DOI: 10.24892/RIJIE/20250407

Моделирование распределения ультрадисперсных частиц карбида титана, вольфрама и циркония при центробежном литье*

Аникеев А.Н.
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
anikeevan@susu.ru

Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н.
НАО «Рудненский индустриальный университет»
г. Рудный, Республика Казахстан
sergey_legnev@mail.ru

Аннотация. **Моделирование процессов, связанных с введением дисперсных частиц в жидкие металлы, представляет собой важный инструмент для оптимизации производственных технологий и улучшения качества конечных продуктов в металлургии. Особенно актуальным это направление становится в контексте методов дисперсного упрочнения металлов, когда ультрадисперсные частицы вводятся в кристаллизующийся расплав для увеличения его прочностных характеристик. Тем не менее, управление процессом распределения этих частиц остается сложной задачей, поскольку их поведение трудно контролировать напрямую. В статье предложена компьютерная модель, позволяющая прогнозировать распределение частиц при центробежном литье, за счет разницы плотностей частиц и металла, а также расчета влияющих на систему воздействий. Также проведен ряд моделирований распределения ультрадисперсных частиц карбида титана, вольфрама и циркония по сечению заготовок толщиной от 20 до 40 мм.**

***Ключевые слова*: моделирование процессов, ультрадисперсные частицы, кристаллизующийся расплав, центробежное литье.**

Введение

Введение дисперсных частиц в металл является перспективным направлением для улучшения его механических свойств, таких как прочность, твердость и износостойкость [1-4]. Этот метод позволяет создавать композиционные материалы с уникальными характеристиками за счет равномерного или контролируемо-неравномерного распределения нано- или микрочастиц в металлической матрице [5-9]. В результате получается материал, который может выдерживать более высокие нагрузки и температуры по сравнению с традиционными сплавами. Исследования в этой области активно ведутся как в России, так и за рубежом.

Одним из перспективных подходов к решению проблемы управления распределением частиц является использование разницы в плотности между частицами и металлом, а также регулирование этого процесса посредством изменения скорости вращения изложницы на машинах центробежного литья (МЦЛ). Этот подход позволяет создать условия, при которых центробежная сила способствует более равномерному распределению частиц в объеме расплава, что положительно влияет на прочность и долговечность конечного изделия. Множество исследований в этой области посвящено упрочнению цветных металлов частицами карбидов кремния, оксидов алюминия и другими, что подтверждает перспективность метода [10-17].

Актуальность

Исследователи всего мира активно используют моделирование в своей работе: объем рынка программного обеспечения для моделирования оценивается в 12,12 млрд долларов США в 2024 году и, как ожидается, достигнет 21,43 млрд долларов США к 2029 году, а среднегодовой темп роста составит 12,06% в течение прогнозируемого периода (2024-2029 гг.) [18].

В работе [19] в целом представлен обзор современных методов моделирования процессов, применяемых при изготовлении металломатричных композитов. Рассмотрены различные подходы к моделированию, включая моделирование методом конечных элементов, методом конечных объемов, методом дискретных элементов, а также моделирование молекулярной динамики. Особое внимание уделено моделированию процессов литья, экструзии, прокатки и порошковой металлургии. Рассмотрены различные подходы к моделированию, их преимущества и недостатки, а также примеры успешного применения моделирования. Авторы не фокусируются именно на центробежном литье, но среди прочих описывают и этот метод.

Поиск статей по моделированию МЦЛ показал, что численное моделирование процессов центробежного литья может проводиться в различных программных пакетах. В статьях [20, 21] представлены данные о использовании программы “ProCAST” для моделирования процесса гильз цилиндров и при совместном литье многослойных металлических валков. Представленные модели учитывают теплофизические свойства материалов, теплообмен на границе “металл-форма”, скорости заливки, вращения формы и время охлаждения. Несмотря на высокую сходимость результатов моделирования с реальными экспериментами

* Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23485709). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

(более 95%), анализ данных статей показывает, что возможности моделирования с помощью “ProCAST” ограничены интерфейсом: программа не поддерживает одновременную симуляцию гравитационного и центробежного этапов и требуется ручное разделение процесса.

