ввиду принятых допущений (среднее значение u в течение пропитки равно $h/2$) носит приближенный характер, однако удобно для анализа. Длительность (t) полной пропитки порошка определяется численно из уравнения (7) при $y = h$. В уравнениях (7) и (8) значение коэффициента K тем больше, чем больше внешнее давление на расплав (его составляющая входит в p_0) и меньше угол смачивания ϑ . Коэффициент q , как отражающий влияние сил сопротивления пропитке, пропорционален вязкости расплава и обратно пропорционален размеру порошковых частиц d . Экспонента $\exp(-qt)$ изменяется от 1 (при $t = 0$) до 0 (при $t = \infty$).

Значение скорости пропитки (см. уравнение (8)) определяется соотношением K/q (чем выше значение вязкости и мельче порошок, тем больше скорость), а слагаемые с гармоническими составляющими дают осцилляционную добавку, описывая при этом колебания нижней границы расплава внутри порошкового массива. Практически осцилляция расплава, выраженная в уравнении (7) в виде $\frac{P}{\omega^2 + q^2} \left[\sin(\omega t) + \frac{q}{\omega} \cos(\omega t) - 1 \right]$, а в уравнении (8) как $\frac{p\omega}{\omega^2 + q^2} \left[\cos(\omega t) - \frac{q}{\omega} \sin(\omega t) - \exp(-qt) \right]$, бародинамически воздействует и на частицы по-

рошка, и на газовые пузырьки, чем вызывает их смещения друг относительно друга и приводит к дегазации пор. Так, металлографические исследования показали, что в экспериментах с применением низкочастотных колебаний порошки вольфрама как микронных, так и субмикронных размеров полностью смачиваются расплавленной медью, а сплавы получаются беспористые.

Таким образом, уравнения (7) и (8) удовлетворительно представляют процесс заполнения расплавом межчастичного пространства порошковой массы с использованием вибрационного воздействия на расплав. Однако следует заметить, что в течение пропитки значение угла смачивания может измениться и повлиять на результат расчета. Известно, что существует инкубационный период наступления смачивания, т.е. зависимость смачивания от температуры и длительности обработки [20]. Также установлено, что вибрационная обработка только увеличивает эту зависимость. Например, в работе [21] дан расчет текущего значения угла смачивания порошка SiC жидким алюминием в инкубационный период как функции времени и температуры, а в работе [22] представлено изменение $\cos\vartheta$ при замешивании медного порошка в жидкий галлий под влиянием амплитудно-частотных параметров и количества колебательных циклов. Ввиду функциональной, в обоих случаях, зависимости от времени подстановка подобных формул в уравнение (6) привела бы к громоздкости вычислений и невозможности анализа результата. Поэтому использование в этом уравнении какого-то усредненного значения $\cos\vartheta$ представляется предпочтительным.

Подбор амплитудно-частотных параметров

Одна, если не главная, из задач оптимизации обработки материалов — сокращение длительности этой обработки. В нашем случае ее можно ограничить инкубационным периодом смачивания и скоростью протекания необходимых химических реакций (например, образования интерметаллидов) и подобрать такие амплитудно-частотные характеристики, которые, согласно уравнению (8), обеспечивали бы нужную скорость пропитки.

Зафиксировав в уравнении (7) выбранное время полной пропитки, получим параметр p как функцию от ω и p_0 (входит слагаемым в K). С другой стороны, $p = P/(\rho H)$, где P — модуль давления на расплав, создаваемого колебаниями поршня. При малых значениях амплитуды (A) колебаний порш-

ня параметр $P = c\rho A\omega$ — модуль звукового давления (c — скорость звука в расплаве), а параметр p_0 можно считать равным нулю ввиду пренебрежимо малого массопереноса расплава в зазор между боковыми стенками поршня и тигля. Тогда, приравняв значение p из уравнения (7) величине

$$P = cA\omega/H, \quad (9)$$

получим модуль скорости колебаний поршня $A\omega$.

