

УДК 621.74.045:669.24:21.981

**Богуслаев А. В., Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В.**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Способ повышения уровня свойств материалов за счёт их химического состава в настоящее время практически исчерпан. Одним из перспективных направлений получения сплавов с заданной микроструктурой и принципиально новым уровнем свойств является модифицирование их нерастворимыми ультрадисперсными порошками (УДП).

Уже с 70-х годов прошлого века началось применение в литейном производстве ультрадисперсных материалов, основанное на известном физическом явлении, повышения упрочняющих свойств модификаторов с уменьшением диаметра частиц, в результате чего увеличивается их удельная поверхность и реакционная способность.

Современные разработки направлены на получение наноразмерных материалов, совершенствование методов их применения, способов ввода в расплав и изучение механизма их воздействия на качественные характеристики материала или готовой отливки.

Установлено [1], что стали и сплавы, в сравнении с распространёнными методами модифицирования и микролегирования, гораздо интенсивнее упрочняются при суспензионном модифицировании их ультрадисперсными порошками (УДП) тугоплавких соединений, частицы которых являются мельчайшими кристаллами (0,01...1 мкм), а также комплексными модификаторами, упрочняющими сплав на нескольких структурных уровнях. На структурном уровне кристаллических решёток такие частицы равномерно распределяются внутри зёрен и имеющихся межфазных границ.

Большую роль в высокодисперсных системах при формировании физико-химических и механических свойств играют поверхностные явления.

Для каждого сплава и вида модификатора требуется своё оптимальное количество вводимого модификатора (обычно до 0,1 % массы сплава) [2]. В зависимости от состава сплава и поставленной задачи (измельчение зерна, повышение прочностных или пластических характеристик) определяют температуру расплава и допустимое время ввода модификатора в расплав до момента разлива [3].

Целью данной работы является изучение влияния модифицирования различными ультрадисперсными порошками на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ.

Процессы объёмного модифицирования тугоплавкими соединениями жаропрочных никелевых сплавов связаны с трудностями их введения в расплав и равномерного распределения по объёму металла.

Введение в сплав дисперсных тугоплавких частиц может производиться с помощью лигатур. Недостатком этого способа является трудоёмкость изготовления лигатуры с равномерным распределением дисперсных частиц и сложностью получения стабильных результатов модифицирования.

Наиболее распространённый в практике метод введения УДП для модифицирования литейных сплавов – таблетирование материалов-модификаторов. Это позволяет вводить малые количества (порядка 0,05 %) ультрадисперсных модификаторов и эффективно распределять их по всему объёму металла. Метод таблетирования позволяет изготовить одну таблетку на определённый вес отливки (до 10 кг). Брикетты модификатора вводят в заданный момент через дозатор на зеркало металла.

Известно, что при нагревании нанопорошка на воздухе, и даже в инертной атмосфере, частицы начинают тлеть при 330...400 °С и сгорают в собственных адсорбированных газах. Поэтому одним из неизменных условий получения эффекта модифицирования при вводе

частиц в расплав является плакирование их защитной оболочкой из вещества основы модификатора (протектора) в процессе его растворения в расплаве. В качестве плакирующего вещества следует применять элементы, входящие в состав стали или сплава.

В условиях АО «Мотор-Сич» разработана технология модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ ультрадисперсным порошком карбонитрида титана.

Поскольку, как было указано выше, модификатор TiCN не представляется возможным ввести в расплав в чистом виде, поэтому изготавливаются брикеты (рис. 1), основой которых является порошок титана. Для изготовления брикетов применяли: порошок титана электролитический марки ПТ5-1, ТУ4-10-028-98 и порошок карбонитрида титана, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), ТУ48-19-438-88.

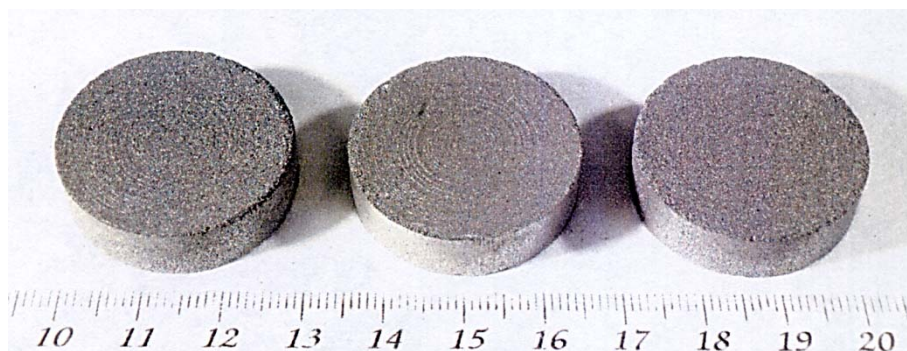


Рис. 1. Брикеты для модифицирования жаропрочных никелевых сплавов

Модификатор вводили в сплав в количестве 0,05...0,1 %. Шихта для изготовления брикетов состояла из одной весовой части карбонитрида титана и пяти весовых частей титана (протектора).

