

него и моделирует условия отвода тепла от литейной формы или изложницы в окружающую среду.

Проведенные исследования особенностей теплопередачи при физическом моделировании показали принципиальную возможность управления тепловыми потоками, определяющими условия образования двухмерных кристаллов олова на подложке из определённого материала.

Согласно разработанной методике на спроектированной и изготовленной установке были проведены эксперименты по моделированию процессов кристаллизации реальных отливок и литых заготовок, полученных в определённых условиях в результате управляемой кристаллизации. Для этого при охлаждении образцов на соответствующей подложке создавали тепловые условия обеспечивающие получение в тонком двумерном слое олова макроструктуры, соответствующей макроструктуре, формирующейся в определённых сечениях и на поверхностях трёхмерных отливок.

Модель направленной макроструктуры была получена при интенсивном охлаждении образца с подложкой из нихрома на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе вначале процесса с последующим его медленным выведением с нагревателя. Применение подложки из материала с низкой теплопроводностью создаёт условия, когда отвод тепла от образца медным водоохлаждаемым кристаллизатором существенно превышает его подвод через образец за счёт его теплопроводности и обеспечивает наличие высокого температурного градиента на фронте кристаллизации, под воздействием которого и формируется направленная макроструктура растущих кристаллов в тонком слое олова.

Макроструктура поперечного сечения массивной медной литой заготовки была получена при медленном выведении с нагревателя образца на нихромовой подложке. Нихром, как материал с малой теплопроводностью, создал условия подобные медленной кристаллизации массивной заготовки.

Охлаждение образца на подложке из нихрома после отключения нагревателя на воздухе дало картину макроструктуры лопатки из жаропрочного никелевого сплава с равноосной структурой. Величина зерна зависит от интенсивности отвода тепла от формирующейся отливки и физической модели и может быть уменьшена за счёт замены материала подложки на медь, обладающую гораздо большей теплопроводностью.

Разработанный метод физического моделирования процессов управляемой кристаллизации отливок и установка для его осуществления внедрены в учебный процесс подготовки специалистов в рамках дисциплины «Теория литейных сплавов» на кафедре «Машины и технология литейного производства» Запорожского национального технического университета.

УДК 621.74.045

В. В. Наумик, В. В. Клочихин, Э. И. Цивирко, В. В. Лунёв
Запорожский национальный технический университет, Запорожье

ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Для изучения трещиностойчивости из жаропрочных никелевых сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ управляемой равноосной и высокоскоростной направленной кристаллизацией изготовили пустотелые тонкостенные литые образцы длиной 150 мм с толщиной стенки 2 мм с внутренним стержнем из высокоглинозёмистого практически неподатливого материала (алунда) диаметром 12 мм с толщиной стенки 2 мм.

Визуальным осмотром после удаления огнеупорного покрытия на поверхности всех образцов с равноосной макроструктурой были обнаружены продольные поперечные и косые трещины, имеющие тёмно-жёлтый цвет побежалости, что явно говорит об их горячем происхождении. Травление на макроструктуру показало, что трещины проходят по границам отдельных макрокристаллов.

Примерно 75 % образцов с направленной макроструктурой были получены без видимых дефектов. Визуальным осмотром продольные трещины были выявлены только на отдельных полученных образцах.

Изучение образцов после травления на макроструктуру показало, что горячие продольные трещины образовывались только по границам «паразитных» кристаллов, зарождавшихся уже в процессе кристаллизации цилиндрической части образцов [1]. На образцах с монокристаллической макроструктурой горячих трещин выявлено не было.

Таким образом, при высокоскоростной направленной кристаллизации образцов из жаропрочных никелевых сплавов горячие трещины, вызванные затруднённой усадкой, возникают лишь в отдельных случаях и обусловлены нарушением тепловых условий кристаллизации.

Качественная оценка нетравлённых шлифов показала, что в образцах, полученных в процессе равноосной кристаллизации, карбиды размещались в междендритных пространствах и образовывали своеобразный каркас, что неизбежно приводило к снижению пластичности жаропрочного сплава. В образцах, полученных в результате высокоскоростной направленной кристаллизации, карбиды располагались равномерно и не смыкались вокруг осей дендритов.