В работе [22] представлена вычислительная модель вертикального центробежного литья, предназначенная для адекватного отражения динамики потока «жидкость-газ» в сочетании с термическим затвердеванием. Модель была построена в программе «PHYSICA». Факторы, которые учитывает модель: динамику жидкости и газа (используя уравнения Навье-Стокса), теплопередачу и затвердевание (используя уравнение теплопередачи с учетом выделения скрытой теплоты во время фазового перехода), а также влияния турбулентности на поток. Отличительной особенностью модели является то, что модель способна моделировать захват воздуха во время процесса литья, что позволяет выявлять потенциальные источники дефектов. Стоит отметить, что авторы адаптировали данную модель из модели, описывающей процессы горизонтального центробежного литья детали со сложной геометрией [23], учитывающую центробежные силы при горизонтальном литье и силы поверхностного натяжения. Модель позволяет оценить влияние различных параметров процесса на качество отливки, а также прогнозировать структуру материала в различных участках отливки, что необходимо для определения механических свойств и эксплуатационных характеристик изделия.

Ряд авторов для моделирования использует модель «Ansys Fluent». В исследовании [24] авторы предположили, что существует зависимость между параметрами процесса вертикального центробежного литья (скорость вращения, аспектное отношение, вязкость жидкости) и качеством получаемой отливки. Для проверки гипотезы было проведено холодное моделирование (использовались прозрачные формы и жидкости с различной вязкостью, такие как вода, глицерин, масло и разработана модель в «Ansys Fluent». При построении модели учитывались центробежная сила и сила тяжести, многофазность (применялась модель «Volume of Fluid») для отслеживания свободной поверхности жидкости, скорость вращения, а также форма заготовки. Для снижения вычислительных затрат модель была упрощена до 2D-симметричной. По результатам авторы делают вывод о результаты численного моделирования в «Ansys Fluent» согласуются с результатами экспериментов по холодному моделированию.

Авторы исследования [25] – J.W. Gao и C.Y. Wang занимались численным моделированием процесса кристаллизации функционально градиентных материалов (ФГМ) при вертикальном центробежном литье. Основная цель исследования заключалась в изучении взаимодействия между фронтом кристаллизации и миграцией частиц в процессе кристаллизации. Модель была построена на основе общей многокомпонентной модели, для решения уравнений модели применялся метод конечных объемов с фиксированной сеткой. Факторы, учитываемые в модели: температурное распределение и объемная доля частиц в процессе кристаллизации, геометрия и угловая скорость, размер частиц, начальная концентрация, скорость вращения, скорость охлаждения и перегрев. Результаты моделирования показали неоднородность распределения частиц по сечению (наличие зоны без частиц в пределах внутренней области отливки, за которой следовала область с градиентным распределением частиц к наружной стенке). Основным недостатком модели является ряд упрощений (например, одномерная кристаллизация), а также модель не учитывает процесс взаимодействия между частицами и фронтом кристаллизации.

В работе [26] авторы для моделирования разработали собственный софт на “C++” для моделирования распределения карбидов при литье высоколегированной быстрорежущей стали с повышенным содержанием ванадия, молибдена и углерода. Основная цель исследования - анализ распределения эвтектических карбидов MC (на основе ванадия, ниобия) в стальной матрице и их влияния на свойства продукта. На основе проведенной работы авторы наблюдали сегрегация карбидов вызванную разницей в плотности расплава стали и эвтектических фаз MC. У стенки формы MC-фазы отсутствуют ввиду быстрого охлаждение, в переходной зоне наблюдаются единичные MC-кластеры, в центральной части высокая концентрация MC, на внутреннем слое остаточные карбиды. Данная работа хоть и учитывает фазы, выпадающие из пересыщенного раствора, в точности подтверждает возможность распределения частиц по объему для формирования ФГМ. Еще одним подтверждением сегрегации частиц для изготовления ФГМ является работа [27], в которой моделируется создание композитов Al2O3-Ni. Моделирование проводилось с использованием метода дискретных элементов (DEM) в открытой среде “MUSEN”. При моделировании учитывались взаимодействия между частицами и стенками формы, а также силы, действующие на частицы в жидкости. Для описания контактных взаимодействий использовалась модель Герца-Миндлина. Взаимодействие частица-жидкость описывается уравнениями, учитывающими силу трения, центробежную силу и силу всплытия. В результате моделирования было установлено, что скорость вращения и средний диаметр частиц оказывают наибольшее влияние на время формирования отливки, а сегрегация частиц по размерам незначительна, если разница в размерах частиц составляет менее одного порядка.

