



Список литературы

1. Кириевский Б. А., Христенко В. В., Перелома Е. В. Уточнение параметров области несмешиваемости в жидком состоянии диаграммы Cu-Cr // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – № 5. – С. 7-15.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т. / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996.
3. Григорович В. К. Влияние электронного строения легирующих элементов на образование металлических растворов // Теоретические и экспериментальные методы исследования диаграмм состояния металлических систем. – М.: Наука, 1969. – С. 7-24.
4. Христенко В. В., Руденко М. А., Ушкалова О. В. Об ограниченной взаимной растворимости компонентов в расплавах бинарных металлических систем монотектического типа // Процессы литья. – 2012. – № 5. – С. 13-19.
5. Свойства элементов. Физические свойства: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.

Поступила 30.07.2012

УДК 532.5:533.6.01:531.1

**В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Л. А. Бондарь,
А. Н. Тимошенко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ НА ГРАНИЦЕ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ И В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Исследованы гидродинамические процессы в модельной жидкости и расплавах при вводе в них дисперсных материалов. Изучено поведение керамических частиц (Fe_3O_4 , TiC, Al_2O_3) в алюминии и алюминиевых расплавах, а также металлических и неметаллических частиц (Fe_3O_4 , 9X18, смесь Fe_3O_4 и TiC) в жидкой меди и медных расплавах в зависимости от физических и физико-механических характеристик материала вводимого порошка. Определены значения скоростей осаждения (всплывания) частиц, глубин погружения и времени их взаимодействия с жидкой матрицей. На основе полученных данных представлены рекомендации по использованию исследуемых материалов в процессах получения композиционных изделий.

Ключевые слова: дисперсная частица, расплав, осаждение.

Досліджено гідродинамічні процеси в модельній рідині та розплавах при введенні в них дисперсних матеріалів. Вивчено поведінку керамічних частинок (Fe_3O_4 , TiC, Al_2O_3) в алюмінії та алюмінієвих розплавах, а також металевих і неметалевих часток (Fe_3O_4 , 9X18, суміш Fe_3O_4 та TiC) в рідкій міді та мідних розплавах в залежності від фізичних та фізико-механічних характеристик матеріалу введеного порошка. Визначено значення швидкостей осадження (спливання) частинок, глибин занурення і часу їх взаємодії з рідкою матрицею. На основі

отриманих даних представлено рекомендації з використання досліджуваних матеріалів в процесах одержання композиційних виробів.

Ключові слова: дисперсна частинка, розплав, осадження.

The hydrodynamic processes in the model fluid and melts in giving them dispersed materials are studied. The behavior of the ceramic particles (Fe_3O_4 , TiC, Al_2O_3) in aluminum and aluminum melts, as well as metallic and non-metallic particles (Fe_3O_4 , 9X18, a mixture of Fe_3O_4 and TiC) in liquid copper and copper melts depending on the physical and physical-mechanical characteristics of the injected powder material is studied. The values of the deposition (floating) velocity of the particles, depth of immersion and time of their interaction with the liquid matrix are determined. Recommendations on the use of the studied materials in the processes of composite products obtaining based on these results are presented.

Keywords: dispersed particles, melt, deposition.

Настоящая работа является продолжением исследований по взаимодействию газопорошкового потока с жидкими средами (металлическими расплавами). На основе анализа использования различных фурм для подачи газопорошковых и газолазерных потоков в жидкости разработана модель истечения газовых потоков из каналов фурм, проведены теоретические исследования газо- и гидродинамических процессов в области взаимодействия газового потока с жидким расплавом [1-4]. Приняв, что скорость частиц, вылетающих из фурмы, равна средней скорости потока на срезе фурмы, исследовали поведение дисперсных частиц, транспортируемых из фурмы газопорошковым потоком в область газовой каверны жидкого расплава. Значения скоростей в пределах сечения потока на выходе из фурм и внутри газовых каверн колеблются [3, 4]. В результате исследований установлено, что в пределах выбранных начальных значений газовых потоков усредненная минимальная скорость общего потока на выходе из фурм составляет 15 м/с. За начальную скорость частицы в момент пересечения границы газ-жидкость приняли усредненную минимальную скорость общего потока на выходе из фурмы. Сопротивление струи отдачи газа на частицу в момент подлета к границе газ-жидкость не учитывали.

