

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ПОТОКЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ

И.А. Алексеев, А.Н. Аникеев, В.В. Седухин

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст, Россия

Современные тенденции развития машиностроения подразумевают использование редких и дорогостоящих материалов во многих его отраслях. Постепенное истощение природных запасов, вызванное масштабным технологическим прорывом в XX веке, требует рационального использования оставшихся ресурсов и применения ресурсосберегающих технологий. Изготовление изделия полностью из дорогостоящего или нетехнологичного материала является нецелесообразным ввиду того, что площадь рабочей поверхности относительно площади всей детали зачастую не превышает 20–30 %. Соответственно, объем материала, выполняющего функцию носителя рабочей поверхности, рациональнее всего изготавливать из более дешевых и технологичных конструкционных материалов, отвечающих предъявленным требованиям по выдержке прилагаемой нагрузки. Решение данной проблемы заключается в необходимости создания деталей машин, представляющих собой по своей молекулярной структуре единую систему с отсутствием каких-либо четких границ раздела фаз и градиентным равномерным распределением укрепляющих частиц в теле металла. Математическое моделирование технологических процессов во всех отраслях промышленности необходимо для повышения эффективности производства с точки зрения снижения издержек на устранение результатов неудачных экспериментов, аварийных ситуаций и оптимизации технологических процессов. Вводимая мелкодисперсная керамика в виде карбидов титана, вольфрама, кремния и прочих элементов, придающих рабочим поверхностям стальной отливки уникальные характеристики в части сопротивления термическим и физическим нагрузкам, повышает тем самым их твердость, износостойкость и сопротивляемость повышенным температурам при эксплуатации, в то время как более вязкая и упругая железная сердцевина отливки при наличии в ней градиента упрочняющих частиц обеспечивает стойкость отливки к ударным и знакопеременным нагрузкам. Выполнен обзор существующих математических моделей процесса движения твердых дисперсных частиц в потоке жидкости. Рассмотрены системы, выступающие в качестве аналогов системы взаимодействия «сталь – карбид вольфрама – карбид титана».

Ключевые слова: дисперсные карбиды, дисперсные частицы, математическое моделирование, упрочнение металла, смачиваемость.

Введение

Развитие компьютерных технологий позволило с начала 70-х годов XX столетия применять вычислительные мощности для решения задач по повышению эффективности производств, однако в то время удельная эффективность вычислительных машин была ниже, чем у имеющегося в штате большинства предприятий специализированных расчетных подразделений с точки зрения удельных затрат на единицу времени для получения одно-

го и того же результата. Однако развитие таких наук, как кибернетика, позволило расширить поле технических возможностей вычислительных машин, повысить удельную производительность в конкуренции с человеком и исключить главный недостаток всех ранее выполняемых расчетов – человеческий фактор, создающий вероятность возникновения ошибок в расчетах.

Получившие в настоящее время широкое распространение многочисленные комплексы

автоматизации проектирования и инженерных расчетов, или CAD, CAM, CAE-системы [1, 2], резко повысили продуктивность промышленных предприятий, а без самых распространённых представителей вышеупомянутых категорий программного и аппаратного обеспечения невозможно представить ни одно современное крупное предприятие. Вдобавок к технологической оптимизации произошел резкий толчок производства во всех отраслях промышленности.

Одной из эффективных технологий получения отливок, являющихся телами вращения, является центробежное литье [3–5]. Наиболее широко данная технология распространена в цветной металлургии и применяется для отливки чистых металлов и сплавов с хорошими литьевыми характеристиками и узким интервалом кристаллизации, таких как бронза, алюминий и латунь. Данная технология является относительно старой по причине ее использования с середины XX века, однако использование физических явлений в аппарате центробежного литья вкупе с достижениями вычислительной техники позволяет расширить потенциал данного метода в части производства материалов с уникальными свойствами [6, 7].

Использование метода центробежного литья при внедрении нанокерамики позволяет получать цельнолитые изделия без явной границы раздела систем, по аналогии со структурой механических смесей или при получении готовых изделий наплавкой, однако это не устраняет проблему смачиваемости карбидных частиц жидким расплавом и обеспечения достаточной межфазной адгезии [8–10].

Построение математической модели

В процессе исследования был проведен анализ литературы на предмет наличия существующих достижений и результатов исследований на тему изучения поведения тугоплавких частиц в теле кристаллизующегося металла при центробежном литье заготовок [11–13]. Были отобраны работы [14, 15] по признаку наиболее близкого сходства по теме исследования.

Сам по себе процесс центробежного литья является довольно примитивным процессом получения заготовок в форме цилиндрических тел вращения. Наиболее активная

работа по теме центробежного литья прошла в середине XX столетия сразу после появления данной технологии в промышленности. Далее активность исследований сходила на нет по причине сокращения неизвестных аспектов данной технологии, изучаемых в основном опытным путем, а также отсутствия доступности технологий компьютерного моделирования, позволяющего воспроизводить процесс литья заготовок в наглядной виртуальной форме с некоторым отклонением сходимости результатов с действительными процессами, протекающими в ходе разливки.