Некоторые исследователи для моделирования предпочитают использовать свои разработки [28] в сочетании с программными пакетами [29]. Так, в [28] авторами используется упрощенная форма уравнений Навье-Стокса, применяемая для моделирования потоков, где горизонтальные масштабы значительно больше вертикальных. В данном случае, это позволяет упростить задачу, рассматривая средние по толщине значения скорости и давления. Авторы модифицировали стандартные уравнения для учета специфических особенностей центробежного литья: добавили члены, учитывающие влияние этих сил на движение расплава во вращающейся системе координат, учли трение расплава о стенки формы, а также влияние гравитации, особенно при анализе возможных вибраций формы. Для решения уравнений используется конечно-разностная схема второго порядка. Это означает, что пространственные и

временные производные аппроксимируются с использованием разностных формул, обеспечивающих достаточную точность при умеренных вычислительных затратах.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка численной модели, которая способна предсказать распределение дисперсных частиц в процессе разливки на МЦЛ с учетом различий в плотности частиц и металла, а также влияния скорости вращения изложницы. Такая модель позволит значительно сократить время и затраты на разработку новых сплавов и технологических режимов, обеспечивая при этом высокое качество конечной продукции.

Теоретическая часть

Компьютерная модель процесса кристаллизации стали при центробежном литье с введением упрочняющих частиц разработана для изучения динамики распределения дисперсных частиц в процессе затвердевания металла. Основными задачами данной модели являются:

Оценка влияния массы и размеров частиц на их распределение в объеме жидкой кристаллизующейся стали.

Анализ влияния концентрации частиц на физико-механические характеристики полученного материала и особенности их распределения.

Изучение вопросов смачивания частиц порошковых композиций различными видами матричного жидкого металла.

Определение оптимальных температурных режимов процесса литья для достижения наилучшего соответствия реальных параметров расчетным данным.

Модель создается в среде компьютерного инжиниринга (CAE) с использованием программного пакета «ANSYS Fluent». Процесс разработки включал пять ключевых этапов:

1) геометрическая проекция;

2) сеточная дискретизация;

3) настройка физической модели воздействия (предварительная обработка физических данных);

4) итерационное решение уравнений.

5) анализ полученных результатов (постпроцессинг).

Геометрическая модель включает три основных компонента:

1) цилиндрическая вращающаяся изложница;

2) тороидальный носок;

3) цилиндрический ковш с коническим днищем.

Изложница представлена в виде горизонтально ориентированного цилиндра. Правый торец изложницы оснащен отверстием, которое посредством тороидального носка соединяет её с ковшом. Изложница вращается вокруг своей продольной оси со скоростью от 500 до 1000 об/мин.

Носок выполнен в виде четверти тора, чьи концы обеспечивают соединение изложницы с ковшом.

Ковш имеет цилиндрическую форму, дополненную элементом в виде усечённого конуса, который служит днищем ковша. Такая конструкция предотвращает застревание остатков жидкого металла в ковше при его опорожнении.

В качестве элементарного элемента сетки, на этапе сеточной дискредитации, был выбран тетраэдр, форма которого является оптимальным вариантом для генерации сеток для тел вращения. Совокупность тетраэдров, покрывающая элемент по длине окружности и при заполнении внутренних полостей обеспечивает наилучший показатель ортогональности углов элементарных фигур, нежели элементарные кубы, принятые за эталон для формирования сеток для прямоугольных параллелепипедов.