Для сопоставления результатов расчета и лабораторных испытаний провели модельные эксперименты по определению времени и скорости осаждения порошковых материалов в расплаве с использованием в качестве модельной жидкости воды, частиц оксида железа Fe_2O_3 дисперсностью 100-150 мкм и частиц порошка из стали 9X18 фракции 200-315 мкм. Скорость осаждения частиц, определенная из экспериментальных результатов, составила 0,045-0,05 м/с для частиц Fe_2O_3 и 0,15-0,3 м/с – для порошка 9X18. Данные, рассчитанные по формуле Стокса, составляют 0,022-0,05 и 0,14-0,0365 м/с соответственно. Некоторое несоответствие нижних пределов значений скорости для частиц порошка Fe_2O_3 обусловлено сложностью визуальной регистрации скорости движения частиц размером 100 мкм. Тем не менее, получили удовлетворительную сходимостью экспериментальных и расчетных результатов.

С целью исследования поведения различных порошков в жидких расплавах, в которых не представляется возможным визуальное наблюдение процесса заглоблени частиц, обладающих начальной скоростью, провели математическое моделирование процесса пересечения отдельно взятой частицы границы газ-жидкость и ее движения в жидкости.

Проведение экспериментов с такими материалами, как алюминий и сплав АК12М2МгН, медь и бронза ОЦС 5-5-5 при вводе в них порошков Fe_3O_4 , TiC, Al_2O_3 , 9X18 и смеси порошков Fe_3O_4 и TiC, вызвало сложность в понимании их поведения в процессе получения металлических суспензий. Экспериментальное моделиро-

вание этих процессов на модельной жидкости (воде) с вводом указанных сыпучих ингредиентов также не дает достаточно точного соответствия, что обусловлено существенными различиями в вязкостных свойствах расплавов и модельной жидкости. Поэтому для математических расчетов выбрали материалы, соответствующие исследуемым порошкам и расплавам согласно критерию подобия двух гидродинамических явлений, в котором определяющими являются выталкивающая сила и сила вязкости (критерий Архимеда) при условии выполнения критерия Рейнольдса. В табл. 1 представлены материалы исследуемых расплавов и порошков, а также модельные материалы, которые применяли в математическом моделировании процессов. При расчетах не учитывали химическое взаимодействие материала частиц с модельной жидкостью. Выбрали модельные частицы следующих размеров: из стеклопластика диаметр частицы составляет 170 и 200 мкм, из каучука – 200 мкм, из калия – 382 мкм.

Таблица 1. Исследуемые и модельные материалы

Расплав	Материал частиц	Модельная жидкость	Материал модельных частиц
Алюминий, медь, сплав АК12М2МГН, бронза ОЦС 555	Fe_3O_4 , TiC, Al_2O_3 , $Fe_3O_4 + TiC$, 9X18	вода	стеклопластик, калий, каучук

Поведение отдельной частицы в жидкости рассматривали последовательно на двух этапах ее движения:

- движение частицы с момента пересечения границы газ-жидкость до момента торможения (с ускорением);
- равномерное движение частицы под действием гидростатических сил.

На первом этапе частица при пересечении границы газ-жидкость движется с начальной скоростью V_0 в поле действия силы тяжести. После момента торможения, когда ускорение частицы становится равным нулю (второй этап), она продолжает свое движение равномерно с постоянной скоростью V_{oc} . В зависимости от материала частицы, ее размера и свойств среды она будет либо опускаться на дно, либо всплывать.

Время движения частицы с нелинейной скоростью на первом этапе движения рассчитывали в среде AUTODYN программного комплекса Ansys.

Для моделирования поведения жидкости использовали метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) – несеточный лагранжевый метод (то есть координаты движутся вместе с жидкостью), основанный на делении жидкости на дискретные элементы (частицы жидкости), имеющие пространственное расстояние (известное как «длина сглаживания»), на котором их свойства «сглаживаются». Преимущества этого метода по сравнению с традиционными методиками, основанными на сетке, в том, что SPH метод менее ресурсоемкий. Закон сохранения массы здесь выполняется без дополнительных вычислений, так как элементы сами по себе представляют массу, и давление вычисляется от воздействия соседних элементов, которые также имеют массу, а не решают систему линейных уравнений. Также SPH создает свободную поверхность на границе взаимодействия двух фаз – воды и воздуха. По этим причинам благодаря SPH методу можно моделировать движение жидкости в режиме реального времени (рис. 1).

Для расчета движения частиц порошка использовали метод Лагранжа. В расчетах учитывали деформацию частиц при столкновении с жидкостью.