В работе [14] на тему «проталкивания» частиц в струю расплава Хан утверждает, что такой параметр, как скорость струи расплава, имеет особое влияние на тугоплавкие частицы, так как низкая скорость потока не позволяет частицам двигаться к расчетной точке назначения и может «застрять» в разливочном канале или промежуточном резервуаре. Здесь автор оперирует двумя основными параметрами взаимодействия частиц и расплава: смачиваемостью частиц и количеством свободной энергии, которые находятся в прямой зависимости друг от друга. Далее от этих параметров рассчитывается влияние скорости потока и сил трения между частицами и потоком. Хан выводит параметр критической скорости струи (потока). Скорость струи является критической, если при прохождении некоторого расчетного пробега разливочного канала с заданным сечением отношение доли оставшихся по причине кристаллизующегося металла у стенок канала частиц в канале к доле прошедших сквозь канал или ко всему количеству частиц составляет некоторое число, удовлетворяющее технологическим условиям, и не препятствует дальнейшему процессу разливки ввиду сокращения сечения проточного канала. На рис. 1 изображена схема установки, на которой проводились опыты с измерением критической скорости.

В ходе своего исследования Хан вывел формулу критической скорости потока, которая прямо пропорциональна радиусу транспортируемой частицы, ускорению свободного падения, разнице плотностей между веществами частиц и жидкости-носителя, а также величине поверхностного натяжения, выражающейся через сумму угла смачивания жидкости и поправочного расстояния, и об-

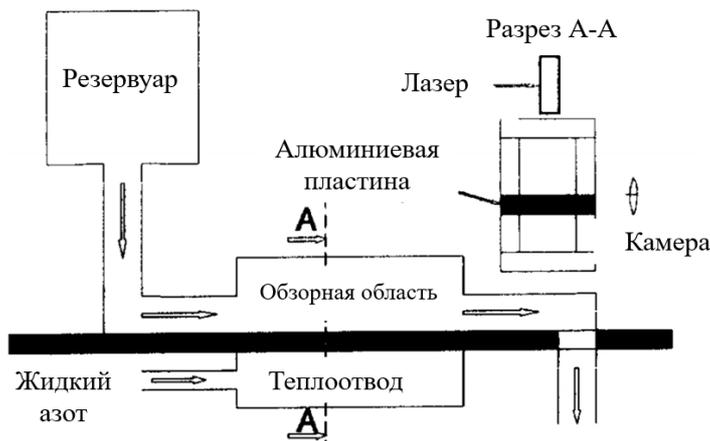


Рис. 1. Схема испытательной установки

ратно пропорциональна обратному углу смачивания:

$$V_c = \frac{2}{9\mu} aA(\rho_p - \rho)g \frac{f + \tan\theta}{1 - f \tan\theta} \quad (1)$$

Коротким выводом является тот факт, что чем меньше частица по размеру и плотности, тем меньшую скорость необходимо приложить для поддержания ее плавучести и предотвращения осаживания, которая и является критической скоростью потока. Данная формулировка является вполне правдоподобной,

потому как автор использовал элементарные законы гидродинамики и физики плавучести тел. Вдобавок опыт проводился с масштабированием свойств внедряемых частиц и тела жидкого расплава, переводимых на образ обычной воды и полимерных шаров микроскопического размера, однако для четкого сравнения использовались дополнительные алюминиевые и стальные шарики сходного с полимерными размерами. На рис. 2 приведены результаты исследований Хана, иллюст-

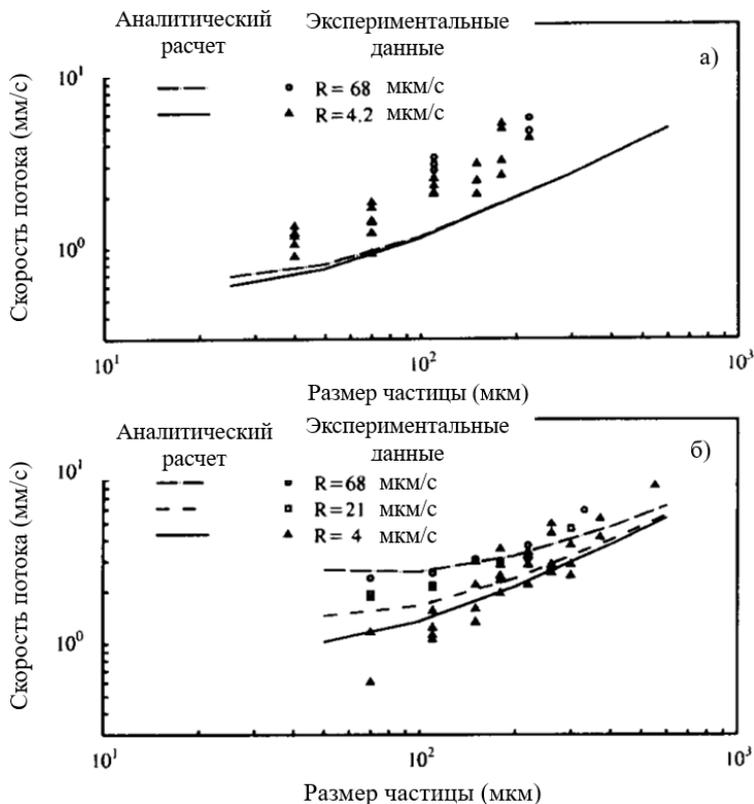


Рис. 2. Графики зависимости скорости потока от размера частиц для алюминия (а) и оргстекла (б)

рирующие зависимости между критической скоростью потока и размером дисперсной частицы для алюминиевых частиц (а) и оргстекла (б).

Тему изучения смачиваемости вновь поднял Каталина [15], дополнив результаты Хана дополнительным неучтенным математическим аппаратом. Работа Каталины была направлена на изучение динамики процесса взаимодействия порошковых микрочастиц с движущимся потоком жидкости, в результате которой была выведена модель динамического взаимодействия дисперсных частиц с телом расплава. Автор выделил 3 состояния межфазного взаимодействия между жидкостью и дисперсными частицами при кристаллизации: непосредственный захват дисперсных частиц при прохождении фронта кристаллизации, выталкивание частиц фронтом кристаллизации, постепенное полное поглощение дисперсных частиц с одновременным их выталкиванием фронтом кристаллизации, что впоследствии образует градиентную структуру материала.