В процессе генерации сетки были определены следующие граничные состояния: вся модель представляет собой единую расчетную область (домен), которая содержит в себе внутренние объемы и границы объемов (стенки). Далее представлен перечень всех основных элементов расчетной области:

- Interior-mold (объем изложницы);
- Interior-sock (объем тороидального носка);
- Interior-bottom (объем конусного днища ковша);
- Interior-metal (объем цилиндрического ковша);
- Wall-mold (обечайка и торцы изложницы);
- Wall-sock (обечайка носка);
- Wall-bottom (обечайка днища ковша);
- Wall-metal (обечайка и торец ковша).

Среди общих настроек среды можно выделить, что тип решателя основан на принципе измерения давления среды, время решения – длящееся, учтено влияние гравитационного притяжения Земли, выражающееся величиной ускорения свободного падения ($g = 9{,}81$ м/с^2). Предложенная модель описывает поведение определённого объёма жидкости в ограниченном пространстве. Примером может служить переливание воды из одного резервуара в другой через соединяющий канал.

Модель рассматривает взаимодействие двух жидких фаз: воздуха и стального расплава. Межфазовое взаимодействие описано уравнением поверхностного натяжения, где коэффициент поверхностного натяжения между жидкой сталью и воздухом принят равным 1,5 Н/м.

Основной принцип работы модели объёмной жидкости заключается в контроле состояния элементарной ячейки. В математическом плане существует дробная функция C, представляющая результат интегрирования характеристических функций жидкости в объёме. Если ячейка сетки полностью заполнена жидкостью, то значение C для этой ячейки равно 1, в противном случае — 0. Значения C могут варьироваться от 0 до 1, отображая степень заполнения ячейки жидкостью. Этот алгоритм выполняет только мониторинговую функцию, позволяя следить за реальной картиной процесса, но сам по себе не является окончательной методикой расчёта.

Отличительной особенностью модели является, что она отслеживает движение дисперсных частиц путем сложения всех действующих сил на частицу: скорость движения потока фазы, скорость движения частицы, молекулярную вязкость жидкости (динамическую), плотность жидкости, плотность дисперсной частицы, диаметр дисперсной частицы, добавочные силы (центростремительная, термофоретическая и пр.), число Рейнольдса, определяющее характер потока (ламиллярный или турбулентный), коэффициент трения. Помимо этих воздействий модель учитывает добавочные силы, центростремительные силы (описывается как воздействие на дисперсную частицу в результате ее нахождения в поле массовых сил в двухмерной плоскости), силу всплытия, а также процессы затвердевания/плавление через расчет энтальпии преобразования вещества с помощью коэффициентов теплоемкости.

Практическая часть

В ходе моделирования учтены как размеры элементов модели, так и различные параметры.

Размеры и внутренние объемы каждого из элементов модели составили:

1) изложница: длина 220 мм, диаметр 200 мм, объем 0,0069115 м3, площадь поверхности 0,20106 м2;

2) носок: диаметр 50 мм, объем 0,00023137 м3, площадь поверхности 0,22432 м2;

3) ковш: высота 170 мм, диаметр 100, объем 0,0013352м3, площадь поверхности 0,069115 м2;

4. коническое днище ковша: объем 0,00013744 м3, площадь поверхности 0,019019 м2.

Технологические параметры:

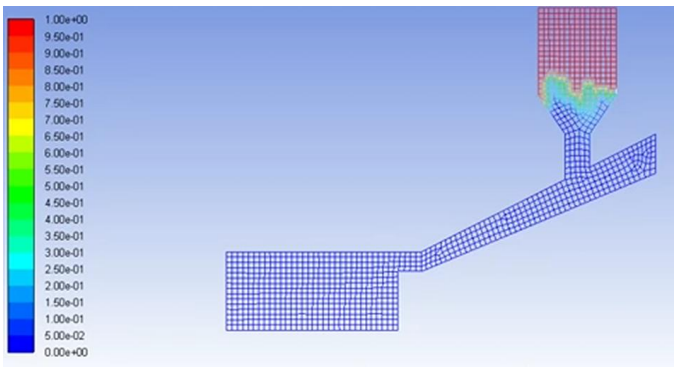
1. вращающаяся изложница выполнена из ст.20, вращается со скоростью 600 об/мин;