Поскольку циклическая частота ω подбирается исходя из имеющегося вибрационного оборудования, то значение амплитуды A определяется однозначно. Если амплитуда не мала, что обычно бывает при низкочастотной обработке, то массопереносом расплава в указанный выше зазор пренебречь нельзя, модуль p по величине меньше значения, получаемого из уравнения (9), и создаваемое давление уже не считается звуковым [21]. Так, при амплитуде в 1,0–1,5 мм и частоте 50–100 Гц модуль давления в 4–5 раз меньше рассчитанного по формуле (9). Параметр p_0 , характеризующий постоянное смещение нулевой линии синусоиды $p \sin(\omega t)$ на постоянную величину, становится значимым только при малой ширине зазора, и тем он больше, чем больше высота зазора [22]. Поэтому при низкочастотной обработке важно из уравнения (7) получить порядок величины p , а затем, учитывая вышесказанное, подставить уже скорректированное значение в решение (7)–(8) и снова подсчитать $\bar{t} = t(h)$. Отклонение полученного \bar{t} от исходно назначенного составит не более 1–2 мин, что является вполне удовлетворительным результатом.

Заключение

Таким образом, опираясь на экспериментальные данные, построена математическая модель пропитки расплавом металлических порошков с использованием вибрационного воздействия. Эта модель описывает продвижение расплава в глубь порошка и позволяет определить как амплитудно-частотные параметры виброобработки, обеспечивающие пропитку всего порошкового массива, так и ее необходимую продолжительность.

Литература

1. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия, 1991.
2. Алымов М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. М.: Наука, 2007.
3. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004.
4. Eskin G.I., Eskin D.G. Ultrasonic treatment of light alloy melts. CRC Press, 2014.
5. Pan Y., Yi X.S. Infiltration Ni[3]Al melt into TiC powder perform // 101st Annual Meeting and Exposition «Setting the pace for the next century» (Indianapolis, Indiana, 25–28 Apr. 1999). Westerville, Ohio, 1999. P. 358.
6. Балан С.А., Ульянов В.А., Шигин В.Е. Виброимпульсное воздействие на расплавы чугунов // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2015. No. 3 (110). С. 243–246.
7. Бондарева О.С., Мельников А.А. Влияние температуры цинкового расплава на толщину и структуру покрытия при высокотемпературном горячем цинковании сталей с высоким содержанием кремния // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2015. No. 1. С. 66–70.
8. Оглезнева С.А., Порталов М.Н. Исследование кинетики изотермического спекания измельченных и механически легированных порошков железа // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2014. No. 1. С. 9–16.
9. Кушхов Х.Б., Виндижева М.К., Мукожева Р.А., Калибатова М.Н. Электрохимический синтез дисперсных порошков боридных фаз лантана из галогенидных расплавов // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2014. No. 2. С. 11–16.
10. Панов В.С., Зайцев А.А. Тенденции развития технологии ультрадисперсных и наноразмерных твердых сплавов WC—Co // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2014. No. 3. С. 38–48.
11. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Власов А.В. Прогнозирование механических свойств пористых неоднородных сред // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2014. No. 3. С. 55–60.
12. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Роль порошковых прекурсоров при получении композиционных сплавов жидкофазными методами // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 2. С. 47–58.
13. Разинская О.И., Алибеков С.Я., Фоминых В.В. Воздействие ультразвуковых волн на процесс инфильтрации дисперсных частиц в поры порошкового материала // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 1. С. 67–71.
14. Wu Shusen, Liu Longfei, Ma Qianqian, Mao Youwu, An Ping. Degassing effect of ultrasonic vibration in molten melt and semi-solid slurry of Al—Si alloys // China Foundry. 2012. Vol. 9. No. 3. P. 201–206.

