

**К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАВАЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ  
МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ  
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ФАЗ С РАЗЛИЧНОЙ УДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ**

*В.И. Чуманов, А.Н. Аникеев, И.В. Чуманов*

В рукописи изложены существующие способы создания композиционных материалов на основе железа, основанные на введении мелкодисперсных фаз различной удельной плотности. Приведены результаты анализа преимуществ и недостатков описанных способов.

Ключевые слова: дисперсные фазы; расплавы; введение частиц; композиционный материал.

Проблема стойкости материалов (и, соответственно, деталей машин и механизмов) является одной из самых насущных проблем современного машиностроения. Традиционным методом увеличения различных механических свойств является легирование металлов, либо обработка из поверхности различными способами (наплавки, напайки, лазерной и плазменной

обработки и т.д.). Альтернативой традиционным металлическим материалам являются композиционные материалы, содержащие в своём составе мелкодисперсные частицы карбидов, оксидов или нитридов. Эти материалы называют дисперсно-упрочненными материалами. Одним из самых значительных преимуществ таких материалов является возможность задавать необходимый комплекс механических и физических свойств, за счет использования различных типов частиц [1].

Причиной отсутствия повсеместного распространения дисперсно-упрочненных материалов является разница плотностей вводимых частиц и упрочняемого металла: при введении частиц они либо всплывают на поверхность расплава и ассимилируются шлаком, либо опускаются на дно, либо располагаются хаотично в расплаве, а после разливки, и в объеме закристаллизовавшегося материала. Таким образом, для контролируемого распределения частиц было разработано несколько способов введения, учитывающих природу частиц и расплава.

*1. Введение дисперсного порошка в слиток на стадии разливки сверху.* Сталь 45Л (0,42 % С; 0,56 % Мn; 0,37 % Si; 0,025 % S; 0,030 % P; 0,032 % Al) для отливки модельных слитков диаметром 145 мм и высотой 600 мм выплавляли в печи ДСП-5 двухшлаковым процессом с раскислением в ковше алюминием (800 г/т). Бесприбыльные слитки массой 70 кг. Отливали из одного ковша со стопором в вертикальные шамотные формы. Половину из слитков модифицировали тонкодисперсной смесью (ТДС) порошков SiO<sub>2</sub>+C, вводя смесь в струю заливаемой в форму стали через специальную течку, прикрепленную к днищу ковша. Исследование включало определение химического состава металла, выявление его макро- и микроструктуры, снятие серных отпечатков, изучение неметаллических включений в анодно-выделенных осадках и на шлифах, механические свойства (растяжение, ударный изгиб, вязкость разрушения). Исследование химического состава показали, что распределение элементов по высоте и поперечному сечению слитков оказались идентичными, за исключением углерода, содержание которого в модифицированном металле в среднем оказалось больше на 0,03 %. Исследования макроструктуры показали, что модифицирование стали ТДС резко изменяет макроструктуру слитка, почти полностью устраняя крупнодендритную форму кристаллитов и формируя однородное зернистое строение по всему сечению темплетов. Изучение неметаллических включений выявило большое разнообразие форм и размеров алюмосиликатных и сульфидных включений, количество оксидных включений возросло незначительно. Механические испытания показали, что у модифицированного металла возросли на 18 % прочностные и на 37–50 % пластические свойства, в 1,5–2 раза повысились трещиностойкость и ударная вязкость [2].

Несомненными преимуществами данного способа является простота его реализации, однако следует отметить, что при реализации данного метода отсутствует возможность прогнозировать и управлять распределением час-

тиц. Весьма сомнительно, что введенные частицы в полученных слитках расположились равномерно по всему сечению, а неравномерность распределения приводит к непрогнозируемой неравномерности свойств.

## *2. Введение дисперсных частиц в металл при непрерывной разливке*

Подготовленные, закатанные в проволоку модификаторы ( $Y_2O_3$ , TiN, TiCN), вводили в Ст.Зсп при разливке на машине непрерывного литья посредством переносного трайб-аппарата, подавая проволоку в кристаллизатор. Исследования полученного экспериментального металла показали, что плотность модифицированного металла увеличилась на 25–56 кг/м<sup>3</sup> (0,3–0,7 %) при использовании всех порошковых инокуляторов. Изменилась также структура стали: измельчилось зерно, уменьшилась центральная пористость, осевая химическая неоднородность, общие ликвационные полосы и трещины. Результаты механических испытаний показали улучшение свойств модифицированных непрерывнолитых заготовок относительно не модифицированных [3].