Автор экспериментирует с тремя системами: алюминий (матрица) – оксид циркония (включения), сукцинонитрил (янтарная кислота, матрица) – полистирол (включения), бифенил (консервант, матрица) – стекольная крошка (включения). Суть работы заключается в построении такой математической модели поведения дисперсных частиц, которая могла бы дать достаточно точный прогноз поведения дисперсных частиц при заданной скорости потока, скорости движения фронта кристаллизации, выражающийся в определении их потенциала поглощения/выталкивания/градиентного распределения по телу заготовки.

Каталина разработал математическую модель поведения дисперсных частиц в жидком металле и поведение самого жидкого металла. Он описал всю систему с помощью пяти факторов.

1. Температурное поле вокруг частицы:

$$T(r, \theta) = T_M + G_L L - G_L \cdot \left[1 + \frac{k_L - k_P}{(m-1)k_L - k_P} \left(\frac{R_P}{r} \right)^m \right] \cdot r \cos \theta, \quad (2)$$

где T_M – температура плавления металла;

G_L – температурный градиент в металле;

k_L, k_P – теплопроводность металла и частицы соответственно;

R_P – радиус частицы;

(r, θ) – позиция частицы в сферических координатах;

L – расстояние от центра частицы до границы фронта кристаллизации;

m – коэффициент формы частицы (цилиндрическая или сферическая).

2. Скорость частицы как векторная сумма скорости потока и молекулярного трения частицы о жидкий металл:

$$F_I = 2\pi R_P \Delta \gamma_o \left(\frac{a_o}{a_o + d} \right)^2 \frac{k_P}{k_L}, \quad (3)$$

где F_I – скорость потока;

a_o – атомный диаметр жидкого металла;

$\Delta \gamma_o$ – разница между межфазной энергией частицы и твердого металла, частицы и жидкого металла.

$$F_d = 6\pi\eta V_P \frac{R_P^2}{d} \left(\frac{k_P}{k_L} \right)^2, \quad (4)$$

где F_d – сила трения частицы в потоке;

η – динамическая вязкость жидкого металла.

3. Форма фронта кристаллизации:

$$\left(\frac{RI}{R_P} \right)^3 - \frac{L}{R_P \cos \theta} \left(\frac{RI}{R_P} \right)^2 + k_a = 0, \quad (5)$$

где RI – позиция фронта кристаллизации относительно центра частицы для угла θ на расстоянии L ;

k_a – отношение между разностью коэффициентов теплопроводности для жидкого металла и частицы и ее удвоенной суммой.

4. Скорость потока вокруг частицы:

$$V_t^P = - \frac{dRI_t}{dt} = - \frac{dRI_t}{dL} \cdot \frac{dL}{dt} = - \frac{dRI_t}{dL} (V_P - V_S), \quad (6)$$

где V_t^P – скорость движения фронта кристаллизации относительно скорости движения частицы;

V_S – скорость затвердевания жидкого металла.

5. Вычисление критической скорости затвердевания жидкого металла для выталкивающего/захватывающего потока:

$$\frac{dd}{dt} = V_P - V_t, \quad (7)$$

где d – расстояние от границы частицы до фронта кристаллизации;

V_t – абсолютная скорость движения фронта кристаллизации.

Графически математическая модель выведенная Каталиной представлена на рис. 3.

Результат работы Каталины носит уточняющий характер относительно работы Хана, а также создает более точное описание взаимодействия частиц при воздействии на них фронта кристаллизации. Предложенная Каталиной динамическая модель взаимодействия

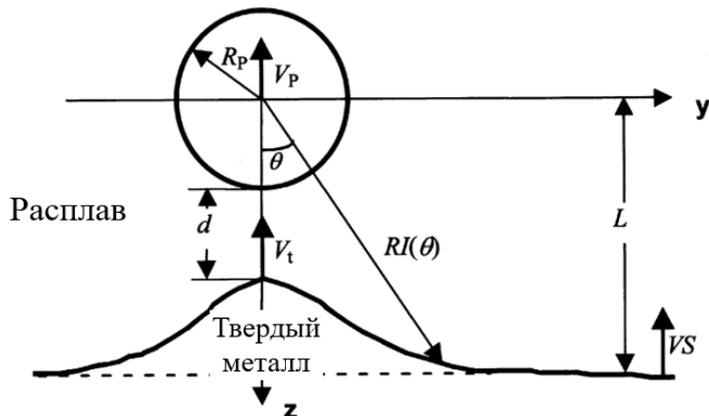


Рис. 3. Графическое представление математической модели

частиц с расплавом направлена на определение значения выталкивающей/поглощающей силы матрицы на базе сведений о скорости движения потока. Автор утверждает, что его модель действительна лишь при диапазоне скоростей, близких к субкритическим.

На рис. 4–6 представлены результаты сравнения вычисленной критической скорости и экспериментальных значений для разных материалов. На рис. 7 показан график изменения скорости движения частицы и скорости движения фронта кристаллизации от времени.

