

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПО ОБЪЕМУ ЦЕНТРОБЕЖНО-ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

И.А. Алексеев, А.Н. Аникеев

Спроектированы геометрическая и математическая модели процесса распределения частиц карбидов титана и вольфрама в теле жидкой конструкционной стали марки ст20. Описан процесс кристаллизации стали в изложнице при центробежном литье.

Ключевые слова: CAE системы, ANSYS, МКЭ, центробежное литье, устойчивые карбиды, распределение частиц, конструкционные стали и сплавы.

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 применение 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. Также по этому принципу изготов-

ливаются детали, к которым представляются различные или полностью противоположные эксплуатационные требования, например, зубчатые колеса, которые должны иметь упругую сердцевину и твердый зубчатый венец.

Изобретение порошковой металлургии выделило в металлургии отдельную отрасль промышленного производства материалов и сплавов. Работа с мелкодисперсными порошками, спекаемыми под высоким давлением, решило вопрос о правильном распределении частиц в рабочем объеме получаемого изделия, а также позволило создавать высокоточные фасонные инструменты и оснастку, однако высокие расходы на изготовление специальных штампов для прессов, машин для получения мелкодисперсных порошков делает порошковую металлургию дорогостоящей технологией, не обладающей достаточной гибкостью [1–3].

Проблему замены большей части изделия дешевым конструкционным материалом решают множеством путей: сварка, наплавка, посадка в натяг, применение биметаллов, нанесение защитных покрытий, применение термо- и химической обработки, и прочих. Данные методы имеют следующие недостатки:

– неравномерность физических и технологических свойств деталей при эксплуатации ввиду неравномерного распределения частиц в образуемом рабочем слое;

– снижение предельных эксплуатационных характеристик и износостойкости деталей по причине наличия явной границы раздела фаз.

Решение данной проблемы заключается в создании материалов, представляющих из себя по своей молекулярной структуре единую систему с отсутствием каких-либо четких границ раздела фаз и градиентным равномерным распределением укрепляющих частиц в теле металла.

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 контракте расплава с изложницей, в которой отсутствуют упрочняющие частицы. На рис. 1 изображен процесс центробежного литья.

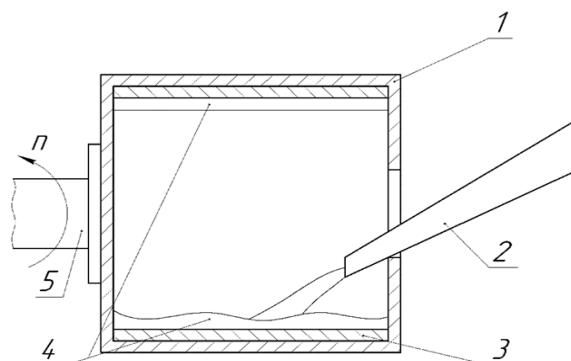


Рис. 1. Процесс разлива стали в изложницу установки центробежного литья:
1 – изложница; 2 – носок; 3 – подложка; 4 – жидкая сталь;
5 – привод вращения изложницы; n – направление вращения

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 кобленирования. Изложница получает вращение через привод 5, представляющий собой соосный вал, от электродвигателя. Через носок 2 расплавленный 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 на струю металла, 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. На рис. 2 показано распределение частиц на границе соприкосновения закристаллизовавшегося металла с подложкой. Наружная корка имеет мелкозернистую структуру, без карбидов, что связано с быстрой кристаллизацией. Под коркой скрывается наружный рабочий слой заготовки, в котором сконцентрированы наиболее крупные частицы карбидов. Более мелкие частицы карбидов находятся между крупными частицами и преобладают в следующей зоне кристаллизации, при этом их концентрация постепенно снижается к центру заготовки, образуя градиентную структуру [4].



Рис. 2. Распределение частиц на границе фаз

Центробежное литье является оптимальным методом получения градиентно-упрочненных заготовок, ввиду возможности управления распределением вводимых частиц по сечению, а следовательно, управлением свой-

ствами получаемого металла. Для прогнозирования характера распределения упрочняющих частиц в теле металла, толщины образующегося слоя, возможных физических характеристик заготовки, а также снижения материальных затрат на проведения натуральных испытаний была создана математическая модель для проведения анализа в САЕ-системах.

В данной работе проведено исследование распределения частиц карбида вольфрама WC и карбида титана TiC в жидком расплаве стали 20. Целью работы было проведение комплексного моделирования процесса разлива стали 20, с внедренными в нее частицами WC и TiC, в САЕ-системе «ANSYS Fluent».

Была разработана двухмерная модель изложницы и носка. Геометрические размеры изложницы: длина 220 мм, диаметр полости с учетом подложки 200 мм. Для первых опытов использовался процесс непрерывного литья стали, поэтому модель допускает некоторое технологическое отверстие, через которое происходит истечение лишнего расплава. Поток расплава отсекается, после достижения некоторого объема и стабилизации процесса разбрызгивания стали внутри изложницы. Модель является изотермической. Температура расплава составляет 1600 °С. Физические и термодинамические характеристики расплава представлены в табл. Анимационный кадр процесса разлива стали представлен на рис. 3. Сетка конечных элементов состоит из правильных прямоугольников с длиной стороны от 1 до 6 мм для набора опытов.