15. Zhong G., Wu S., Jiang H., An P. Effects of ultrasonic vibration on the iron-containing intermetallic compounds of high silicon aluminum alloy with 2% Fe // *J. Alloys Compd.* 2010. Vol. 492. Iss. 1—2. P. 482—487.
16. Hong-min Guo, Ai-sheng Zhang, Xiang-jie Yang, Ming-ming Yan. Grain refinement of Al–5%Cu aluminum alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe // *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2014. Vol. 24. Iss. 8. P. 2489—2496.
17. Pîrvulescu C.M., Bratu C. Mechanic vibrations generation system and effect on the casting alloys solidification process // *UPB. Sci. Bull. Ser. B.* 2010. Vol. 72. Iss. 3. P. 219—232.
18. Игнатъев И.Э., Пастухов Э.А., Бодрова Л.Е., Игнатъева Е.В., Гойда Э.Ю. Особенности метода низкочастотной обработки расплавов // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2013. No. 2. С. 33—38.
19. Игнатъев И.Э., Пастухов Э.А., Игнатъева Е.В., Долматов А.В. Эффективность низкочастотной обработки расплава при наличии в нем агломерированных порошковых добавок // *Расплавы.* 2011. No. 2. С. 3—9.
20. Игнатъев И.Э., Шубин А.Б. К вопросу о вибрационных параметрах, обеспечивающих получение медно-галлиевой пасты // *Тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, ИМЕТ УрО РАН, 3—5 июня 2015 г.). Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. С. 359—361.*
21. Игнатъев И.Э., Пастухов Э.А., Игнатъева Е.В. Принципиальное различие методов низкочастотного и ультразвукового воздействия на расплавы // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2014. No. 5. С. 7—11.
22. Игнатъев И.Э., Пастухов Э.А., Игнатъева Е.В. К вопросу об «упругости» волн при вибрационном воздействии на расплав // *Расплавы.* 2015. No. 2. С. 3—6.
- the pace for the next century» (Indianapolis, Indiana, 25—28 Apr. 1999). Westerville, Ohio, 1999. P. 358.
6. Balan S.A., Ul'yanov V.A., Shigin V.E. Vibroimpul'snoe vozdeistvie na rasplavy chugunov [Vibro-pulsed effect on the molten iron]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva.* 2015. No. 3 (110). P. 243—246.
7. Bondareva O.S., Mel'nikov A.A. Vliyanie temperatury tsinkovogo raspava na tolshchinu i strukturu pokrytiya pri vysokotemperaturnom goryachem tsinkovanii stalei s vysokim soderzhaniem kremniya [Influence of temperature of zinc fusion on thickness and structure of a covering at high-temperature hot galvanizing staly with the high content of silicon]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2015. No. 1. P. 66—70.
8. Oglezneva S.A., Portalov M.N. Issledovanie kinetiki izotermicheskogo spekaniya izmel'chennykh i mekhanicheskii legirovannykh poroshkov zheleza [Research of kinetics of isothermal agglomeration of the crushed and mechanically alloyed iron powders]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 1. P. 9—16.
9. Kushkhov Kh.B., Vindizheva M.K., Mukozheva R.A., Kalibatova M.N. Elektrokhimicheskii sintez dispersnykh poroshkov boridnykh faz lantana iz galogenidnykh rasplavov [Electrochemical synthesis of disperse powders the boridnykh of phases of lanthanum from the galogenidnykh of fusions]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 2. P. 11—16.
10. Panov V.S., Zaitsev A.A. Tendentsii razvitiya tekhnologii ul'tradispersnykh i nanorazmernykh tverdykh splavov WC—Co [Tendencies of development of technology of ultradisperse and nanodimensional solid WC—Co alloys]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 3. P. 38—48.
11. Shestakov N.A., Subich V.N., Vlasov A.V. Prognozirovaniye mekhanicheskikh svoystv poristyykh neodnorodnykh sred [Forecasting of mechanical properties of porous non-uniform environments]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 3. P. 55—60.
12. Prusov E.S., Panfilov A.A., Kechin V.A. Rol' poroshkovykh prekursirov pri poluchenii kompozitsionnykh splavov zhidkofaznymi metodami [Role of powder precursors when receiving composite alloys by liquid-phase methods]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2016. No. 2. P. 47—58.
13. Razinskaya O.I., Alibekov S.Ya., Fominykh V.V. Vozdeistvie ul'trazvukovykh voln na protsess infiltratsii dispersnykh chastits v pory poroshkovogo materiala [Impact of ultrasonic waves on process of an infiltration of disperse parti-

