

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПО СЕЧЕНИЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ\*

*Аникеев А.Н., к.т.н., доцент кафедры «Техника и технологии производства материалов» (anikeevan@susu.ru)*

*Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов» (chumanoviv@susu.ru)*

*Алексеев А.И., магистрант кафедры «Техника и технологии производства материалов» (79058311597@ya.ru)*

*Седухин В.В., аспирант, инженер кафедры «Техника и технологии производства материалов» (sedukhinvv@susu.ru)*

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст  
(456209, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

**Аннотация.** В статье представлен процесс создания компьютерной модели для прогнозирования распределения частиц в процессе центробежного литья с помощью программного модуля ANSYS FLUENT 16.0. Для прогнозирования распределения частиц по объему в мире на сегодняшний момент существует несколько математических моделей. Большинство из них основаны на допущении об установившемся состоянии: модели, описывающие критерии отбрасывания частиц растущим фронтом кристаллизации и модели, рассчитывающие критические скорости поглощения частиц растущими дендритными кристаллами. Некоторые модели делают попытку описать динамическое состояние системы или определить критерий улавливания неметаллических включений фронтом затвердевания при центробежной разливке металла. Для разрабатываемой модели описан процесс ее создания, схема и геометрия. Препроцессором модели учтены такие явления, как двухфазное течение, уравнение энергии, ламинарное течение, введение дискретных фаз (упрочняющих частиц), плавление/кристаллизация. Модель учитывает взаимодействие двух жидких фаз: воздуха и стального расплава, межфазное взаимодействие описывается уравнением поверхностного натяжения. В качестве основного металла авторами использована сталь 12X18H10T, в качестве вводимых частиц – карбиды вольфрама, бора и оксид иттрия. При проведении моделирования учтены физико-химические параметры данных веществ. Представлен процесс моделирования распределения частиц при центробежном литье с помощью вычислительного кластера «Скиф-Урал», входящего в ТОП-500 самых мощных компьютеров мира. В результате проведенного моделирования, помимо графического отображения, получены массивы данных, описывающих координаты каждой частицы в каждый момент времени с шагом 0,00001 с, что позволяет прогнозировать точное местонахождение каждой частицы в каждый момент разливки. Результаты работ свидетельствуют о том, что технология центробежного литья с введением дисперсных частиц в процессе разливки позволяет получить дисперсно-упрочненные металлические материалы с прогнозированием распределения тугоплавких частиц.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, ANSYS, центробежное литье, карбид вольфрама, карбид бора, оксид иттрия, упрочненные материалы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-657-664

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач, стоящих перед металлургией и машиностроением, является разработка и внедрение новых металлосберегающих технологий, которые могли бы служить основой получения новых металлических материалов с улучшенными функциональными свойствами. В этом плане несомненно большой интерес представляют литейные технологии, которые благодаря простоте реализации и возможности

получения изделий, близких к конечной продукции, позволяют существенно снизить затраты на последующую металлообработку [1 – 3].

В последние годы актуальность приобретают работы по созданию принципиально новых материалов, в которых искусственно объединены высокопластичные металлические матрицы и тугоплавкие высокопрочные, высокомодульные наполнители [4 – 6]. При таком сочетании фаз достигается значительное повышение несущих способностей улучшенного таким образом материала – высокая износостойкость и задиростойкость, стойкость против абразивного изнашивания и даже к воздействию различных видов излучения [7, 8]. Армирующие наполнители с резко отличной

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы по Соглашению № 05.608.21.0276 от 4.12.2019 г. (уникальный идентификатор RFMEFI60819X0276).

от основной матрицы твердостью не только повышают износостойкость металлических материалов, но и выполняют роль поддерживающих опор, могут существенно снизить потери на трение и расширить диапазон нагружения [9, 10]. В тоже время, для ряда сталей движение дислокаций тормозится введением в металлическую матрицу дисперсных термодинамически стабильных неметаллических (керамических) частиц. При этом, как известно, движение дислокаций аналогично движению вакансий [11].

При упрочнении материалов дисперсными частицами во время разлива основным критерием, обеспечивающим получение задаваемых свойств, выступает распределение частиц по объему получаемых деталей [12, 13]. Одним из перспективных направлений, позволяющих управлять расположением дисперсных частиц при кристаллизации металла, является введение в металл дисперсно-упрочняющих частиц в процессе центробежного литья [14]. При реализации данного способа возникает проблема прогнозирования распределения дисперсных частиц по сечению получаемой заготовки, ввиду чего возникает необходимость в создании компьютерной модели.

Для прогнозирования распределения частиц по объему в мире на сегодняшний момент существует несколько математических моделей. Большинство из них основаны на допущении об установившемся состоянии: модели, описывающие критерии отбрасывания частиц растущим фронтом кристаллизации [13] и модели, рассчитывающие критические скорости поглощения частиц растущими дендритными кристаллами [15].

Некоторые модели делают попытку описать динамическое состояние системы [13] или определить критерий улавливания неметаллических включений фронтом затвердевания при центробежной разливке металла [16]. Отдельные исследователи используют существующие модели не для прогноза распределения вводимых частиц, а для более эффективного удаления существующих оксидных частиц из металла и повышения его свойств [17, 18].