2. материал сталезаливочного носка – шамот;

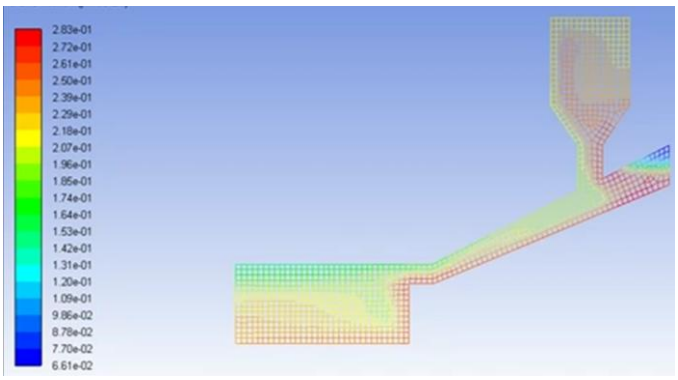
3. материал цилиндрического ковша со стальным расплавом – шамот, материал стенки – шамотный кирпич, температура стенки – 2000 К. Параметры материалыов представлены в табл. 1;

4. плотность частиц WC, ZrC и TiC принята 15630, 6730 кг/м^3 и 4920 кг/м^3, соответственно; размеры частиц 2-10 мкм.

В ходе моделирования было проведено 6 итераций моделирования с различными толщинами выливаемой заготовки: от 20 мм до 40 мм толщиной. В каждую из заготовок 12Х18Н10Т добавлялся 1% частиц карбида титана, карбида вольфрама или карбида циркония. Различные моменты моделирования представлены на рис.1.



а



б

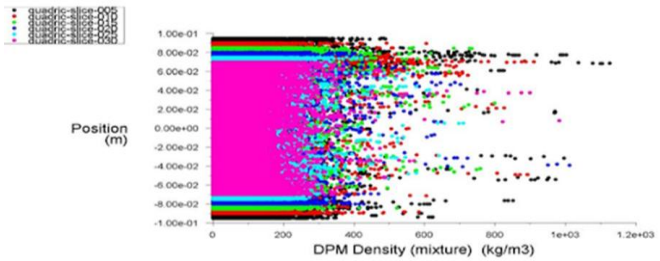
Рис. 2. Распределение температурных полей в начале разливки (*а*) и в конце (*б*)

Таблица 1

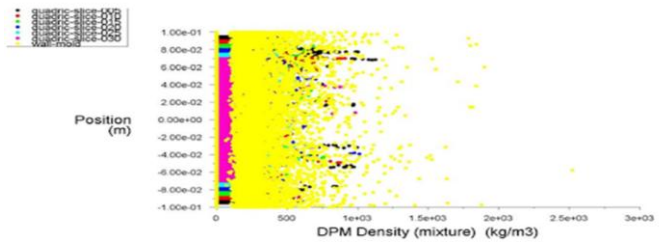
Параметры материалов

Параметр	Сталь 12Х18Н10Т	Атмосферный воздух	Шамот	Ст. 20
Плотность, кг/м3	7800	1,225	1850	8030
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	660	1006,43	880	502,48
Теплопроводность, Вт/м·К	25	0,0242	1,2	16,27
Динамическая вязкость, кг/м·с	0,006	1,81·10-5	-	-
Молярная масса, г/моль	54,98	29	-	-
Энтальпия образования, Дж/кг·моль	2,3·107	-	-	-
Температура инициализации, К	2000	300	-	-
Температура солидус, К	1753	-	-	-
Температура ликвидус, К	1803	-	-	-

В результате проведенного моделирования были получены массивы данных, необходимых для анализа. Все результаты моделирования представлены в графическом виде в виде скриншотов, графиков и таблицах. Пример расчета распределения представлен на рис. 2



а



б

Рис. 2. Распределение дисперсных частиц по концентрическим цилиндрическим сечениям по оси Z, оцениваемое по количеству частиц в элементарной клетке расчетной сетки:
а – слои без учета внешней корки;
б – слои с учетом внешней корки

Заключение

1. Разработана компьютерная модель распределения дисперсных частиц по сечению цилиндрических отливок с целью прогнозирования распределения дисперсных частиц в сталях для получения гетерофазных сталей, обладающих градиентом свойств.