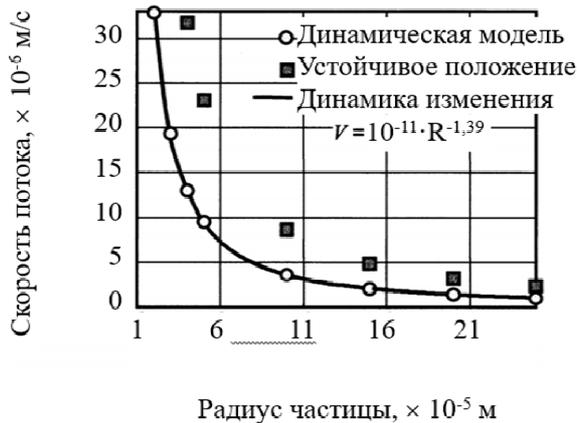


Рис. 4. Вычисленные значения критической скорости для системы Al-ZrO₂

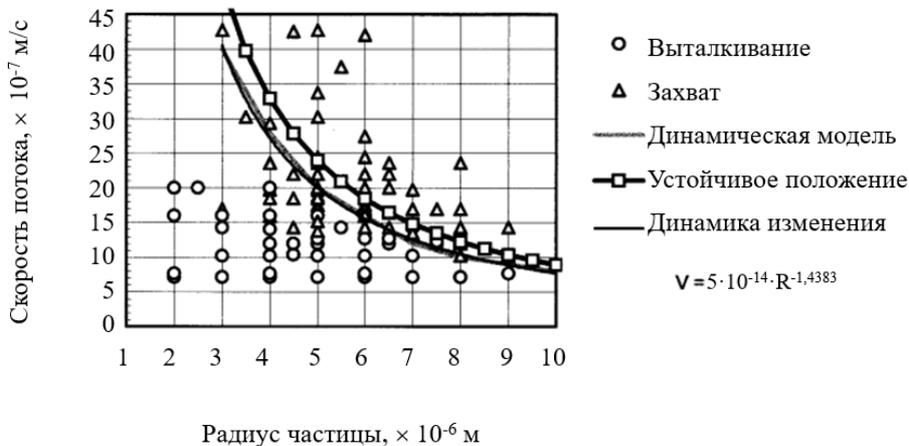


Рис. 5. Сравнение вычисленных и опытных значений критической скорости для системы сунконионитрил – полистирол

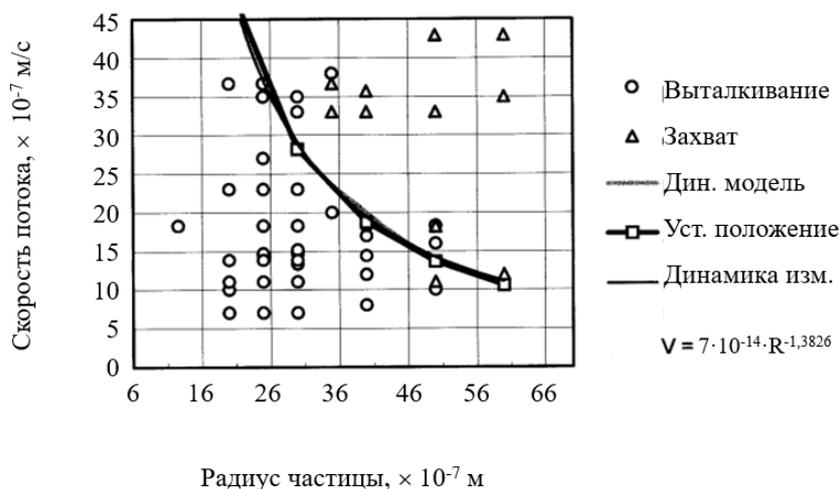


Рис. 6. Сравнение вычисленных и опытных значений критической скорости для системы бифенил – стекло

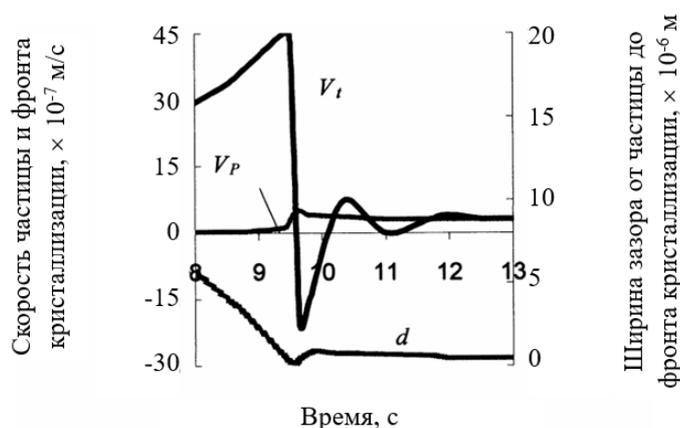


Рис. 7. Сравнение скоростей движения частицы V_p , движения фронта кристаллизации V_f и расстояния от частицы до фронта кристаллизации d при субкритической скорости затвердевания $V_s = 3 \cdot 10^{-5}$ м/с в системе Al-ZrO₂ с радиусом частицы $R_p = 250$ мкм

Распределение дисперсных частиц при центробежном литье

Производство деталей по технологии точного центробежного литья с внедрением упрочняющих частиц позволяет получать готовые детали машин, требующие выполнения доводочных операций по снятию наружной корки металла, образующегося при начальном контакте расплава с изложницей, в которой отсутствуют упрочняющие частицы. На рис. 8 изображен процесс центробежного литья.