В первичных экспериментах разлива стали производилась без внедрения частиц с целью оценки поведения математической модели расплава.

Таблица

Характеристики расплава

Наименование	Значение
Плотность	7,859 г/см ³
Теплоемкость	660 Дж/кг·К
Теплопроводность	25 Вт/м·К
Вязкость динамическая	0,006 Па·с
Молекулярная масса	55,836 г/моль
Энтальпия естественного состояния	850 Дж/моль
Температура расплава	1873 К
Коэффициент поверхностного натяжения расплав-воздух	1,5 Н/м
Скорость истечения	0,2 м/с
Скорость вращения изложницы	500 об/мин
Давление внутри изложницы	101325 Па

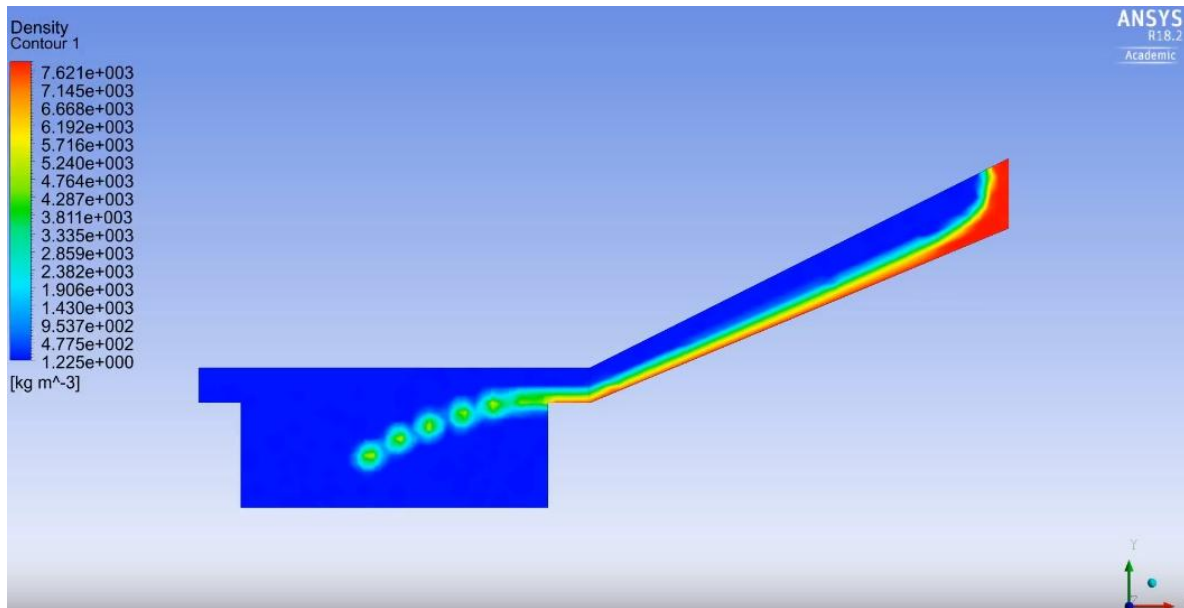


Рис. 3. Кадр анимации процесса разливки стали

При проведении дальнейших испытаний вносились корректировки в геометрическую модель для ее достаточного упрощения. Следующим испытанием было внедрение частиц карбидов WC и TiC с размерами частиц от 5 до 20 мкм в тело жидкого металла, полностью заполняющую изложницу. Данная модель имеет некоторые особенности и допущения. Так как изложница полностью заполнена жидким расплавом, то для внедрения частиц требовался некоторый кратковременный импульс, вбрасывающий их в тело металла. Импульс обеспечивался наличием кратковременного внутреннего течения в теле расплава, движущегося от торца заготовки до противоположного торца в течение 0,3 с. Время для каждого сочетания карбидов подбирается индивидуально, исходя из расчетов внедряемой концентрации и скорости внутреннего потока. Анимационные кадры распределения частиц карбидов показаны на рис. 4.

В ходе проведения моделирования было выявлено некоторое завихрение в движении карбидов из-за прикладывания импульса, что невозможно в реальных условиях, но модель подтверждает гипотетическое распределения частиц WC и TiC в расплав: в центре и на наружной поверхности заготовки, с нахождением некоторого незначительного количества частиц в средней части расплава. Эти частицы продолжают постепенно оседать в изотермическом горячем расплаве, в то время как при наличии процесса кристаллизации расплава, частицы закристаллизовались, не успев распределиться.