Отвешенные порошки высыпали на противень из нержавеющей стали, перемешивали вручную, затем в смесителе с эксцентричной осью вращения, заполнив его объём не более чем на 1/3. Для лучшего перемешивания добавляли «жучки» (полоски листового титана размерами 1 × 12 × 30 мм, согнутые под углом 90°) в количестве 20 % от массы шихты. Процесс перемешивания шихты длился 8 часов.

Прессование брикетов из приготовленной шихты производили в стальной пресс-форме с удельным давлением 0,7 т/см<sup>2</sup>. Масса брикетов зависит от массы отливок и обеспечивает содержание TiCN в сплаве около 0,05 %.

Для дегазации составляющих порошков и придания брикетам механической прочности производили спекание в вакууме (остаточное давление 1 · 10<sup>-3</sup>...1 · 10<sup>-4</sup> мм рт. ст.) при температуре 850 ± 20 °С в течение 1...2 часов в зависимости от массы садки.

Содержание углерода в брикетах должно составлять 0,4...0,8 %. Пористость таблеток определялась геометрическим методом (ГОСТ 18898-73) и должна составлять 35...45 %. Качество каждой партии модификатора TiCN проверяли на специально отливаемых образцах для механических испытаний из жаропрочных никелевых сплавов.

На АО «Мотор – Сич» проведен комплекс исследований по оценке влияния модифицирования ультрадисперсными частицами, полученными различными способами на состав структуру и свойства литых образцов жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ и изготовленных из него рабочих лопаток.

Модифицирование производили брикетами обеспечивающими ввод 0,05 % ультрадисперсного порошка [Ti(C,N)] по массе, полученных методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и плазмохимическим различных производителей.

Содержание компонентов в таблетке на первом этапе находилось в следующем соотношении: Ti – 90 %; Ti(C,N) – 10 %.

Плавку проводили в печи УППФ-3М при температуре  $1600 \pm 10$  °С с последующей термовременной обработкой расплава при температуре 1850 °С в течение 7 минут. Модификатор  $Ti[Ti(C,N)]$  вводили в таблетированном состоянии в количестве 20 г из расчета на плавку массой 3 кг при температуре  $1650 \pm 10$  °С с выдержкой 1,0...1,5 мин.

Заливку расплава производили при температуре  $1550 \pm 10$  °С в нагретые до температуры 900 °С керамические формы.

Исследование проводили в сравнении со сплавом, полученным без использования модификатора с проведением термовременной обработки расплава.

Химический состав исходного сплава ЖСЗДК-ВИ (без присадки модификатора) соответствовал требованиям ОСТ 1.90.126-85.

В плавках, модифицированных карбонитридом титана, наблюдалось повышение содержания титана в сравнении с исходным сплавом примерно в 1,2 раза и требованиями ОСТ – в  $\sim 1,05...1,1$  раза. Исправить данную проблему в дальнейшем удалось изменением содержания компонентов в брикете на соответствующее пропорции:  $Ti : Ti(C, N) = 5 : 1$ .

Содержание остальных элементов в металле опытных плавок отвечало требованиям ОСТ 1.90.126-85.

Макроструктуру выявляли методом химического травления в реактиве, состоящем из 80 % HCl и 20 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Установлено, что размер макрозерна образцов, модифицированных карбонитридными частицами, примерно в 1,5...2,5 раза меньше, чем в аналогичных образцах, отлитых по серийной технологии.

Физико-механические свойства определяли на отдельно отлитых пальчиковых образцах диаметром 12 мм после их термической обработки по стандартному режиму: гомогенизация при температуре 1210 °С (выдержка 3,5 часа), охлаждение на воздухе.

Модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ карбонитридом титана способствовало повышению механических и жаропрочных свойств, при незначительном снижении значений относительного удлинения (в пределах требований технической документации). Жаропрочность модифицированного металла в  $\sim 2$  раза выше значений, полученных на серийных образцах. Следует отметить, что для образцов всех вариантов модифицирования характерна стабильность полученных результатов.

Микроструктура пальчиковых образцов после термообработки по стандартному режиму характерна для сплава ЖСЗДК-ВИ и представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор, упрочненный интерметаллидной  $\gamma'$ -фазой, с наличием карбидов и карбонитридов (рис. 2).