2. Модель реализована в программной среде "Ansys" и позволяет прогнозировать распределение до 40 миллиардов частиц одновременно в каждый момент разливки на машине горизонтального литья. С использование мощностей ЦКП "Суперкомпьютерное моделирование" (уникальной научной установки «Суперкомпьютер «СКИФ-Аврора») проведено моделирование степени распределения частиц в зависимости от различных факторов и технологических параметров.

3. Проведено несколько итераций моделирования с заготовками толщиной от 20 до 40 мм из стали 12Х18Н10Т с введением дисперсных частиц карбидов вольфрама, титана и циркония. По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- вне зависимости от плотности частиц и размеров отливаемой заготовки, при подаче частиц на струю в первые моменты разливки происходит кристаллизация частиц на внешней стороне формируемой заготовки;
- после кристаллизации корковой зоны толщиной 5 мм условия теплоотвода изменяются и для частиц с плотностью меньше плотности металла (в нашем случае карбид титана) создаются условия для перемещения во внутренние слои заготовки;
- с увеличением толщины до 40 мм распределение частиц карбида титана носит более выраженный характер: насыщены поверхностные слои, относительно малое количество частиц в ½ радиуса заготовки и насыщены внутренние слои;
- для частиц карбида циркония, имеющим незначительное отличие по плотности от плотности металла, в заготовках толщиной 20 мм также наблюдается насыщенность в поверхностных слоях и достаточно равномерное распределение по сечению остальной заготовке с незначительным уменьшением к внутренним поверхностным слоям. По всей видимости это связано с замедленной ё более выраженный характер: примерно до 1/2 радиуса с внешней стороны слои насыщены частицами достаточно равномерно, в то время как начиная с ½ радиуса до внутренней поверхности наблюдается резкое уменьшение количества частиц;
- для карбида вольфрама, имеющего значительно большую плотность, чем металл, в заготовках 20 и 40 мм моделирование показало, что частицы имеют большую плотность в внешних поверхностных слоях, после чего их количество равномерно уменьшается по направлению к внутренним слоям (при условии равномерного введения в кристаллизующуюся заготовку). С увеличением толщины заготовки до 40 мм концентрация карбидов вольфрама также равномерно снижается от внешней стороны к внутренней;
- распределение карбидов неравномерно не только по толщине заготовок, но и по длине: во всех итерациях наблюдается повышенное содержание на торцах отливок в поверхностных слоях, что связано с гидродинамикой заполнения ванны. Повышенная концентрация резко снижается до стабильного уровня уже через 5 мм от торца. Данный факт необходимо учитывать при проведении экспериментальных отливок: в случае подтверждения распределения на экспериментальных образцах необходимо предусмотреть зачистку торцев на глубину до 5 мм:
- результаты проведенного моделирования демонстрируют хорошее соответствие с литературными источниками в отношении распределения частиц и формирования градиента свойств в создаваемом материале. Полученные данные подтверждают эффективность использованных методов моделирования для предсказания характеристик функционально-градиентных материалов. Моделирование позволяет детально проанализировать процессы, происходящие во время формирования материала, такие как распределение компонентов и изменение физических свойств. Это делает возможным оптимизацию производственных процессов и улучшение качества конечного продукта. Таким образом, исследование подтверждает надежность предложенных подходов и открывает перспективы для дальнейшего развития технологий создания функционально-градиентных материалов.

Литература

1. Watanabe Y. A Novel Fabrication Method for Functionally Graded Materials under Centrifugal Force: The Centrifugal Mixed-Powder Method" / Yoshimi Watanabe, Yoshifumi Inaguma, Hisashi Sato, Eri Miura-Fujiwara // Materials. – 2009. – 2(4). – P. 2510-2525.