Для построения модели был выбран программный модуль ANSYS FLUENT 16.0 [19, 20]. ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет. Она является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов (САПР или CAE). Также она применяется для решения методом конечных элементов линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. ANSYS

также занимается перспективным бизнесом, создавая инструменты визуализации для быстрорастущего сегмента 3D-печати. Решения ANSYS позволяют проектировать изделия для трехмерной печати из разных материалов, включая лазерную печать SLM из мелкодисперсных металлических порошков. В настоящее время решения ANSYS охватывают практически все сегменты инженерной отрасли: от тяжелого машиностроения, оборонной промышленности и аэрокосмической техники до микроэлектроники, медицины и симуляторов для тестирования программного обеспечения.

## СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ

С точки зрения геометрического построения главным принципом является создание такой модели, которая позволяет осуществить протекание всех физических процессов в заданном масштабе. Необходимо заранее определить роль всех плоскостей модели и, как минимум, создать все необходимые плоскости, предназначенные для ограничения движения веществ или являющихся их источниками или стоками. Дополнительно рекомендуется создавать модель из простейших правильных геометрических фигур для упрощения построения расчетной сетки.

Схема модели представлена на рис. 1. Ее геометрия состоит из трех основных частей: вращающейся изложницы, носка и цилиндрического ковша с коническим дном. Сетка конечных элементов тетраэдрическая. Минимальный размер ячейки составляет 0,0855 мм, максимальный размер ячейки – 3 мм. Минимальный коэффициент ортогональности элементов 0,24.

Препроцессор модели учитывает следующие явления: двухфазное течение, уравнение энергии, ламинарное течение, введение дискретных фаз (упрочняющих частиц), плавление/кристаллизация. В процессе разлива взаимодействуют фазы (жидкие) следующего состава:

- основная фаза – жидкий расплав коррозионностойкой стали (08X18H10T);
- вторичная фаза – воздушная атмосфера;
- дискретные фазы – частицы дисперсных карбидов WC,  $V_4C$  и оксида  $Y_2O_3$ .

Изложница выполнена в виде горизонтально расположенного цилиндра. На правом торце изложницы сделано отверстие, соединяющее ее с ковшом через тороидальный носок. Носок выполнен в виде четверти тороидального кольца, концы которого соединяют изложницу с ковшом. Изложница совершает вращение вокруг своей оси со скоростью в пределах от 500 до 1000 оборотов в минуту.

Ковш имеет цилиндрическую форму, а также дополнительный элемент, являющийся дном ковша, выполненным в виде усеченного конуса для предотвращения возникновения остатка жидкого металла в ковше при его опустошении.

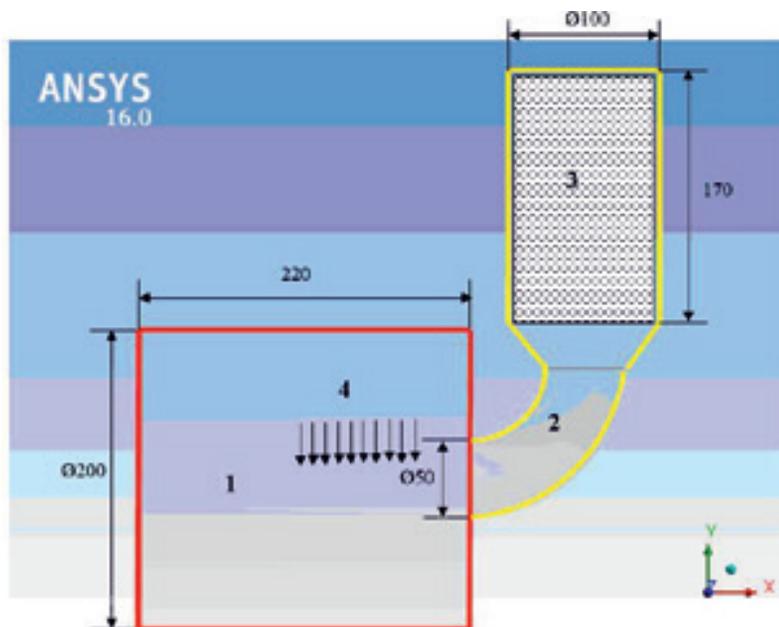


Рис. 1. Схема модели разливки с основными размерами, мм:

- 1 – вращающаяся изложница (материал стенки – сталь 20, температура стенки – 1000 К, скорость вращения ~600 об/мин);  
 2 – носок (материал стенки – шамотный кирпич, температура стенки – 2000 К); 3 – цилиндрический ковш со стальным расплавом  
 (материал стенки – шамотный кирпич, температура стенки – 2000 К); 4 – инжекторы дисперсных карбидов

Fig. 1. Scheme of the model of casting with the main dimensions in millimeters:

- 1 – rotating mold: wall material – steel 20, wall temperature – 1000 K, rotation speed ~600 rpm; 2 – sock: wall material – fireclay brick, wall temperature – 2000 K; 3 – cylindrical ladle with steel melt: wall material – chamotte brick, wall temperature – 2000 K; 4 – dispersed carbide injectors