Перед началом процесса разливки стали, изложница 1 подогревается до 300–350 °С для снижения градиента температур и снижения вероятности деформации изложницы. Подложка 3 защищает стенки изложницы от коробления. Изложница получает вращение через привод 5, представляющий собой соосный вал, от электродвигателя. Через носок 2 рас-

плавленный металл 4 поступает в уже раскрученную до 500–600 об/мин изложницу, что обеспечивает центростремительное ускорение у внешних стенок изложницы, равное 190 м/с^2 , самотеком. При первом контакте жидкого металла с относительно холодной подложкой образуется мелкозернистая корка застывшего металла. Упрочняющие частицы подаются в процессе разливки в виде порошка практически сразу после начала разливки в разливочный носок во избежание оседания в разливочном ковше. Вращение изложницы заставляет частицы быстрее оседать и распределяться в теле металла при кристаллизации более равномерно благодаря воздействию сил Архимеда и центростремительных сил. Кристаллизация идет по стандартной схеме – от периферии к центру, обеспечивая образование мелкозернистой структуры на поверхности заготовки.

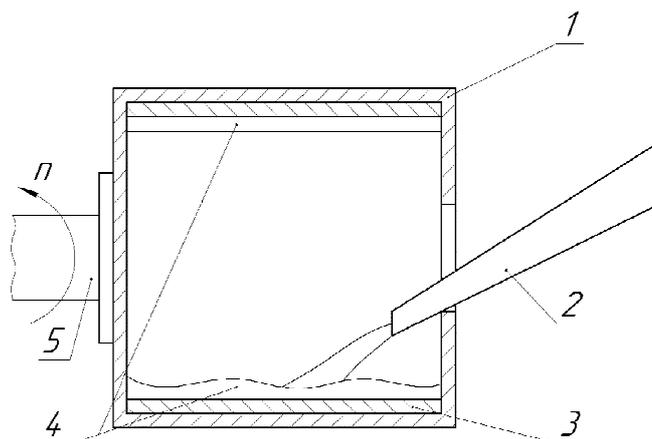


Рис. 8. Процесс разливки стали в изложницу установки центробежного литья: 1 – изложница; 2 – носок; 3 – подложка; 4 – жидкая сталь; 5 – привод вращения изложницы; n – направление вращения

На рис. 9 показано распределение частиц на границе соприкосновения закристаллизовавшегося металла с подложкой. Наглядно видно, что наружная корка имеет мелкозернистую структуру и состоит в основном из молекул стали. Под коркой скрывается наружный рабочий слой заготовки, в котором сконцентрированы наиболее крупные частицы карбидов. Можно заметить, что более мелкие частицы карбидов находятся между крупными частицами, но преобладают уже в периферийной зоне относительно границы раздела «подложка – металл», а также их концентрация постепенно снижается при удалении от границы раздела фаз к центру заготовки, образуя градиентную текстуру.

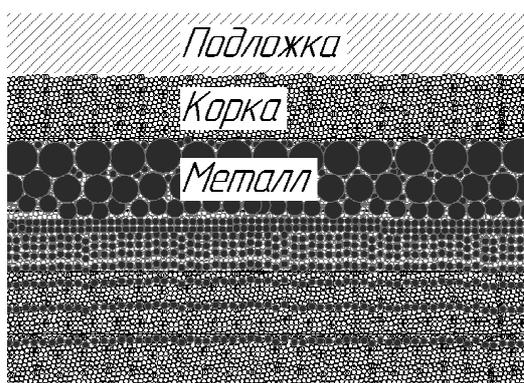


Рис. 9. Распределение частиц на границе фаз

Центробежное литье является оптимальным методом получения заготовок ввиду большой скорости кристаллизации, обеспечивающей мелкозернистую структуру

Для обеспечения надежной молекулярной связи карбидов и основного металла необхо-

димо наличие высокой межфазной адгезии, т. е. частицы карбидов должны обладать оптимальной смачиваемостью жидкой сталью для образования надежного межфазного соединения.

Определение смачиваемости материалов по большей части происходит эмпирическими методами на основе натуральных опытов. Для прогнозирования характера распределения упрочняющих частиц в теле металла, толщины образующегося слоя, возможных физических характеристик заготовки, а также снижения материальных затрат на проведение натуральных испытаний принято решение о создании математических моделей для проведения анализа в САЕ-системах.

Неравномерное внедрение упрочняющих частиц приводит к их неравномерному распределению в теле закристаллизовавшегося расплава, выражающемуся в появлении скоплений, которые могут быть обнаружены в ходе анализа отливок разрушающим методом, несмотря на то, что при центробежном литье на упрочняющие частицы воздействует поле гравитационных сил, которое ускоряет проникновение дисперсных частиц в глубь кристаллизующегося расплава.

Ввиду того, что процесс разливки при центробежном литье довольно скоротечный и составляет не более 30–60 с до полной кристаллизации отливки из стали массой до 10–20 кг, неточное дозирование порошка нарушает необходимую удельную концентрацию дисперсных частиц в удельном объеме струи расплава. Следовательно, может возникнуть ситуация полного отсутствия упрочняющих

Литейное производство

частиц в наружных слоях заготовки по причине мгновенной кристаллизации при контакте с относительно холодной изложницей или на некоторой глубине от поверхности, которая выходит за необходимый допуск при механической обработке, в результате чего расчетный диаметр готового изделия получится совсем или недостаточно упрочненным, несмотря на воздействие центробежных сил.

Аналогично может возникнуть иная ситуация. Если при разливке расплава начать внедрять частицы слишком рано, то весь упрочняющий порошок рискует оказаться в мелкозернистой корке, подлежащей удалению. Вдобавок это событие будет простимулировано воздействием поля гравитационных сил.

Владение сведениями о процессе разливки и возможностью управлять самим процессом с достаточной точностью позволяет минимизировать риски неравномерного распределения упрочняющих частиц, а также позволит производить оперативную разливку слоями из одного или нескольких видов дисперсных частиц.