Исследователями было отмечено, что подача нанопорошковых модификаторов в кристаллизатор МНЛЗ не позволяет получить концентрацию инокуляторов в слитке выше 0,005–0,007 % из-за технологических особенностей введения и ограниченных технических возможностей, поэтому повторное модифицирование проводили в ковше. Порошковую ленту с НПИ подавали с помощью трайб-аппарата со скоростью 2,0–7,5 м/мин в приемную ванну промежуточного ковша сортовой МНЛЗ, разливая сталь марки 18Г25С при скорости вытягивания слитка 2,2–2,4 м/мин. Вводили нитрид и карбонитрид титана. Исследование опытного металла показало, что введение модификаторов в ковш, обеспечивает увеличение концентрации НПИ в металле до 0,015–0,047 % и существенное увеличение ряда показателей: повысилась удельная плотность модифицированного металла до 48–82 кг/м<sup>3</sup> (в зависимости от вида НПИ); снизилась бальность развития внутренних дефектов на 40–56 %; увеличилась толщина корочки на 25,8–26,9 %; сократились области равноосных кристаллов (на 46,7–53,5 %), сократилась дендритная зона (20,5–25,4 %) и длина первичных осей дендритов (23,9–25,5 %).

Механические испытания образцов модифицированной стали показали увеличение предела текучести, в среднем, на 7,2 %; временному сопротивлению разрыву – 1,0 %; предела прочности – 1,7 %; относительного удлинения – 8,4 %; относительного сужения – 14,8 %. Максимальное улучшение показателей получено при концентрации основного вещества НПИ в металле 0,015–0,025 %, что было достигнуто при подаче порошковой ленты в промежуточный ковш МНЛЗ [4].

Преимущество данного метода получения дисперсно-упрочненного материала в том, что он высокотехнологичен: для получения материала практически не требуется никаких дополнительных механизмов (за исключением трайб-аппарата), при этом получаемый опытный металл значительно превосходит по свойствам не модифицированные образцы сравнения. Од-

нако, при таком методе введения невозможно добиться равномерного распределения вводимых модификаторов по сечению получаемой заготовки, как вследствие кристаллизационных явлений, так и вследствие седиментации по удельному весу: нитрид титана имеет плотность  $5,44 \text{ г/см}^3$ ; оксид иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$  –  $4,84 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, в жидком металле все вводимые частицы будут всплывать на поверхность расплава, за исключением тех, которые будут захватываться потоками металла (при введении в ковш) или растущими дендритами (при введении в кристаллизатор).

### *3. Введение дисперсных частиц в металл при вытягивании заготовки в направлении обратном гравитационному полю*

Еще одним, интересным и перспективным способом введения дисперсных частиц в расплав является «Способ повышения композиционного материала с повышенной износостойкостью» [8]. Данный способ реализуется на машинах непрерывного литья с вытягиванием формируемой заготовки в направлении обратном гравитационному полю. При данном способе разлива, перед подачей металла в центровую на струю присаживают дисперсные тугоплавкие частицы, металл с инжесктированными частицами попадает в центровую, далее в литниковую систему, далее в кристаллизатор, где происходит кристаллизация металла и вытягивание формируемой заготовки (с помощью затравки) в направлении обратном гравитационному полю. Введенные частицы, за счёт разности в плотности по сравнению с упрочняемым материалом, под воздействием Архимедовых сил будут смещаться вверх, и при определённых условиях можно добиться того, чтобы смещение фронта кристаллизации совпадало с направлением движения частиц.