В модели присутствуют объекты с округлой формой внешней поверхности, за исключением торцов изложницы и ковша. Это необходимо для создания сетки конечных элементов достаточного качества. Несмотря на то, что на первый взгляд было бы логично оставить тело разливочного носка и ковша в форме правильных параллелепипедов, опыт показывает, что генератор сетки не может выполнить сетку достаточного качества для элементов такой формы. Также в дополнение к этому существовала бы необходимость создания переходных элементов с круглыми и прямоугольными торцами одновременно, что вызывает дополнительную сложность в генерации сетки по причине того, что для объектов круглой и прямоугольной форм оптимальная форма простейшей ячейки отличается по числу углов объемной фигуры (простейшей ячейки). По этой причине суммарный максимальный коэффициент ортогональности модели снижается, что является одним из основных критериев оценки качества расчетной сетки.

Модель учитывает взаимодействие двух жидких фаз: воздуха и стального расплава. Межфазное взаимодействие описывается уравнением поверхностного натяжения. Коэффициент поверхностного натяжения между жидкой сталью и воздухом взят 1,5 Н/м.

Принцип работы модели объема жидкости заключается в отслеживании состояния элементарной ячейки. В математическом смысле существует некоторая дробная функция  $C$ , которая является результатом ин-

тегрирования характеристических функций жидкости в объеме. Если объем внутри элементарной ячейки сетки полностью заполнен, то  $C$  для данной ячейки равен 1, иначе 0. Функция  $C$  может принимать промежуточные значения от 0 до 1, которые выражают степень заполненности клетки жидкостью.

Данный алгоритм выполняет лишь отслеживающую роль, что позволяет наблюдать действительную картину процесса в целом, но не является конечным алгоритмом расчета.

В качестве используемых материалов были взяты сталь 12X18H10T (основной металл), карбид вольфрама  $WC$ , карбид бора  $B_4C$ , оксид иттрия  $Y_2O_3$ . Физико-химические параметры данных веществ также учитывались при проведении моделирования.

## ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование производилось с использованием мощностей ЦКП «Суперкомпьютерное моделирование» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

В результате проведенного моделирования были получены массивы данных, необходимых для анализа. Все результаты моделирования представлены далее в графическом виде. Сведения носят описательный характер о распределении частиц внутри литой заготовки. Далее на рис. 2, 4, 6 представлены общие картины распределения частиц  $B_4C$ ,  $Y_2O_3$ ,  $WC$  соответственно. На

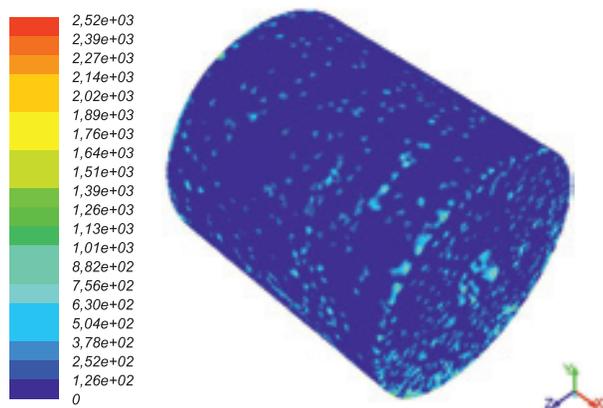


Рис. 2. Общая картина распределения частиц  $B_4C$  в момент 2,5 с

Fig. 2. General view of the distribution of  $B_4C$  particles at the moment of 2.5 seconds

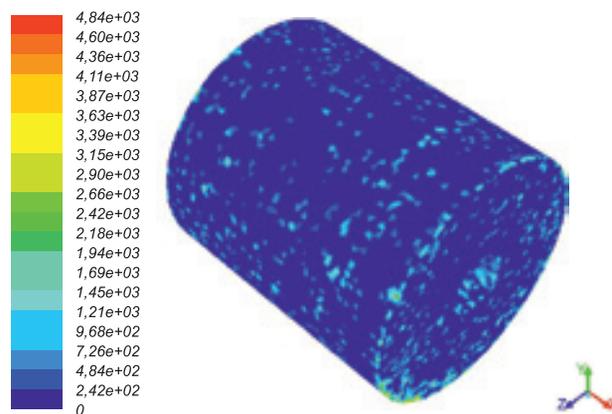


Рис. 4. Общая картина распределения частиц  $Y_2O_3$  в момент 2,5 с

Fig. 4. General view of the distribution of  $Y_2O_3$  particles at the moment of 2.5 seconds

