Б.А.Баум, Е.Е.Барышев, В.С.Цепелев, Г.В.Тягунов
Уральский технический университет, г. Екатеринбург

УДК 504.064.043

КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ СПЛАВОВ

Предложены мероприятия по использованию техногенных металлургических отходов при производстве высококачественных сплавов. Изучены температурные зависимости физических свойств жидких жаропрочных сплавов, установлены критические температуры, нагрев до которых приводит к необратимым интенсивным изменениям в строении расплава. Обнаружена взаимосвязь между количеством литейных отходов в шихте и видом и особенностями температурных зависимостей физико-химических свойств расплава. С ростом количества отходов повышаются критические температуры. Высокотемпературная обработка расплава позволяет существенно улучшить качество отливок из жаропрочных сплавов, содержащих значительное количество литейных техногенных отходов в шихте.

The measures of technogen metallurgical waste utilization during high quality alloys production have been offered. The temperature dependences of liquid superalloys physical properties have been studied, the critical temperatures heating above which leads to irreversible intensive changes of melt state have been The interrelation between cast waste amount in the scrap and peculiarity of melt physico-chemical properties temperature dependences has been founded. The increasing of waste amount leads to growth of critical temperatures. The use of melt high temperature treatment gives opportunity to considerably improve casting quality of superalloys which consist the great amount of cast technogen waste in the scrap.

Многолетний опыт производства свидетельствует, что одним из важнейших резервов уменьшения структурной и химической неоднородности литого металла, повышения качества продукции электросталеплавильного производства является совершенствование технологии процесса выплавки, получение равновесного, максимально однородного расплава перед кристаллизацией. Это подтверждают и экспериментальные исследования строения и свойств промышленных металлических расплавов. В настоящее время кристаллизация промышленного металла (обычно из неравновесного состояния) усиливает химическую и физическую неоднородность твердого металла, что снижает его производственные характеристики, приводит к значительным отклонениям его качества от плавки к плавке.

Существуют разные способы перевода расплава в равновесие: электромагнитное перемешивание, воздействие ультразвуком, высоко- и низкочастотные механические колебания и т.п. Наиболее доступным способом получения равновесного расплава служит высокотемпературное воздействие.

Поскольку процесс перехода системы в состояние равновесия в результате ее нагрева происходит немонотонно и сильно ускоряется при достижении критических температур, нагрев металла до этих температур является главной особенностью новых про-

грессивных технологий. При охлаждении подготовленного таким образом жидкого металла, его исходная (неравновесная) структура не восстанавливается, т.е. перед кристаллизацией строение расплава оказывается равновесным или близким к нему и существенно отличается от исходного.

Установлены влияние условий выплавки, характера ввода легирующих и модифицирующих добавок на вид и особенности политерм свойств, взаимосвязь между строением и свойствами материалов в жидком и твердом состоянии* На основании полученных результатов рекомендованы оптимальные температурно-временные параметры плавки и литья жаропрочных сплавов, обеспечивающие улучшение качества и повышение служебных свойств металлопродукции** Такая обработка получила название высокотемпературной обработки расплава (ВТОР). Однако в настоящее время вторичное использование металлургических отходов жаропрочных никелевых сплавов в шихте на предприятиях машиностроительного комплекса ограничено из-за последующего высокого брака при литье. Эти нежелательные эффекты вызваны накоплением в шихтовой заготовке различных, зачастую неконтролируемых примесей, которое приводит к резкому ухудшению структуры и свойств отливки, изменяет характер политерм физических свойств расплава и температурно-временные параметры плавки жаропрочного сплава.

Сплав ЭП902 является среднелегированной жаропрочной композицией на никелевой основе. Особенности легирования сплава (наличие 6-7 % Nb, 0,5-1,2 % Al, отсутствие в сплаве титана) позволяет получать детали плавкой в открытых индукционных печах.

При разработке режимов ВТОР при плавке сплава ЭП902 необходимо учитывать технологические особенности, которые, в первую очередь, определяются открытым типом выплавки в индукционных печах. Это наведение шлака после расплавления шихты, ввод раскислителей по ходу плавки, разливка из печи через промежуточный чайниковый ковш. Немаловажной особенностью является и тот факт, что технология выплавки предполагает использование в шихте до 50 % металлургических отходов собственного производства.