В электросталеплавильном цехе № 3 ОАО «Златоустовский металлургический завод» были проведены опытные плавки: сталь марки У7, выплавленная в индукционной печи, разливалась на модернизированной установке с введением твердофазных частиц. В качестве твёрдой фазы выступал карбид титана (TiC), а для улучшения смачиваемости карбидов в ковш перед разливкой давали металлический титан. Исследование характера распределения введённой в металлическую матрицу дисперсной фазы показали, во всех полученных заготовках с введенной упрочняющей фазой случаях отмечается достаточно равномерное распределение введённого в жидкую металлическую матрицу дисперсного синтетического карбида титана по высоте слитка. Незначительное увеличение содержания дисперсной фазы по высоте слитка, по-видимому, объясняется некоторым всплыванием дисперсных частиц в процессе кристаллизации.

Исследование механических свойств показало увеличение износостойкости опытного металла на 14 % по сравнению с не упрочнённой сталью и достижения уровня износостойкости сталей ЭИ 107 и 110Х18М-ШД [5].

Преимуществом данной технологии является то, что в ней учитывается разница плотностей дисперсной фазы и упрочняемого материала, однако для её реализации требуется специфическое оборудование.

#### *4. Введение дисперсных частиц при центробежном электрошлаковом литье*

Сущность технологии заключается в электрошлаковом переплаве электрода в плавильной емкости, обеспечивающей накопление жидкого металла и шлака в нужных количествах, и последующей его заливке во вращающуюся форму [6]. Важным преимуществом такой технологии является возможность упрочнения металла заготовок за счет его модифицирования. В качестве модификатора выступали синтетические ультрадисперсные частицами карбонитрида титана и титана в количестве 0,3...0,5 % от массы расплава. Модификатор получали смешиванием порошковых компонентов с последующим холодным прессованием в таблетки диаметром 25...30 мм и толщиной 8...15 мм. Размеры таблеток были выбраны из условия их растворения в модифицируемом расплаве в течение 20...30 с. Модификатор вводили при температуре 1650 °С за 2 мин до слива, что обеспечивало равномерное распределение дисперсных частиц-инокуляторов по всему объему жидкого металла в плавильной емкости. Заливку металла в металлическую литейную форму кокиль проводили при температуре 1600 °С.

Металлографический анализ показал, что введение в металл 0,4 % модификатора приводит к существенному изменению структуры и свойств литого металла. Устраняются зоны трансформации в кольцевых отливках, резко уменьшаются размеры дендритов, которые к тому же приобретают благоприятную форму по всему объему закристаллизовавшегося металла. Исследования механических свойств отливок показали значительное увеличение их показателей: металл по свойствам практически не отличается от свойств ковальной заготовки [9].

Несомненным плюсом данной технологии является то, что авторы в качестве способа распределения частиц по объему получаемой заготовки применяют центробежные силы. Однако, описанный способ имеет существенный недостаток: модификаторы вводят в прессованных таблетках в плавильную емкость. Сомнительно, что возможно прогнозировать, насколько равномерно дисперсные частицы распределяться по объему металла. К тому же частицы, находящиеся «на поверхности» «таблеток» будут иметь существенно большее время взаимодействия с расплавом, чем частицы, находящиеся внутри таблеток. Соответственно, даже при условии отсутствия химического взаимодействия частиц с расплавом, частицы будут повергаться температурному воздействию, что приведет к их частичной диссоциации. Это может вызывать изменение гранулометрического состава, что также затруднит прогнозирование распределения частиц по объему металла.

#### *5. Способ получения градиентного материала путем введения частиц при разливке на машине центробежного литья*

На кафедре «Общая металлургия» Южно-Уральского государственного университета был разработан и запатентован «Способ формирования труб-

ной заготовки» и ее упрочнения, путем введения твёрдой тугоплавкой мелкодисперсной фазой карбидов в металл при разливке на машине центробежного литья, с целью получения градиентного металло-керамического материала [8].

Суть способа: при разливке металлического материала на машине центробежного литья на струю металла постоянно, в течение всего времени разливки подаются твердые тугоплавкие мелкодисперсные частицы различной плотности. Если плотность тугоплавкой дисперсной частицы погруженной в расплав отличается от плотности расплава, то сила, действующая на частицу, не уравновешивается их собственной центробежной силой и силой тяжести. Поэтому возникают условия для перемещения частиц в ту или другую сторону, т.е. на внутреннюю или внешнюю поверхность формируемой заготовки. Когда частица соприкоснется с фронтом кристаллизации, то она оказывается прижатой расплавом к фронту кристаллизации и уже не всплывает, а захватывается растущими дендритами. В результате происходит упрочнение поверхности.