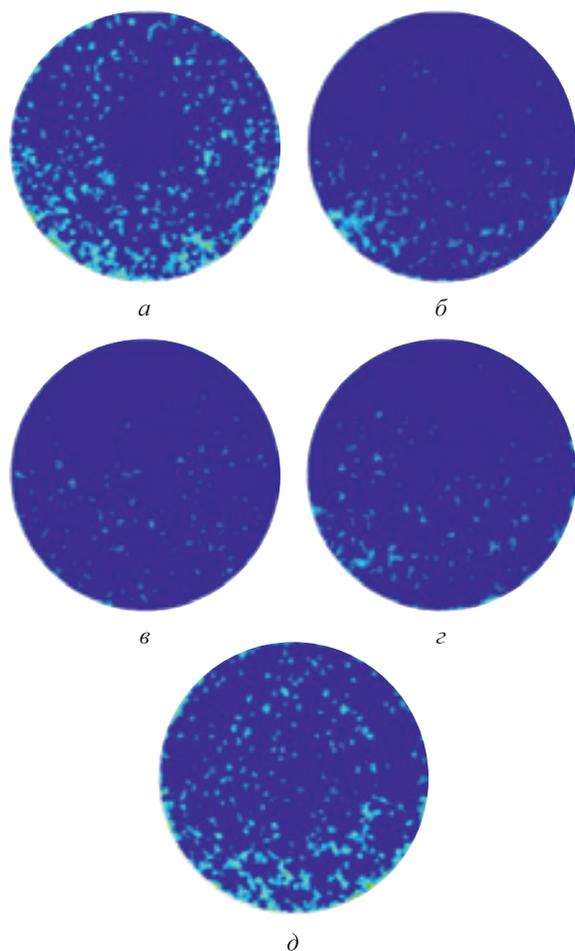


Рис. 3. Распределение частиц  $B_4C$  в поперечном сечении изложницы:

$a$  – 0 мм (первый торец) от начала изложницы;  $б$  – 5 мм (граница торцевой корки) от начала изложницы;  $в$  – 110 мм (середина) от начала изложницы;  $з$  – 215 мм (граница корки заднего торца) от начала изложницы;  $д$  – 220 мм (задний торец) от начала изложницы

Fig. 3. Distribution of  $B_4C$  particles in the cross section of the mold from its beginning at a distance of:  
 $a$  – 0 mm (first end);  $б$  – 5 mm (border of the end crust);  
 $в$  – 110 mm (middle);  $з$  – 215 mm (border of the crust of the posterior end);  $д$  – 220 mm (rear end)

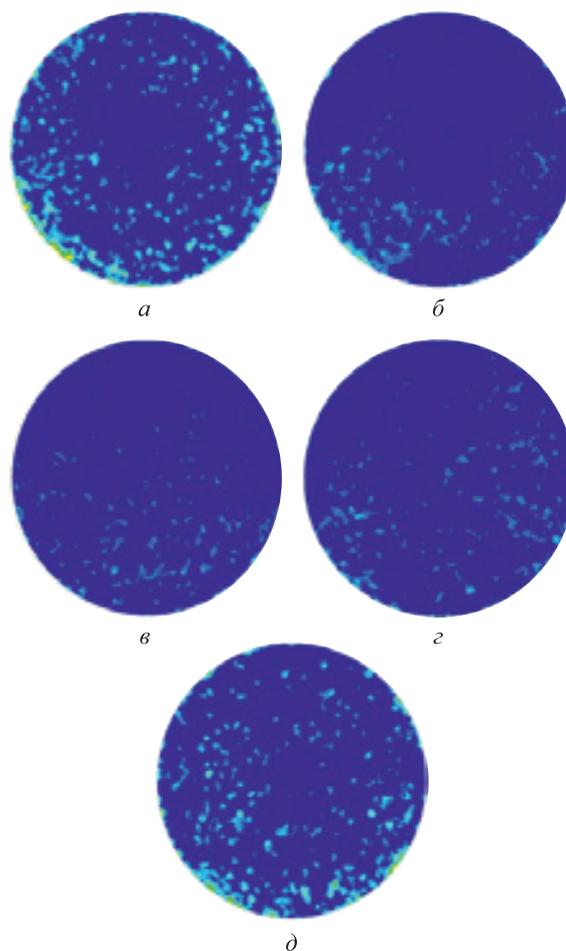


Рис. 5. Распределение частиц  $Y_2O_3$  в поперечном сечении изложницы:

$a$  – 0 мм (первый торец) от начала изложницы;  $б$  – 5 мм (граница торцевой корки) от начала изложницы;  $в$  – 110 мм (середина) от начала изложницы;  $з$  – 215 мм (граница корки заднего торца) от начала изложницы;  $д$  – 220 мм (задний торец) от начала изложницы

Fig. 5. Distribution of  $Y_2O_3$  particles in the cross section of the mold from its beginning at a distance of:  
 $a$  – 0 mm (first end);  $б$  – 5 mm (border of the end crust);  
 $в$  – 110 mm (middle);  $з$  – 215 mm (border of the crust of the posterior end);  $д$  – 220 mm (rear end)

представленных рисунках градиент отображает скопление дисперсных частиц, описываемое их плотностью, а на рис. 3, 5 и 7 – распределение частиц  $W_4C$ ,  $Y_2O_3$ ,  $WC$  в поперечном сечении изложницы соответственно.

В результате проведенного моделирования, помимо графического отображения, получены массивы данных, описывающих координаты каждой частицы в каждый момент времени с шагом 0,00001 с, что позволяет прогнозировать точное местонахождение каждой частицы в каждый момент разливки.

На рис. 8 представлена часть массива данных с отображением координат дисперсных частиц. Стандартные манипуляции сортировки и фильтрации ячеек позволяют определить точную концентрацию вплоть до одной частицы в любой точке модели.