Постоянную скорость V_{oc} определяли следующим образом. В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению [5]

$$F_T - F_c - F_A = m \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

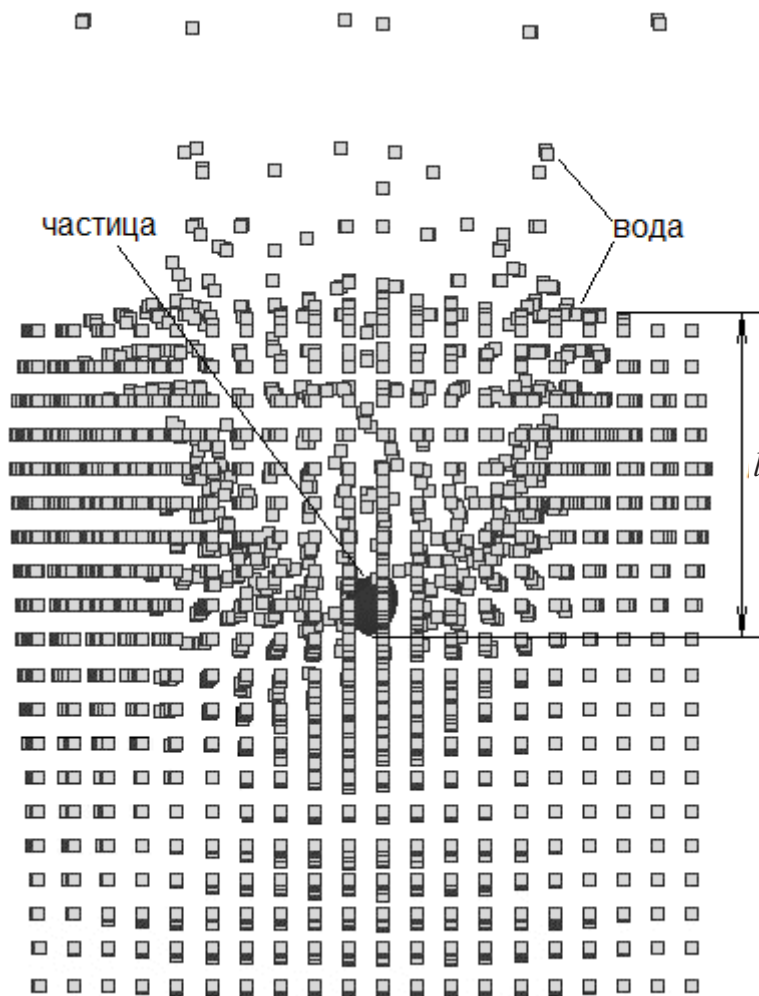


Рис. 1. Положение частицы из стеклопластика дисперсностью 170 мкм в воде в момент времени $t = 0,54$ мс, глубина проникновения в жидкость $l = 1,06$ мм

где $F_T = mg$ – сила тяжести; m – масса частицы, кг; g – ускорение свободного падения ($9,81$ м/с²); F_c – сила сопротивления среды:

$$F_c = \xi \frac{\rho_{ж} V^2}{2} S, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент сопротивления; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; V – скорость движения частицы относительно среды, м/с; S – площадь поперечного сечения частицы, м²; F_A – сила Архимеда (или подъемная) пропорциональна массе среды, вытесненной массой частицы:

$$F_A = \frac{m}{\rho_T} \rho_{ж} g, \quad (3)$$

где ρ_T – плотность материала частицы, кг/м³.

В дальнейшем приняли, что

- частица имеет шарообразную (сферическую) форму;
- осаждается в поле силы тяжести;
- среда, в которой происходит осаждение, не ограничена;
- осаждению частицы другие частицы не мешают.

Для ламинарного режима осаждения, когда число Рейнольдса $Re < 0,1$, сила сопротивления F_c , действующая на частицу, выражается формулой

$$F_c = 3\pi d \eta V, \quad (4)$$

где d — диаметр частицы, м; η — динамическая вязкость жидкости, Па · с.

Для второй стадии движения равнодействующая всех сил в уравнении (1) $dV/dt = 0$, тогда для скорости осаждения частицы получаем формулу Стокса

$$V_{oc} = \frac{d^2(\rho_T - \rho_{ж})g}{18\eta}. \quad (5)$$

Полученные расчетные данные скорости осаждения/всплывания, времени и глубины осаждения для различных частиц представлены в табл. 2 и на рис. 2 и 3.

Таблица 2. Расчетные значения скорости, времени и глубины падения частиц в модельной жидкости

Материал частицы	V_{oc} , м/с	t_k , мс	V_k , м/с	l_k , мм
Стеклопластик 1	0,024	1,5	0,024	1,4
Стеклопластик 2	0,033	3,85	0,033	3,5
Калий	-0,011	2,2	0	1,7
Каучук	-0,0016	0,05	0	0,33

Стеклопластик 1 соответствует частице с диаметром 170 мкм, а стеклопластик 2 – частице дисперсностью 200 мкм; t_k , V_k , l_k – значения времени, скорости и глубины падения частиц в конце первой стадии движения.