Слоеная разливка может быть вполне пригодна в ситуации, когда для упрочнения внутренних слоев кольцеобразных отливок необходим порошок с плотностью частиц, превышающей плотность матричного расплава. Если с внедрением подобного порошка на наружные слои отливки не возникает особых проблем, за исключением риска попадания карбидов в корку, то для внутренних слоев это составляет определенную сложность. Выходом из данной ситуации обычно является применение более легковесных дисперсных порошков, которые могут оказаться слишком дорогостоящими или редкими на рынке.

В результате возникновения возможности слоеной дозированной разливки можно дос-

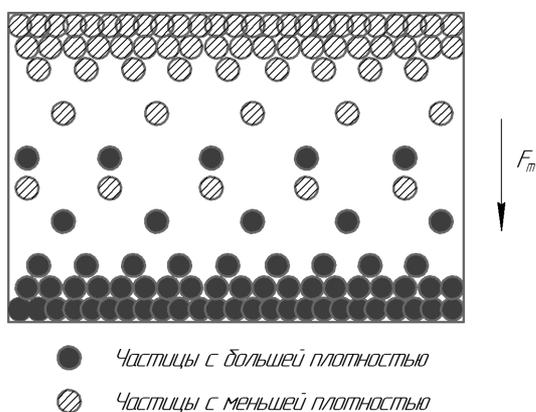


Рис. 10. Распределение упрочняющих частиц разной плотности в стальной матрице

тигнуть материальной экономии за счет использования более распространенных и дешевых материалов, а также сократить повсеместное влияние гравитационных сил.

На рис. 10 изображена схема, иллюстрирующая результат процесса разливки с внедрением дисперсных частиц разной плотности для упрочнения внутренней и внешней поверхностей кольцевой заготовки. Здесь изображена половина кольцеобразной заготовки, в которой легковесные частицы стремятся к ее оси вращения.

В данном случае при использовании традиционных методов центробежного литья без дозирования и контроля времени введения частиц мы вынуждены использовать частицы, обладающие разной плотностью относительно матричного расплава. Как уже было сказано ранее, иногда могут быть использованы порошки из редких или дорогостоящих материалов, например карбидов титана TiC и карбидов вольфрама WC. Дополнительно к этому имеется еще одно ограничение, связанное с концентрацией упрочняющего материала и зависящее от стоимости порошка. В результате этого мы будем вынуждены снизить размер товарной партии изделий, или завязать конечную стоимость изделий, или снизить качество изделий, выражающееся в снижении концентрации упрочняющих карбидов в теле заготовки на единицу объема для сохранения минимальной цены товарной партии. F_T – направление силы тяжести, вызванной скоростным вращением изложницы.

На рис. 11 изображен вариант слоеной разливки, являющийся результатом контроля дозирования порошка и матричного расплава, а также контроль времени разливки с введением некоторой временной выдержки, обес-

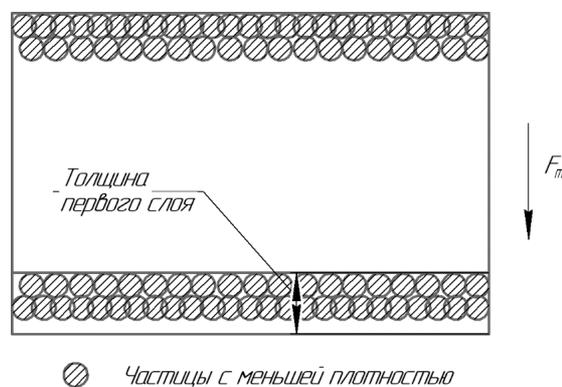


Рис. 11. Литье с использованием частиц меньшей плотности с формированием слоев

печивающей достаточный уровень кристаллизации первого слоя, наполненного более легковесными частицами взамен тяжеловесных.

Естественно, что данная схема является практически идеальным исходом от процесса центробежного литья слоями. Однако не исключается, что в момент контакта горячего расплава некоторая часть зафиксировавшихся упрочняющих частиц в первом слое будет перемещена во второй слой, тем самым снижая необходимую концентрацию упрочняющих частиц в наружном слое.

Для получения данного результата необходим точный контроль сведений о температурах первого слоя, который уже подвергнулся кристаллизации, а также о температуре расплава. Если разница температур будет слишком низкой, то существует риск возникновения полной рекристаллизации первого слоя при соприкосновении с расплавом, внедренным для формирования второго слоя. Следовательно, все частицы, зафиксированные в первом слое, могут быть вытеснены матричным расплавом, так как в данном случае упрочняющие частицы являются легко-весными и менее плотными относительно стального расплава.

Определение температуры расплава перед разливкой может производиться с помощью приборов, однако для контроля температуры закристаллизовавшегося слоя при достаточно быстром темпе разливки и трудоемкости определения температуры оптическим методом с достаточной точностью затруднительно. Здесь необходимо использовать математический аппарат, а именно законы термодинамики кристаллизации стального расплава с учетом влияния внедренных дисперсных частиц, воздушных потоков и процесса непрерывного центробежного вращения изложницы.

Заключение

В ходе работы по исследованию процесса распределения дисперсных частиц при центробежном литье были изучены методические

материалы и публикации для составления математической модели процесса как основы для проведения дальнейшего компьютерного моделирования. Несмотря на то, что технология центробежного литья заготовок является относительно устаревшей, исследователи отечественных и зарубежных институтов до сих пор проявляют к ней интерес. Отчасти это связано с новой возможностью открытия потенциальных скрытых физико-химических процессов или необходимостью точного контроля над свойствами получаемой заготовки.