На рис. 8 указаны следующие данные:

- «Particle number» – порядковый номер частицы;
- «Particle X position» – координата частицы по оси X;
- «Particle Y position» – координата частицы по оси Y;

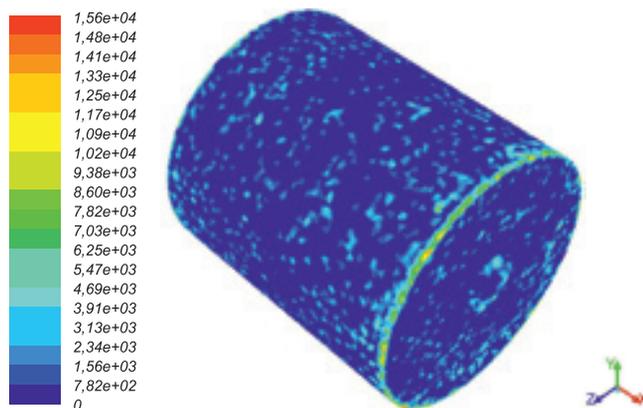


Рис. 6. Общая картина распределения частиц WC в момент 2,5 с

Fig. 6. General view of the distribution of WC particles at the moment of 2.5 seconds

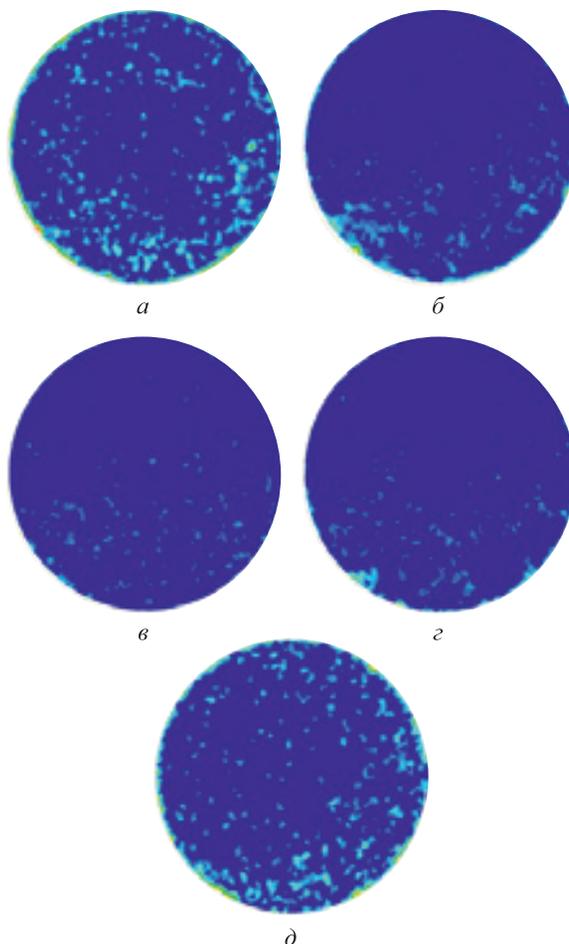


Рис. 7. Распределение частиц WC в поперечном сечении изложницы:

*a* – 0 мм (первый торец) от начала изложницы; *б* – 5 мм (граница торцевой корки) от начала изложницы; *в* – 110 мм (середина) от начала изложницы; *г* – 215 мм (граница корки заднего торца) от начала изложницы; *д* – 220 мм (задний торец) от начала изложницы

Fig. 7. Distribution of WC particles in the cross section of the mold from its beginning at a distance of:

*a* – 0 mm (first end); *б* – 5 mm (border of the end crust); *в* – 110 mm (middle); *г* – 215 mm (border of the crust of the posterior end); *д* – 220 mm (rear end)