Согласно данному способу были проведены эксперименты, и получены заготовки с различным содержанием дисперсных частиц [7]. Исследование микро-структур полученных заготовок показало, что с увеличением количества вводимых дисперсных частиц происходит диспергирование структуры заготовок: балл зерна во внешних слоях заготовок может измельчаться до 8–9, а на внутренних слоях в это же время он может составлять 2–3. В результате оценки механических свойств полученных заготовок было выяснено, что увеличение концентрации дисперсных частиц WC в поверхностных слоях центробежно-литой заготовки до 5,1 шт./мкм<sup>2</sup> позволяет увеличить предел прочности на 36–38 %, ударную вязкость на 23–26 %, износостойкость на 29–34 %, твердость на 30–33 % [1, 9].

Несомненным преимуществом данного способа является возможность прогнозирования и управления распределением вводимых частиц [10]. Однако, для внедрения данного способа в производство необходимо решить массу вопросов: как влияет фактор масштабности на распределение частиц, что происходит с частицами при взаимодействии с металлом на микроуровне, каковы условия смачиваемости вводимых частиц и др.

Таким образом, можно сделать вывод, что несмотря на обширные исследования в области создания композиционных материалов, основанных на введении дисперсных частиц, требуются дополнительные эксперименты, конечной целью которых должно стать внедрение разрабатываемых материалов в существующую промышленность.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки (договор № 14.Z56.15.7690-МК), а также поддержана по ГЗ № 11.1470.2014/К.*

### Библиографический список

1. Аникеев, А.Н. Получение градиентных центробежно-литых стальных заготовок путем введения в кристаллизующийся расплав дисперсных частиц карбидов: дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Аникеев. – Челябинск, 2013. – 164 с.
2. Шиганов, И.Н. Разработка научных основ технологии сварки плавлением дисперсно-упрочненных металлических композиционных материалов / И.Н. Шиганов. – М., 1999. – 386 с.
3. Исследование влияния нанопорошковых модификаторов на качество сортовой заготовки / В.П. Комшуков, А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов, Д.Б. Фойг и др. – ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2009. – № 2. – С. 312.
4. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки / В.П. Комшуков, А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов и др. // Известия ВУХов. Черная металлургия. – 2010. – № 8. – 57 с.
5. Повышение износостойкости стали путём ввода карбида титана при кристаллизации слитка / И.В. Чуманов, В.И. Чуманов, Д.А. Пятыгин, Е.Е. Тельянова // Электromеталлургия. – 2008. – № 2. – С. 32–35.
6. Медовар, Б.И. Центробежное электрошлаковое литье / Б.И. Медовар, В.Л. Шевцов, Г.С. Маринский. – Киев: Общество «Знание» УССР, 1983. – 48 с.
7. Еремин, Е.Н. Центробежное электрошлаковое литье фланцевых заготовок с применением инокулирующего модифицирования / Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов. – 2004. – № 3. – С. 15–17.
8. Патент РФ 2381087 МПК В 22 D 13/02 Способ формирования трубной заготовки №2008128677/02 / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, Д.А. Пятыгин, Р.Р. Гарифулин, О.Ю. Вершинина, А.Н. Аникеев. Заявл. 14.07.2008.; опубл. 10.02.2010. – 5 с.
9. Чуманов, В.И. Упрочнение металлических материалов твердыми тугоплавкими мелкодисперсными частицами: монография / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, А.Н. Аникеев. – Челябинск, 2009. – 100 с.
10. Чуманов, В.И. Математическое моделирование распределения тугоплавких мелкодисперсных частиц при получении заготовки методом центробежного литья / И.В. Чуманов, А.Н. Аникеев, В.А. Иванов // Сталь. – 2011. – № 3. – С. 15–18.

[К содержанию](#)