References

1. Andrievsky R.A. Poroshkovoe materialovedenie [Powder materials science]. Moscow: Metallurgiya, 1991.
2. Alymov M.I. Poroshkovaya metallurgiya nanokristallicheskikh materialov [Powder metallurgy of nanocrystal materials]. Moscow: Nauka, 2007.
3. Efimov V.A., El'darkhanov A.S. Tekhnologii sovremennoi metallurgii [Technology modern metallurgy]. Moscow: Novye tekhnologii, 2004.
4. Eskin G.I., Eskin D.G. Ultrasonic treatment of light alloy melts. CRC Press, 2014.
5. Pan Y., Yi X.S. Infiltration Ni[3]Al melt into TiC powder perform. In: *101st Annual Meeting and Exposition «Setting*

- cles during a time of powder material]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2016. No. 1. P. 67—71.
14. Wu Shusen, Liu Longfei, Ma Qianqian, Mao Youwu, An Ping. Degassing effect of ultrasonic vibration in molten melt and semi-solid slurry of Al—Si alloys. *China Foundry*. 2012. Vol. 9. No. 3. P. 201—206.
15. Zhong G, Wu S, Jiang H, An P. Effects of ultrasonic vibration on the iron-containing intermetallic compounds of high silicon aluminum alloy with 2% Fe. *J. Alloys Compd*. 2010. Vol. 492. Iss. 1—2. P. 482—487.
16. Hong-min Guo, Ai-sheng Zhang, Xiang-jie Yang, Ming-ming Yan. Grain refinement of Al—5%Cu aluminum alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*. 2014. Vol. 24. Iss. 8. P. 2489—2496.
17. Pîrvulescu C.M., Bratu C. Mechanic vibrations generation system and effect on the casting alloys solidification process. *UPB. Sci. Bull. Ser. B*. 2010. Vol. 72. Iss. 3. P. 219—232.
18. Ignat'ev I.E., Pastukhov E.A., Bodrova L.E., Ignat'eva E.V., Goida E.Yu. Osobennosti metoda nizkochastotnoi obrabotki rasplavov [Specific properties of low-frequency treatment of melts]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2013. No. 2. P. 33—38.
19. Ignat'ev I.E., Pastukhov E.A., Ignat'eva E.V., Dolmatov A.V. Effektivnost' nizkochastotnoi obrabotki rasplava pri nalichii v nem aglomerirovannykh poroshkovykh dobavok [Efficiency of low-frequency processing of fusion in the presence in it the agglomerated powder additives]. *Rasplavy*. 2011. No. 2. P. 3—9.
20. Ignat'ev I.E., Shubin A.B. K voprosu o vibratsionnykh parametrah, obespechivayushchikh poluchenie medno-galliyevoy pasty [To a question of the vibration parameters providing copper-gallium paste]. In: *Trudy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniyem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR»* [Works of scientific and practical conference with the international participation «Prospects of development of metallurgy and mechanical engineering with use of complete basic researches and research and development»] (Ekaterinburg, 3—5 June 2015). Ekaterinburg: Ural'skii rabochii, 2015. P. 359—361.
21. Ignat'ev I.E., Pastukhov E.A., Ignat'eva E.V. Printsipi-al'noe razlichie metodov nizkochastotnogo i ul'trazvukovogo vozdeistviya na rasplavy [Fundamental difference of methods of low frequency and ultrasonic impacts on melts]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2014. No. 5. P. 7—11.
22. Ignat'ev I.E., Pastukhov E.A., Ignat'eva E.V. K voprosu ob «uprugosti» voln pri vibratsionnom vozdeistvii na rasplav [Revisiting the waves «flexibility» at vibrational influence on the melt]. *Rasplavy*. 2015. No. 2. P. 3—6.