Модифицирование сплава ультрадисперсными частицами приводит к измельчению дендритной структуры (см. рис. 2). При этом уменьшается размер дендритной ячейки и расстояние между осями дендритов второго порядка.

Модифицирующее воздействие частиц карбонитрида титана также проявляется на распределении и изменении морфологии первичных карбидов. При введении в расплав таблетки  $[Ti + Ti(C, N)]$  происходит более равномерное распределение карбидных фаз. Первичные карбиды приобретают более благоприятную морфологию, выделяясь в виде дискретных глобулярных частиц.

В модифицированном сплаве наблюдается повышение количества равномерно распределенных в объеме металла карбонитридных частиц размером  $\sim 2...8$  мкм.

При всех вариантах модифицирования карбонитридными частицами наблюдается повышение микротвердости.

В образцах с присадками модификатора  $[Ti + Ti(C, N)]$  границы зерен более тонкие с выделением по ним мелких дискретных карбидов.

На АО «Мотор-Сич» проведен комплекс исследований влияния модифицирования УДП карбонитрида титана на структуру и физико-механические характеристики материала рабочих турбинных лопаток, отлитых из сплава ЖСЗДК-ВИ.





Модифицирующее воздействие частицами карбонитрида титана также проявляется на распределении и изменении морфологии первичных карбидов. Происходит более равномерное распределение карбидных фаз. Первичные карбиды приобретают более благоприятную морфологию, выделяясь, в основном, в виде дискретных глобулярных частиц. В модифицированном сплаве карбонитриды равномерно распределены в объеме металла, размер их составляет  $\sim 2 \dots 8$  мкм.

В исследуемых лопатках обнаружена усадочная микропористость. При этом в модифицированных лопатках размер и количество микропор в  $\sim 3$  раза меньше, чем в немодифицированных.

Физико-механические свойства определяли на отдельно отлитых пальчиковых образцах диаметром 12 мм после их термической обработки по стандартному режиму: гомогенизация при температуре 1210 °С с выдержкой в течение 3,5 часов и охлаждение на воздухе.

Механические свойства немодифицированных образцов были достаточно нестабильны. Модифицирование сплава ультрадисперсным карбонитридом титана способствовало повышению как прочностных, так и пластических характеристик.

Жаропрочные свойства сплава ЖСЗДК-ВИ с присадками [Ti + Ti(C, N)] примерно в 1,5 раза превышали значения, полученные на образцах, отлитых по серийной технологии.

Макро- и микроструктура образцов, прошедших длительные испытания при температуре 850 °С, характеризовалась более однородным строением вследствие выравнивания химического состава между осями и межосными пространствами дендритов. Наблюдалось некоторое огрубление структуры за счет фазовых выделений как внутри, так и по границам зерен.

## ВЫВОДЫ

Модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ карбонитридом титана в количестве 0,05 % способствует повышению механических и жаропрочных свойств, при незначительном снижении значений относительного удлинения (в пределах требований технической документации). Жаропрочность модифицированного металла в  $\sim 2$  раза выше значений, полученных на серийных образцах.

Присадка УДП карбонитрида титана способствует измельчению макроструктуры сплава. При этом уменьшается размер дендритной ячейки и расстояние между осями дендритов второго порядка, а также количество и размер микропор.

После присадки модификатора наблюдается повышение количества карбонитридных частиц. Частицы равномерно распределены в объеме металла, размер их составляет  $\sim 2 \dots 8$  мкм. Первичные карбиды в модифицированном сплаве приобретают более благоприятную морфологию, выделяясь в виде дискретных глобулярных частиц.

Образование трещин на лопатках, при малом угле загиба в процессе испытания на изгиб, обусловлено наличием в зоне разрушения дефектов литейного происхождения.

Таким образом, модифицирование жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ различными ультрадисперсными порошками, несомненно, является перспективным направлением улучшения комплекса его физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик, как материала рабочих лопаток газотурбинных двигателей, но при этом требует проведения дополнительных глубоких исследований и отработки четкой технологии его применения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сабуров В. П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов / В. П. Сабуров // *Литейное производство*. – 1988. – № 9. – С. 7–8.
2. Седельников В. В. Закономерности влияния ультрадисперсных порошков на физико-механические свойства фосфатно-силикатных связующих и литых заготовок : дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.16.04 : литейное производство / В. В. Седельников. – Новокузнецк, 2006 г. – 186 с.
3. Фаткуллин О. Х. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицам тугоплавких соединений / О. Х. Фаткуллин // *Литейное производство*. – 1993. – № 4. – С. 13–14.

Статья поступила в редакцию 16.10.2011 г.