При внедрении дисперсных частиц при центробежном литье решается элементарная задача о воздействии центростремительного ускорения на тела, попавшие в поле действия массовых сил. Именно это явление позволяет внедрять сразу два типа частиц – более плотные и менее плотные, чем матричный материал. Таким образом, возможно получение сразу двух поверхностей с заданными свойствами. Однако при выдержке темпа литья возможно получение слоеных материалов при дозированной подаче частиц и жидкого металла.

Негативной стороной центробежного литья является образование мелкозернистой корки, которая является частью готового изделия и идет в отход. Это в свою очередь накладывает дополнительные расходы на механическую обработку детали после литья.

Важным вопросом является смачиваемость дисперсного порошка матричным расплавом. Для получения изделия с заданными характеристиками дисперсные частицы должны хорошо смачиваться расплавом, иначе после литья будет получена механическая смесь с выпадением всех внедренных частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы по Соглашению № 075-15-2019-1711 (внутренний номер 05.608.21.0276) от «04» декабря 2019 г. (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60819X0276).

Литература

1. Алексеев, И.А. Модель распределения дисперсных частиц по объему центробежно-литой заготовки / И.А. Алексеев, А.Н. Аникеев // Наука ЮУрГУ. Материалы 70-й научной конференции. – 2018. – С. 820–826.
2. Kostenetskiy, P.S. SUSU Supercomputer Resources / P.S. Kostenetskiy, A.Y. Safonov // Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016). Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1576. – P. 561–573.

3. *Studies on Interfacial Phenomena in Titanium Carbide/Liquid Steel Systems for Development of Functionally Graded Material* / M. Kiviö, L. Holappa, S. Louhenkilpi et.al. // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2016. – Vol. 47 (4). – P. 2114–2122. DOI: 10.1007/s11663-016-0658-1
4. *Novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-powder method* / Y. Watanabe, O. Inaguma, H. Sato et.al. // *Materials*. – 2009. – Vol. 2, iss. 4. – P. 2510–2525. DOI: 10.3390/ma2042510
5. *Fabrication of Al/Al₃Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method* / S. El-Hadad, H. Sato, E. Miura-Fujiwara et.al. // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 50, iss. 1. – P. 2. #01AJ02. DOI: 10.1143/JJAP.50.01AJ02
6. *О влиянии дисперсных частиц карбидов на структуру центробежно-литых заготовок* / А.Н. Анিকেев, В.И. Чуманов, Н.Т. Карева, А.А. Окулов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2011. – Вып. 16, № 14. – С. 48–50.
7. *Аникеев, А.Н. Получение градиентных центробежно-литых стальных заготовок путем введения в кристаллизующийся расплав дисперсных частиц карбидов: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / А.Н. Аникеев. – Челябинск, 2013. – 16 с.
8. *Аникеев, А.Н. Изучение смачиваемости WC расплавом железа различными методами* / А.Н. Аникеев, В.И. Чуманов, И.В. Чуманов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 44–46.
9. *Strong interface adhesion in Fe/TiC* / J.H. Lee, T. Shishidou, Y.J. Zhao et.al. // *Philosophical Magazine*. – 2005. – Vol. 85, iss. 31. – P. 3683–3697. DOI: 10.1080/14786430500199278
10. *Measurement of contact angle and work of adhesion at high temperature* / N. Eustathopoulos, N. Sobczak, A. Passerone et.al. // *Journal of Materials Science*. – 2005. – Vol. 40 (9). – P. 2271–2280. DOI: 10.1007/s10853-005-1945-4
11. *Wildeaj, G. Experimental study of particle incorporation during dendritic solidification* / G. Wildeaj, H. Perepezko // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 283, iss. 1-2. – P. 25–37. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00705-X
12. *Wang, Q. Detection of Non-metallic Inclusions in Centrifugal Continuous Casting Steel Billets* / Q. Wang, L. Zhang // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2016. – Vol. 47, iss. 5. – P. 1594–1612. DOI: 10.1007/s11663-016-0721-y
13. *Wang Q. Determination for the Entrapment Criterion of Non-metallic Inclusions by the Solidification Front During Steel Centrifugal Continuous Casting* / Q. Wang, L. Zhang // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2016. – Vol. 47, iss. 3. – P. 1933–1949. DOI: 10.1007/s11663-016-0661-6
14. *Han, Q. Particle pushing: critical flow rate required to put particles into motion* / Q. Han, J. Hunt // *Journal of Crystal Growth*. – 1995. – Vol. 152. – P. 221–227. DOI: 10.1016/0022-0248(95)00085-2
15. *Catalina, A. A Dynamic Model for Interaction between a Solid Particle and an Advancing Solid/Liquid Interface* / A. Catalina, S. Mukherjee, D. Stefanescu // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2000. – Vol. 31A. – P. 2559–2568. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0200-5>

Алексеев Иван Андреевич, студент 3-го курса, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст; 79058311597@ya.ru.

Аникеев Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст; anikeev-ml@mail.ru.

Седухин Вадим Валерьевич, аспирант, инженер, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст; wadik_zlat@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 марта 2020 г.