Отрицательные значения V_{oc} имеют те частицы, которые после достижения нулевого значения скорости начинают всплывать.

Установили, что изменение (падение) скорости от V_0 до V_k происходит в течение очень короткого промежутка времени, равного тысячным долям секунды, а глубина для данной начальной скорости колеблется в пределах 0,3-3,5 мм. Эти данные позволяют сформулировать гидродинамические условия подбора материала расплава и вводимых частиц, а также выбрать метод получения изделия из композиционного материала, как, например, изделия с композиционной лазерной наплавкой или объемно литого композита.

Для тех частиц, плотность которых меньше плотности жидкости, рассчитали время их

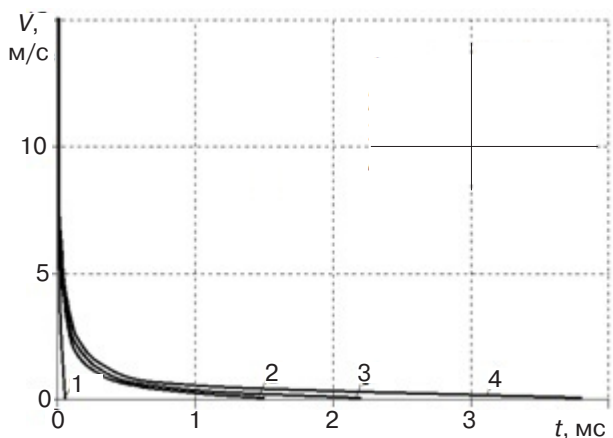


Рис. 2. Зависимости изменения скорости движения частиц на первой стадии погружения в жидкость: 1 – каучук; 2 – стеклопластик 1; 3 – калий; 4 – стеклопластик 2

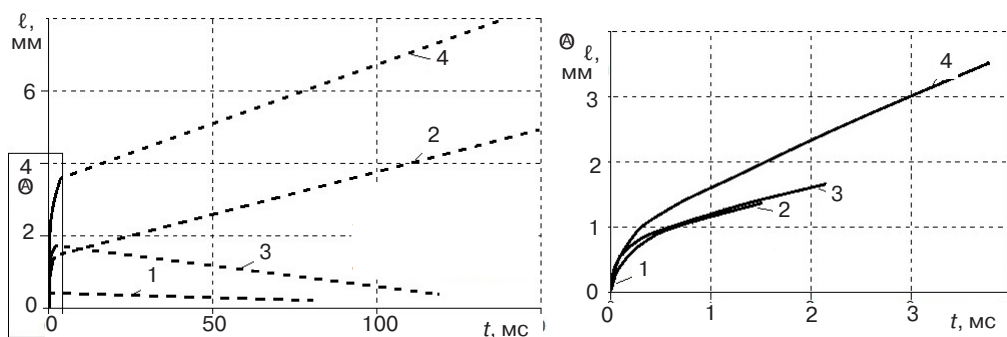


Рис. 3. Изменение глубины погружения частиц во времени на первой стадии движения (сплошные линии) и при движении в поле гидростатических сил (пунктирные линии): 1 – каучук; 2 – стеклопластик 1; 3 – калий; 4 – стеклопластик 2

всплытия в поверхностный слой среды, ширина которого не меньше диаметра частицы. Частица каучука достигает этого слоя за 0,08 с, а частица калия – за 0,12 с. Таким образом, перенося полученные результаты на изучаемые расплавы и порошки, время обработки расплавов бронз ОЦС 555 с применением порошков Fe_3O_4 и смеси $Fe_3O_4 + TiC$, а также расплава меди с металлическими частицами 9X18 ограничено очень малыми значениями в десятые доли секунды. Поэтому получение композитов на основе указанных материалов по гидродинамическим условиям достаточно неблагоприятно, ввод этих частиц в указанные расплавы возможен, но для замедления их движения и удерживания их в расплаве необходимы дополнительные силы. Ими могут быть химические связи взаимодействия частицы и расплава, поверхностные силы, центробежные силы и др. Следовательно, в процессах получения литого композиционного материала достаточно большой интерес представляет и вторая стадия движения частицы, определяющая технологичность изготовления литого композиционного изделия.