ParticleNumber	ParticleXPos[mm]	ParticleYPos[mm]	ParticleZPos[mm]												
1	-1.67748e-01	5.86699e-02	4.91000e+01	5.86699e-02											
2	-1.61181e-01	-6.21651e-02	4.91000e+01	-6.21651e-02	3.77729e-02	-4.16821e-01	5.28378e-01	6.02147e-02	1.20000e-01	4.68256e-12					
3	-1.48336e-01	-2.14979e-02	4.91000e+01	-2.14979e-02	-1.91336e-02	-2.62803e-01	-1.60987e-01	5.15803e-02	2.30000e-01	3.94073e-11					
4	-1.24879e-01	1.72179e-02	4.91000e+01	1.72179e-02	8.78835e-01	2.72884e-02	1.22977e-01	1.22127e-01	1.80000e-01	2.98134e-15					
5	-1.61793e-01	7.21301e-02	4.91000e+01	7.21301e-02	6.81137e-03	-2.58893e-04	-6.47911e-04	6.73794e-04	1.20000e-01	4.68256e-12					
6	8.83857e-02	-3.77041e-02	4.91000e+01	-3.77041e-02	2.28612e-02	1.91179e-01	3.29942e-01	1.88458e-01	2.30000e-01	3.94073e-11					
7	-7.50457e-02	1.36886e-02	4.91000e+01	1.36886e-02	1.81650e-02	3.24242e-01	1.71678e-01	4.14922e-02	1.80000e-01	2.98134e-15					
8	-7.12799e-02	-3.86733e-02	4.91000e+01	-3.86733e-02	8.49134e-02	1.22993e-01	1.18781e-01	2.36341e-01	1.20000e-01	4.68256e-12					
9	4.21223e-01	9.70483e-02	4.91000e+01	9.70483e-02	1.96794e-02	1.96687e-04	4.82842e-04	4.12086e-04	2.30000e-01	3.94073e-11					
10	-3.19179e-01	-9.79444e-02	4.91000e+01	-9.79444e-02	1.88493e-02	5.25984e-03	1.11168e-01	7.48909e-01	1.80000e-01	2.98134e-15					
11	8.18194e-02	-3.24031e-02	4.91000e+01	-3.24031e-02	4.81783e-02	-3.48946e-01	1.28483e-01	1.26270e-01	1.20000e-01	4.68256e-12					
12	-1.86613e-01	1.77982e-02	4.91000e+01	1.77982e-02	8.38138e-02	2.29175e-01	1.64908e-01	5.99613e-01	2.30000e-01	3.94073e-11					
13	-4.79704e-02	-6.92481e-01	4.91000e+01	-6.92481e-01	5.42400e-02	1.53818e-01	-6.34606e-02	1.41918e-01	1.80000e-01	2.98134e-15					
14	-7.12181e-02	-7.12181e-02	4.91000e+01	-7.12181e-02	6.111705e-03	-1.78784e-03	-6.62223e-04	-1.25907e-04	1.20000e-01	4.68256e-12					
15	-4.78060e-02	7.05401e-02	4.91000e+01	7.05401e-02	5.93842e-02	2.25821e-01	5.80064e-01	1.78478e-01	2.30000e-01	3.94073e-11					
16	-1.61990e-01	-6.16394e-02	4.91000e+01	-6.16394e-02	8.65699e-02	-1.18905e-01	2.88229e-01	4.16905e-01	1.80000e-01	2.98134e-15					
17	4.14418e-02	5.99328e-02	4.91000e+01	5.99328e-02	8.91899e-03	2.83026e-01	1.98913e-01	1.91150e-01	1.20000e-01	4.68256e-12					
18	-6.89432e-01	-9.31400e-02	4.91000e+01	-9.31400e-02	1.05282e-02	1.54213e-04	-2.40548e-04	-6.76474e-04	2.30000e-01	3.94073e-11					
19	-1.27119e-01	8.25912e-02	4.91000e+01	8.25912e-02	5.38929e-02	6.40930e-04	-9.16678e-04	4.19178e-04	1.80000e-01	2.98134e-15					
20	-4.62706e-02	7.02011e-02	4.91000e+01	7.02011e-02	4.52199e-02	-2.52199e-02	2.52199e-02	2.52199e-02	2.30000e-01	4.68256e-12					
21	-2.42799e-04	7.25188e-02	4.91000e+01	7.25188e-02	3.13646e-02	1.95343e-03	4.09334e-03	2.37073e-03	2.30000e-01	3.94073e-11					
22	-6.81401e-02	-5.84794e-02	4.91000e+01	-5.84794e-02	7.42443e-02	7.81403e-01	1.99792e-01	5.89779e-02	1.80000e-01	2.98134e-15					
23	5.99186e-02	1.62259e-01	4.91000e+01	1.62259e-01	4.10473e-02	1.89111e-01	-4.43666e-01	2.63111e-01	1.20000e-01	4.68256e-12					

Рис. 8. Часть массива данных с отображением координат дисперсных частиц

Fig. 8. Part of the data array with display of the dispersed particles' coordinates

- «Particle Z position» – координата частицы по оси Z;
- «Particle radial position» – радиальная координата частицы;
- «Particle X velocity» – скалярное значение вектора скорости частицы по оси X;
- «Particle Y velocity» – скалярное значение вектора скорости частицы по оси Y;
- «Particle Z velocity» – скалярное значение вектора скорости частицы по оси Z;
- «Particle diameter» – диаметр частицы в м;
- «Particle mass» – масса частицы в кг.