Необходимо отметить, что включение операции ВТОР в технологический процесс плавки предъявляет высокие требования к качеству тигля и футеровки печи, а также к температурному контролю по ходу плавки.

Для разработки оптимального режима плавки жаропрочного сплава ЭП902 исследованы температурные зависимости его физических свойств в жидком состоянии. Анализ политерм кинематической вязкости, удельного электросопротивления, плотности и поверхностного натяжения сплава, выплавленного на чистых компонентах, позволил установить следующее:

- зависимость кинематической вязкости от температуры при небольших перегревах выше температуры ликвидус подчиняется классическому экспоненциальному закону. Ветви нагрева и охлаждения совпадают;
- дальнейшее повышение температуры вызывает аномальный скачок абсолютных значений вязкости, который заканчивается при критической температуре. Последующее охлаждение приводит к появлению гистерезиса. Величина гистерезиса, т.е. несовпадения значений вязкости при нагреве и охлаждении, не зависит от величины перегрева выше критической температуры, что свидетельствует о том, что основные перестройки структуры ближнего порядка расплава происходят в интервале критических температур;
- политермы удельного электросопротивления сплава ЭП902 имеют вид, характерный для жаропрочных никелевых сплавов (при нагреве до критической температуры происходит резкое увеличение значений электросопротивления, при последующем охлаждении наблюдается гистерезис);
- на температурных зависимостях плотности и поверхностного натяжения в интер-

---

* Состояние многокомпонентной металлической системы после фазового перехода кристалл – жидкость / Б.А.Баум, Г.В.Тягунов, Е.Е.Барышев, В.С.Цепелев // Расплавы. 1999. № 5.

** Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В.и др. Жидкая сталь. М.: Металлургия, 1984.

вале критических температур также наблюдаются аномальные участки.

Аномальные изменения температурных зависимостей свойств обусловлены интенсивным разрушением неравновесных атомных ассоциаций, наследуемых расплавом от шихтовых материалов, и соответствуют переходу в равновесное жидкое состояние.

Введение в шихту при плавке сплава ЭП902 отходов собственного производства показало, что значения критических температур зависят от количества металлургических отходов. Так, с увеличением доли отходов до 50 % критическая температура возрастает на 40-50 °С.

Изучено влияние состояния расплава на процесс кристаллизации и структуру твердого металла. Процесс затвердевания сплава ЭП902 исследован методом дифференциального термического анализа. Кристаллизация сплава начинается с выделения кристаллов твердого никелевого раствора на основе γ-фазы. При последующем охлаждении начинает выделяться двойная эвтектика на основе γ- и γ'-фаз. Для сплава ЭП902 γ'-фаза имеет состав Ni_3Nb. На последних стадиях кристаллизации выделяются тройная и более сложные эвтектики. Несколько ниже температуры солидус из γ-твердого раствора выделяются мелкодисперсные частицы вторичной γ'-фазы игольчатой морфологии.

Состояние расплава оказывает существенное влияние на температуры фазовых превращений при кристаллизации. Формирование микрооднородного равновесного расплава при выплавке приводит к понижению температуры ликвидус, т.е. увеличению переохлаждения. Вместе с тем интервал кристаллизации сужается, что благоприятным образом сказывается на качестве отливки.

Исследовано влияние температуры нагрева расплава в ходе плавки на структуру и свойства отливки. Показано, что нагрев расплава выше критической температуры приводит к измельчению размера зерна и повышению пластических свойств.

Выводы

1. Предложены мероприятия по использованию техногенных металлургических отходов при производстве высококачественных прецизионных сплавов. Изучены температурные зависимости физических свойств жидких жаропрочных композиций на основе системы Ni Nb – Cr – Mo. Для сплава ЭП902 установлены критические температуры, нагрев до которых приводит к необратимым интенсивным изменениям в направлении улучшения состояния расплава.

2. Обнаружена взаимосвязь между количеством литейных отходов в шихте и видом и особенностями температурных зависимостей физико-химических свойств расплава. С увеличением количества отходов повышаются критические температуры, свидетельствующие о переходе расплава в равновесное состояние.

3. Использование высокотемпературной обработки расплава позволяет существенно улучшить качество отливок из жаропрочных сплавов типа ЭП902, содержащих значительное количество литейных техногенных отходов в шихте.