MATHEMATICAL MODELING OF MOTION PROCESSES OF DISPERSED PARTICLES IN A LIQUID METAL FLOW AND LOCALIZATION FOREKNOW AT CENTRIFUGAL CASTING

I.A. Alekseev, 79058311597@ya.ru,
A.N. Anikeev, anikeev-ml@mail.ru,
V.V. Sedukhin, wadik_zlat@mail.ru

South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation

Nowadays trends of engineering development involve using of rare and expensive materials. The erosion of natural reserves caused by large-scale technological breakthroughs in the XX century, requires the rational use of the remaining resources and using of resource-saving technologies. The product manufacturing entirely from expensive or low-tech material is impractical due to the fact that the area of the working surface relative to the area of the entire machine part often does not exceed 20–30 %. The volume of material performing the function of a work surface carrier is most rationally made from cheaper and more technologically advanced structural materials that meet the requirements for maintaining the applied load. The solution to this problem is creating machine parts, which have a single system with the absence of any clear phase boundaries and a uniform gradient distribution of reinforcing particles in the metal body. Mathematical modeling of technological processes is one of the most needed procedure to increase production efficiency for reducing costs for eliminating the unsuccessful experiments results, emergency situations and optimization of technological processes. Introduced micro dispersed ceramics of titanium, tungsten, silicon carbides and other elements, which give unique characteristics for the working surfaces by steel casting in terms of resistance to thermal and physical loads, thereby increasing hardness, wear resistance and resistance to elevated temperatures during operation, while more viscous and the elastic iron body for ensuring the resistance to shock and alternating loads. A review of existing mathematical models of the solid dispersed particles motion process in a fluid stream is performed. The systems acting as analogues of the interaction system “steel – tungsten carbide – titanium carbide” are considered.

Keywords: dispersed carbides, dispersed particles, mathematical modeling, metal hardening, wettability.

References

1. Alekseev I.A., Anikeev A.N. [Dispersed particles distribution model in centrifugal casting billet]. *SUSU Science, Materials of 70th science conference*, 2018, pp. 820–826. (in Russ.)
2. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources. *Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016). Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. CEUR Workshop Proceedings*, 2016, vol. 1576, pp. 561–573.
3. Kiviö M., Holappa L., Louhenkilpi S. et.al. Studies on Interfacial Phenomena in Titanium Carbide/Liquid Steel Systems for Development of Functionally Graded Material. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2016, vol. 47 (4), pp. 2114–2122. DOI: 10.1007/s11663-016-0658-1
4. Watanabe Y., Inaguma O., Sato H. et.al. Novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-powder method. *Materials*, 2009, vol. 2, iss. 4, pp. 2510–2525. DOI: 10.3390/ma2042510
5. El-Hadad S., Sato H., Miura-Fujiwara E. et.al. Fabrication of Al/Al₃Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 50, iss. 1, pp. 2. #01AJ02. DOI: 10.1143/JJAP.50.01AJ02
6. Anikeev A.N., Chumanov V.I., Kareva N.T., Okulov A.A. About influence of Disperse Particles of Carbides on Structure of Centrifugal-Cast Billets. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2011, iss. 16, no. 14, pp. 48–50. (in Russ.)

7. Anikeev A.N. *Polucheniye gradiyentnykh tsentrobezhno-litykh stal'nykh zagotovok putem vvodeniya v kristallizuyushchiysya rasplav dispersnykh chastits karbidov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Making gradient centrifugal casting billets by injection dispersed carbide particles to crystalizing melt. Dissertation abstract]. Chelyabinsk, 2013, pp. 16.

8. Anikeev A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. Study of Wettability of WC with Iron Melt by Different Methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 44–46. (in Russ.)

9. Lee J.H., Shishidou T., Zhao Y.J. et.al. Strong interface adhesion in Fe/TiC // *Philosophical Magazine*, 2005, vol. 85, iss. 31, pp. 3683–3697. DOI: 10.1080/14786430500199278

10. Eustathopoulos N., Sobczak N., Passerone A. et.al. Measurement of contact angle and work of adhesion at high temperature. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40 (9), pp. 2271–2280. DOI: 10.1007/s10853-005-1945-4

11. Wildeaj G., Perepezko H. Experimental study of particle incorporation during dendritic solidification. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, vol. 283, iss. 1-2, pp. 25–37. (DOI: 10.1016/s0921-5093(00)00705-x

12. Wang Q., Zhang L. Detection of Non-metallic Inclusions in Centrifugal Continuous Casting Steel Billets. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, vol. 47, iss. 5, pp. 1594–1612. DOI: 10.1007/s11663-016-0721-y

13. Wang Q., Zhang L. Determination for the Entrapment Criterion of Non-metallic Inclusions by the Solidification Front During Steel Centrifugal Continuous Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, vol. 47, iss. 3, pp. 1933–1949. DOI: 10.1007/s11663-016-0661-6

14. Han Q., Hunt J. Particle pushing: critical flow rate required to put particles into motion. *Journal of Crystal Growth*, 1995, vol. 152, pp. 221–227. DOI: 10.1016/0022-0248(95)00085-2

15. Catalina A., Mukherjee S., Stefanescu D. A Dynamic Model for Interaction between a Solid Particle and an Advancing Solid/ Liquid Interface. *Metallurgical and materials transactions A*, 2000, vol. 31A, pp. 2559–2568. DOI: 10.1007/s11661-000-0200-5

Received 3 March 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Алексеев, И.А. Математическое моделирование процессов движения дисперсных частиц в потоке жидкого металла и прогнозирование их локализации при центробежном литье / И.А. Алексеев, А.Н. Анিকেев, В.В. Седухин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 21–32. DOI: 10.14529/met200303

FOR CITATION

Alekseev I.A., Anikeev A.N., Sedukhin V.V. Mathematical Modeling of Motion Processes of Dispersed Particles in a Liquid Metal Flow and Localization Foreknow at Centrifugal Casting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 21–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200303