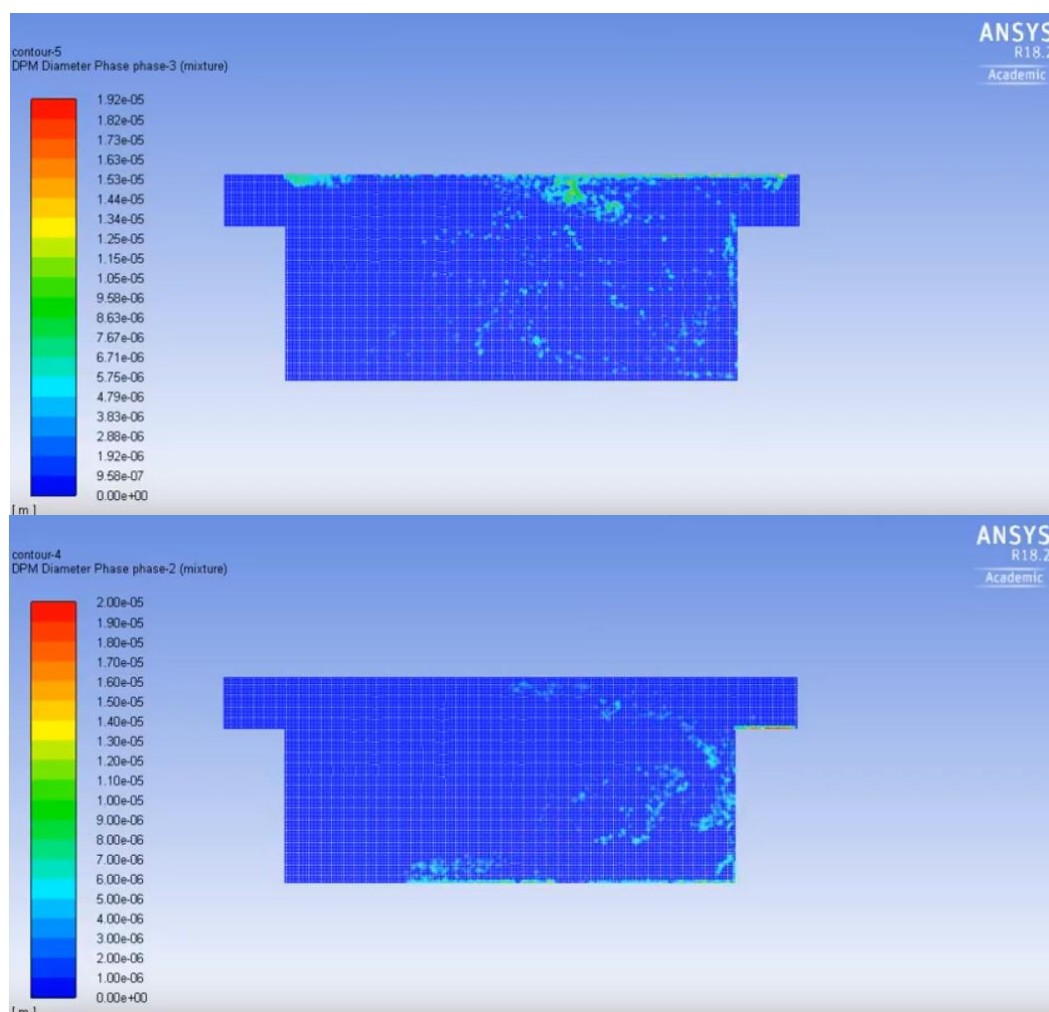


Рис. 4. Кадры анимации процесса распределения TiC и WC соответственно в теле жидкого расплава

Результаты моделирования не имеют полной сходимости с результатами распределения, выявленными на физических образцах, что является следствием принятых допущений. Для повышения точности моделирования:

- будут учтены процессы кристаллизации расплава: создание моделей основного металла и карбидов как матрицы состояний с шагом температуры не более 50 °С в диапазоне от 25 °С до 1700 °С, и учитывающей все их основные термодинамические характеристики;
- проведены динамические испытания трехмерной модели с полным циклом от момента разлива до окончательной кристаллизации заготовки;
- реализован анализ твердости и пластичности полученных объемных моделей как критерия определения оптимальной концентрации и среднего размера частиц карбидов.

Работа выполнена в рамках выполнения гранта Президента РФ по договору № 14.Y30.18.2874-МК.

Библиографический список

1. Высокоэффективный инструмент из порошковых быстрорежущих сталей с дисперсной структурой / В.Л. Гиршов, М.Т. Коротких, И.В. Крупнова, Н.В. Коробейников // *Металлообработка. Серия «Новое в металлургии»*. – 2011. – № 4 (64). – С. 44–48.
2. Абрамов, А.А. Порошковые инструментальные стали с дисперсной структурой / А.А. Абрамов, Л.С. Самойленко, В.Л. Гиршов // *Металлообработка. Серия «Новые материалы и технологии производства»*. – 2008. – № 4 (46). – С. 31–35.
3. Состав и свойства порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали в керосине: монография / Р.А. Латыпов, Е.А. Воробьев, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева. – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2014. – 108 с.
4. Аникеев, А.Н. Получение градиентных центробежно-литых стальных заготовок путем введения в кристаллизующийся расплав дисперсных частиц карбидов: диссертация / А.Н. Аникеев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 160 с.

[К содержанию](#)