2. Минько Д.В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами. – Минск: БНТУ, 2020. – 450 с.

3. Niino M. The functionally gradient materials / M. Niino, T. Hirai, R. Watanabe // J. Jpn. Soc. Compos. Mater. – 1987. – 13. – P. 257-264.

4. Kieback B. Processing techniques for functionally graded materials / B. Kieback, A. Neubrand, A. Riedek // Mater. Sci. Eng. – 2003. – 362. – P. 81-105.

5. Ogawa T. Theoretical study of fabrication of functionally graded material with density gradient by a centrifugation solid-particle method / T. Ogawa et al. // Composites: Part A. – 2006. – 37. – P. 2194-2200.

6. Suresh S. Fundamentals of Functionally Graded Materials / S. Suresh, A. Mortensen // Processing and Thermomechanical Behaviour of Graded Metals and Metal-Ceramic Composites. – London, UK, 1998. – P. 3-80.

7. Miyamoto Y. Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications / Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, R.G. Kawasaki, R.G. Ford // Kluwer Academic Publishers. – Boston, MA, USA, 1999. – P. 161-245.

8. Uemura S. Development and Technology of Functionally Graded Materials / S. Uemura, Y. Noda, Y. Shinohara, Y. Watanabe. – Tokyo, Japan, 2009. – P. 1-67.

9. Eremin E.N. Application of inoculating modification at electroslag casting of tubes from alloy ХН38ВТ / E.N. Eremin, S.N. Zherebtsov // Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy). – 2003. – (2). – P. 68-71.

10. Lee J.E. Synthesis of Nano-sized Al Doped TiO2 Powders Using Thermal Plasma / J.E. Lee, S.-M. Oh, D.-W. Park // Thin Solid Films. – 2004. – 457. – P. 230-234.

11. Jin X. Microstructure and mechanical properties of ZrO2/NiCr functionally graded materials / X. Jin et al. // Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – 509. – P. 63-68.

12. Inaguma Y. Fabrication of Al-based FGM Containing TiO2 Nano-Particles by a Centrifugal Mixed-Powder Method / Y. Inaguma, H. Sato, Y. Watanabe // Mater. Sci. Forum. – 2010. – 631-632. – P. 441-447.

13. Sato H. Fabrication of Cu-based Functionally Graded Materials Dispersing Fine SiC Particles by a Centrifugal Mixed-Powder Method / H. Sato, Y. Inaguma, Y. Watanabe // Mater. Sci. Forum. – 2010. – 638-642. – P. 2160-2165.

14. Watanabe Y. Micro-hardness Measurements to Evaluate Composition Gradient by in Metal-Based Functionally Graded Materials / Y. Watanabe, N. Yamanaka, Y. Oya-Seimiya, Y. Fukui // Z. Metallkd. – 2001. – 92. – P.53-57.

15. Sato H. Grain Refinement Performance of Aluminum Cast-Alloy by Deformed Al-Al3Ti Alloy Refiner / H. Sato, K. Ota, Z. Zhang, K Tsuzaki, Y. Watanabe // Mater. Sci. Forum. – 2006. – 519-521. – P. 1859-1864.

16. Stangle G.C. FGM Fabricated by Combustion Synthesis / G.C. Stangle, Y. Miyamoto // MRS Bull. – 1995. – 20. – P.52-53.

17. Lin J.S. Toughening Effects of WC/Co Particles and Compressive Surface Stress on (Al2O3–WC/Co)/TiC/Ni Graded Materials / J.S. Lin, Y. Miyamoto, K. Tanihata, R. Yamamoto, R. Tanaka // J. Mater. Sci. – 1998. – 33. – P. 869-876,

18. Анализ размера и доли рынка программного обеспечения для моделирования – тенденции роста и прогнозы (2024-2029) – URL: https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/simulation-software-market (дата обращения 01.03.25).