При формировании композитов на основе этих расплавов для внедрения порошкового материала в более глубокие слои расплава необходимо дополнительное внешнее воздействие либо на расплав, либо на частицы, или же одновременно на оба объекта. Одним из альтернативных способов получения суспензионного расплава на основе порошка и жидкой матрицы является принудительное его вдувание в расплав при подаче порошка через заглубленные фурмы. Учитывая величину газовой каверны, образующейся в жидкости при продувке [1], рассчитали, что частица каучука всплывает на один сантиметр вверх за 6,25 с, а частица калия – за 0,9 с. Следовательно, для расплавов на основе меди можно применять частицы из стали 9X18 как в процессах лазерной наплавки и легирования, так и для получения литых композиционных материалов на основе суспензий, применяя заглубление фурмы в расплав.

В случае использования частиц калия расчетное время их всплывания в модельной жидкости по сравнению с вышеуказанным случаем еще меньше и, исходя из расчета воздействия гидростатических сил без учета действия других сил, недостаточно, чтобы сформировать суспензионный слой даже в поверхностной области жидкого расплава. Поэтому можно предположить, что для расплава бронзы ОЦС 555 применение порошков Fe_3O_4 и смеси $Fe_3O_4 + TiC$ в виде композитных составляющих ограничено процессами лазерной наплавки и легирования. Тем не менее, экспериментальные результаты, полученные при использовании метода ввода частиц через заглубленную фурму, показали, что в ограниченных объемах можно получить литой композиционный материал при использовании указанных ингредиентов, что является свидетельством действия сил поверхностного натяжения, химического взаимодействия и др.

Частицы из стеклопластика, имея большую плотность по отношению к жидкости,

осаждаются в поле силы тяжести. За одну секунду частицы дисперсностью 170 мкм углубляются внутрь расплава на 2,4 см, а дисперсностью 200 мкм – на 3,3 см.

Для получения композиционных материалов на основе жидких расплавов алюминия или сплава АК12М2МгН с использованием в качестве дисперсной фазы порошков TiC и Al₂O₃, согласно расчетам, необходимо учитывать, что частицы порошка сравнительно быстро осаждаются в расплаве. Снижения скорости осаждения V_{oc} можно достичь посредством использования дополнительного внешнего воздействия. Это может быть сила, приложенная к расплаву, обеспечивающая образование, например, поля центробежных сил. Тогда частица будет осаждаться в центробежном поле с ускорением

$$a = R \omega^2, \quad (6)$$

где ω – угловая скорость; R – радиус траектории движения частицы.

Скорость осаждения (всплытия) можно найти, подставив в уравнение Стокса (5) вместо ускорения свободного падения g ускорение в центробежном поле a

$$U_{oc} = \frac{\omega^2 R d^2 (\rho_T - \rho_{ж})}{18\eta}. \quad (7)$$

Кроме того, возможно применение магнитного поля как, например, сепаратора стальных частиц в алюминиевых или медных расплавах вследствие разных электропроводных характеристик материалов (расплава и частиц).

Таким образом, исследовано гидродинамическое поведение дисперсных частиц, обладающих начальной скоростью, в момент пересечения ими границы газ-жидкость и при дальнейшем их погружении или всплытии в жидкости. Удовлетворительная сходимость результатов математических расчетов и модельных экспериментов дает возможность оценить характер движения металлических и керамических частиц в металлических расплавах.

Полученные данные позволяют сформулировать гидродинамические условия выбора материалов (расплава и частиц) для получения устойчивых металлических суспензий и литых композиционных материалов на их основе. Приведены рекомендации использования данных материалов в различных технологических процессах получения композиционных изделий (лазерное легирование и наплавка, комбинированные литейные технологии) при различных сочетаниях материалов расплава и частиц порошка.



Список литературы

1. Изменение газовой каверны при погружении фурм различных конструкций в жидкие среды / Е. А. Рейнталь, В. П. Лихошва, В. В. Савин и др. // Процессы литья. – 2011. – № 3. – С. 14-23.
3. Моделирование процессов формирования суспензионных расплавов / В. П. Лихошва, В. Л. Найдек, Е. А. Рейнталь и др. // Там же. – 2009. – № 3. – С. 11-15.
3. Лихошва В. П., Рейнталь Е. А. Фурмы для заглубления газолазерных и газопорошковых струй в жидкость: Тез. докл. /Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций. – Севастополь, 25-28 августа 2010. – С. 6-10.
4. Воздействие газовых потоков, подаваемых с помощью фурмы, на жидкие среды / В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Л. А. Бондарь и др. // Процессы литья. – 2010. – № 6. – С. 64-71.
5. Романков П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1974. – 286 с.

Поступила 15.10.2012