## Выводы

Разработана компьютерная модель распределения дисперсных частиц по сечению цилиндрических дисперсно-упрочненных металлических материалов. Модель реализована в программной среде ANSYS и позволяет прогнозировать распределение до 40 млрд частиц одновременно в каждый момент разлива на машине центробежного горизонтального литья. С использованием мощностей ЦКП «Суперкомпьютерное моделирование» проведено моделирование степени распределения частиц в зависимости от различных факторов и технологических параметров. Результаты работ свидетельствуют о том, что технология центробежного литья с введением дисперсных частиц в процессе разлива позволяет получить дисперсно-упрочненные металлические материалы с прогнозированием распределения тугоплавких частиц.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гузенков С.А., Федоров Д.Н., Рущкий Д.В., Гаманюк С.Б. Повышение конструкционной прочности литой стали модифицированием дисперсными порошками // *Сталь*. 2010. № 3. С. 101 – 103.
2. Коростелев А.Б., Жеребцов С.Н., Соколов И.П., Чумак-Жуль Д.А. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов комплексным инокулятором // *Металлург*. 2010. № 10. С. 73 – 74.
3. Kuzmanov P., Dimitrova R., Lazarova R., etc. Investigation of the structure and mechanical properties of castings of alloy AlSi7Mg, cast iron GG15 and GG25 and steel GX120Mn12, modified by nanosized powders // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2014. Vol. 228. No. 1. P. 11 – 18.
4. Lamei C., Guangxun L., Huaipeng G. Modification of the structure and properties of heat-resistant alloys with the help of nanopowders of refractory compounds // *Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO: Int. Conference on Manipulation*. 2012. P. 385 – 388.
5. Harris I.R., Jones I.P. *Grain Boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties*. – London: IOM Communications Ltd., 2001. – 456 p.
6. Chumanov I.V., Anikeev A.N., Chumanov V.I. Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframiumcarbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. P. 816 – 820.
7. Kiviö M., Holappa L., Louhenkilpi S. etc. 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. No. 4. P. 2114 – 2122.
8. Комшук В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2010. № 8. С. 57 – 63.
9. Watanabe Y., Inaguma O., Sato H. etc. Novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-powder method // *Materials*. 2009. Vol. 2. No. 4. P. 2510 – 2525.
10. Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Investigating the effect of carbide disperse particles on hardness and wear resistance of experimental materials in cast and deformed conditions // *Indian Journal of Science and Technology*. 2015. Vol. 8. No. 34. P. 1 – 7.
11. Zemtsova E.G., Yurchuk D.V., Smirnov V.M. Creation of heterogeneity on the basis of carbide nanostructures in the volume of metal (iron) matrix for regulation of mechanical properties // *Materials Physics and Mechanics*. 2013. Vol. 18. No. 1. P. 42 – 52.
12. El-Hadad S., Sato H., Miura-Fujiwara E. etc. Fabrication of Al/Al<sub>3</sub>Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 50. No. 1S1. Article 01AJ02.
13. Han Q., Hunt D. Particle pushing: critical flow rate required to put particles into motion // *Journal of Crystal Growth*. 1995. Vol. 152. No. 3. P. 221 – 227.
14. Чуманов В.И., Чуманов И.В., Анিকেев А.Н. Упрочнение поверхностных слоев при формировании полой заготовки методом центробежного литья // *Электрометаллургия*. 2010. № 1. С. 33 – 36.
15. Wildeaj G., Perepezko H. Experimental study of particle incorporation during dendritic solidification // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 283. No.1 – 2. P. 25 – 37.
16. Wang Q., Zhang L. Detection of non-metallic inclusions in centrifugal continuous casting steel billets // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. No. 3. P. 1594 – 1612.
17. Catalina A.V., Mukherjee S., Stefanescu D. A dynamic model for the interaction between a solid particle and an advancing solid/liquid interface // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31. No. 10. P. 2559 – 2568.
18. Wang Q., Zhang L. Determination for the entrapment criterion of nonmetallic inclusions by the solidification front during steel centrifugal continuous casting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 31. No. 10. P. 1933 – 1949.
19. Алексеев И.А., Анিকেев А.Н. Модель распределения дисперсных частиц по объему центробежно-литой заготовки // *Наука ЮУрГУ. Матер. 70-й науч. конф.* 2018. С. 820 – 826.
20. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources // *Proceedings of the 10th Annual Int. Sci. Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)*. Arkhangelsk, Russia, March 29 – 31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. 2016. Vol. 1576. P. 561 – 573.

Поступила в редакцию 27 января 2020 г.  
После доработки 18 февраля 2020 г.  
Принята к публикации 7 августа 2020 г.

## COMPUTER MODELING OF DISTRIBUTION OF DISPERSED PARTICLES BY THE CROSS-SECTION OF CYLINDRICAL DISPERSION-STRENGTHENED METAL MATERIALS

*A.N. Anikeev, I.V. Chumanov, A.I. Alekseev, V.V. Sedukhin*

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** The article presents the process of creating a computer model for predicting the distribution of particles during centrifugal casting using the ANSYS FLUENT 16.0 software module. To predict the distribution of particles by volume in the world at the moment there are several mathematical models. Most of them are based on the steady state assumption: models describing the criteria for dropping particles by a growing crystallization front and models calculating critical particle absorption rates by growing dendritic crystals. Some models attempt to describe the dynamic state of the system or to determine the criterion for capturing non-metallic inclusions by the solidification front during centrifugal casting of metal. The process of creating the new model, its scheme and geometry are described. Its preprocessor takes into account such phenomena as two-phase flow, energy equation, lamellar flow, introduction of discrete phases (strengthening particles), melting/crystallization. The model considers account of interaction of two liquid phases: air and steel melt; interfacial interaction is described by the equation of surface tension. As the materials used, the authors used steel grade 12Kh18N10T as the base metal, carbides of tungsten, boron and yttrium oxide as input particles. During simulation, the physico-chemical parameters of these substances were taken into account. The process of modeling the distribution of particles during centrifugal casting using the Skif-Ural computing cluster, included in the TOP-500 of the world's most powerful computers, is presented. As a result of the simulation, in addition to graphical display, data arrays were obtained that describe the coordinates of each particle at each moment in time in increments of 0.00001 seconds, which allows us to predict the exact location of each particle at each moment of casting. The results of the work indicate that centrifugal casting technology with the introduction of dispersed particles during the casting process allows obtaining dispersion-strengthened metal materials with predicting the distribution of refractory particles.