19. Subhani T. Innovation in Metal Casting Processes: A Review of Metal Matrix Nanocomposites in Metal and Bimetal Castings / Tayyab Subhani, Mohamed Ramadan, Naglaa Fathy, Abdel Khaliq, K.S. Abdel Halim // Crystals. – 2025. – 15. – 191. – P. 1-24.

20. Lu S.-L. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST / Su-Ling Lu, Fu-Ren Xiao, Shuang-Jie Zhang, Yong-Wei Mao, Bo Liao // Applied Thermal Engineering. – 2014. – 73. – P. 512-521.

21. Lu S.-L. Numerical simulation of multilayered multiple metal cast rolls in compound casting process / Su-Ling Lu, Fu-ren Xiao, Zhi-hong Guo, Li-juan Wang, Han-yun Li, Bo Liao // Applied Thermal Engineering. – 2016. – 93. – P. 518-528.

22. Humphreys N.J. Modelling and validation: Casting of Al and TiAl alloys in gravity and centrifugal casting processes / N.J. Humphreys, D. McBride, D.M. Shevchenko, T.N. Croft, P. Withey, N.R. Green, M. Cross. // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – 37. – P. 7633-7643.

23. Humphreys N.J. Modeling of centrifugal casting processes with complex geometries / N.J. Humphreys, D. Mcbride, T. Croft, D.M. Shevchenko, Nicholas Green, M. Cross // CFD Modeling and Simulation in Materials Processing. – 2012.

24. Sena S. Study of Flow Behaviour in Vertical Centrifugal Casting / Smrutirekha Sena, Sudheer Reddy, B.K. Muralidhara, P.G. Mukunda // Materials Today: Proceedings. – 2020. – 24. – P. 1392-1399.

25. Gao J.W. Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting / J.W. Gao, C.Y. Wang // Materials Science and Engineering A 2000. – 292. – P. 207-215.

26. Song N. Numerical Simulation of Solidification of Work Roll in Centrifugal Casting Process / Nannan Song, Yikun Luan, Yunlong Bai, Z.A. Xu, Xiuhong Kang, Dianzhong Li // J. Mater. Sci. Technol. – 2012. – 28(2). – P. 147-154.

27. Tatianne J. Understanding centrifugal casting in the manufacture of functionally graded materials / Jessica Tatianne Ortiz Florenciano, Alan Ambros, Dachamir Hotza, Sergio Yesid Gomez Gonzalez // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – 42. – P. 7089-7101.

28. Bohacek J. Simulation of Horizontal Centrifugal Casting: Mold Filling and Solidification / Jan Bohacek, Abdellah Kharicha, Andreas Ludwig, Menghuai Wu // ISIJ International. – 2014. – 54(2) . – P. 266-274.

29. Yin J. Numerical modelling of centrifugal casting process. – Stockholm, Sweden^ KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management, 2016. – 49 p.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250407

Modelling of Distribution of Ultradisperse Particles of Titanium, Tungsten and Zirconium Carbide During Centrifugal Casting

Anikeev A.N.
South Ural State University (National Research University)
Chelyabinsk, Russian Federation
anikeevan@susu.ru

Naizabekov A.B., Lezhnev S.N.
NAO 'Rudnyi Industrial University'
Rudnyi, Kazakhstan
sergey_legnev@mail.ru

Abstract. **Modelling of processes related to the introduction of dispersed particles into liquid metals is an important tool for optimizing production technologies and improving the quality of final products in metallurgy. This direction becomes especially relevant in the context of methods of disperse hardening of metals, when ultra disperse particles are introduced into the crystallizing melt to increase its strength characteristics. Nevertheless, controlling the distribution of these particles remains a challenge, as their behavior is difficult to control directly. In this paper, a computer model is proposed to predict the distribution of particles in centrifugal casting, due to the density difference between the particles and the metal, as well as to calculate the influences affecting the system. A number of simulations of distribution of ultra disperse particles of titanium car-bide, tungsten and zirconium over the cross-section of billets with thickness from 20 to 40 mm have also been carried out.**

Keywords: **process modelling, ultra disperse particles, crystallizing melt, centrifugal casting.**