**Keywords:** computer modeling, ANSYS, centrifugal casting, tungsten carbide, boron carbide, yttrium oxide, hardened materials.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-8-657-664

### REFERENCES

1. Guzenkov S.A., Fedorov D.N., Rutskii D.V., Gamanyuk S.B. Increasing the structural strength of cast steel by powder modification. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 2894–297.
2. Korostelev A.B., Zherebtsov S.N., Sokolov I.P., Chumak-Zhun D.A. Modification of heat-resistant nickel alloy with a combined inoculator. *Metallurgist*. 2011, vol. 54, no. 9–10, pp. 711–713.
3. Kuzmanov P., Dimitrova R., Lazarova R. etc. Investigation of the structure and mechanical properties of castings of alloy AlSi7Mg, cast iron GG15 and GG25 and steel GX120Mn12, modified by nanosized powders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2014, vol. 228, no. 1, pp. 11–18.
4. Lamei C., Guangxun L., Huaipeng G. Modification of the structure and properties of heat-resistant alloys with the help of nanopowders of refractory compounds. *Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO: Int. Conference on Manipulation*. 2012, pp. 385–388.
5. Harris I.R., Jones I.P. *Grain Boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties*. London: IOM Communications Ltd., 2001, 456 p.
6. Chumanov I.V., Anikeev A.N., Chumanov V.I. Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 129, pp. 816–820.
7. Kiviö M., Holappa L., Louhenkilpi S., Nakamoto M., Tanaka T. 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, no. 4, pp. 2114–2122.
8. Komshukov V.P., Cherepanov A.N., Protopopov E.V. etc. Influence study of metal modification with nanopowder materials on continuously cast rod billet quality. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 8, pp. 57–63.
9. Watanabe Y., Inaguma O., Sato H. etc. Novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-powder method. *Materials*. 2009, vol. 2, no. 4, pp. 2510–2525.
10. Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Investigating the effect of carbide disperse particles on hardness and wear resistance of experimental materials in cast and deformed conditions. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015, vol. 8, no. 34, pp. 1–7.
11. Zemtsova E.G., Yurchuk D.V., Smirnov V.M. Creation of heterogeneity on the basis of carbide nanostructures in the volume of metal (iron) matrix for regulation of mechanical properties. *Materials Physics and Mechanics*. 2013, vol. 18, no. 1, pp. 42–52.
12. El-Hadad S., Sato H., Miura-Fujiwara E. etc. Fabrication of Al/Al<sub>3</sub>Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 50, no. 1S1, article 01AJ02
13. Han Q., Hunt D. Particle pushing: critical flow rate required to put particles into motion. *Journal of Crystal Growth*. 1995, vol. 152, no. 3, pp. 221–227.
14. Chumanov V.I., Chumanov I.V., Anikeev A.N. etc. Hardening of the surface layers of a hollow billet formed by centrifugal casting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 12, pp. 1125–1128.
15. Wildeaj G., Perepezko H. Experimental study of particle incorporation during dendritic solidification. *Materials Science and Engineering: A*. 2000, vol. 283, no. 1–2, pp. 25–37.
16. Wang Q., Zhang L. Detection of non-metallic inclusions in centrifugal continuous casting steel billets. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016, vol. 47, no. 3, pp. 1594–1612.
17. Catalina A.V., Mukherjee S., Stefanescu D. A dynamic model for the interaction between a solid particle and an advancing solid/liquid interface. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000, vol. 31, no. 10, pp. 2559–2568.
18. Wang Q., Zhang L. Determination for the entrapment criterion of nonmetallic inclusions by the solidification front during steel centrifugal continuous casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016, vol. 31, no. 10, pp. 1933–1949.
19. Alekseev I.A., Anikeev A.N. Model of the distribution of dispersed particles over the volume of a centrifugally cast billet. In: *Nauka YuUrGU. Materialy 70-i nauchnoi konferentsii* [Science of SUSU. Materials of the 70<sup>th</sup> Sci. Conference]. 2018, pp. 820–826. (In Russ.).
20. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources. In: *Proceedings of the 10th Annual Int. Sci. Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)*. Arkhangel'sk, Russia,

March 29-31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. 2016, vol. 1576, pp. 561–573.

**Funding.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the federal target program under Agreement No. 05.608.21.0276 from December 4, 2019 (unique identifier RFMEFI60819X0276).

**Information about the authors:**

*A.N. Anikeev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (anikeevan@susu.ru)*

*I.V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (chumanoviv@susu.ru)*

*A.I. Alekseev, MA Student "Technique and Technology of Materials Production" (79058311597@ya.ru)*

*V.V. Sedukhin, Postgraduate, Engineer of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (sedukhinvv@susu.ru)*

Received January 27, 2020

Revised February 18, 2020

Accepted August 7, 2020

---