Металлографическим анализом материала опытных образцов после травления установлено [2], что в результате направленной кристаллизации, в сравнении с объёмной, произошло существенное измельчение дендритной

структуры жаропрочных никелевых сплавов.

Одновременно наблюдали измельчение эвтектической $\gamma+\gamma'$ -фазы. Количество последней в результате изменения условий кристаллизации заметно не изменилось.

Установлено [2, 3], что горячие трещины в образцах с равноосной структурой зарождались по карбидному каркасу перпендикулярно поверхности образца.

В результате направленной кристаллизации опытных образцов, в сравнении с объёмной, заметно повысилась микротвёрдость всех структурных составляющих жаропрочных сплавов. Это свидетельствует о том, что химический состав осей дендритов, межосий и эвтектической $\gamma+\gamma'$ -фазы, после направленной кристаллизации существенно отличается от состава тех же структурных составляющих в металле после объёмной кристаллизации. Анализ полученных результатов указывает на большую однородность химического состава материала образцов, полученных в результате высокоскоростной направленной кристаллизации.

Механические испытания показали [2], что образцы сплава ЖС26-ВИ с направленной макроструктурой, в сравнении с равноосной, обладали несколько меньшей прочностью (σ_B , соответственно, 900 и 915 МПа), большей пластичностью при комнатной температуре (δ , соответственно, 11,7 и 6,9 %) и значительно большей длительной прочностью при высоких температурах (соответственно, 111 часов до разрушения при 975 °С и $\sigma = 260$ МПа, и 64,5 часа при 975 °С и $\sigma = 230$ МПа). Это можно объяснить отсутствием в сплаве после высокоскоростной направленной кристаллизации хрупкого карбидного каркаса, его гораздо более мелкой и однородной дендритной структурой и измельчением эвтектической $\gamma+\gamma'$ -фазы.

Таким образом, высокоскоростная направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов, в сравнении с объёмной, приводит к разрушению карбидного каркаса вокруг дендритных осей и равномерному распределению карбидов по структуре сплава, к измельчению дендритной структуры и уменьшению размеров эвтектической $\gamma+\gamma'$ -фазы, выравниванию неоднородностей химического состава структурных составляющих. В результате существенно возрастают пластичность и длительная прочность сплавов, устойчивость к образованию трещин в условиях затруднённой усадки и, следовательно, повышаются эксплуатационные свойства изготавливаемых отливок.

Список литературы

1. Наумик В. В. Перспективы использования возврата при получении качественных отливок с управляемой кристаллизацией / Наумик В.В., Цивирко Э.И., Лунёв В.В.

// Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 37 – 43.

2. Цивірко Е.І. Об'ємна та спрямована кристалізація нікелевих сплавів / Е.І. Цивірко, В.В. Клочихін, О.Г. Коломойцев, В.В. Наумик // Металознавство та обробка металів. – 2000. – № 3. – С. 5 – 11.

3. Цивирко Э.И. Процессы кристаллизации, структура и свойства отливок из никелевых жаропрочных сплавов / Э.И. Цивирко, П.Д. Жеманюк, В.В. Клочихин, В.В. Наумик, В.В. Лунёв // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 10. – С. 13 – 17.

УДК 621.74

К. Г. Низяев, Б. М. Бойченко, А. Н. Стоянов

Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск

НОВЕЙШАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ АКТИВНЫМИ РЕАГЕНТАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ В ОБЪЕМЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО РАСПЛАВА В ЗОНЕ ЭЛЕКТРОДУГИ

Наиболее динамично развивающейся областью сталеплавильного производства в настоящее время является внепечная обработка. Применение в структуре сталеплавильного цеха установок типа «ковш-печь» в сочетании с более традиционными методами практически неограниченно расширило возможности внепечной обработки: от производства высоколегированных марок до сталей со сверхнизким содержанием примесей. Вместе с тем практика работы отечественных и зарубежных металлургических предприятий показывает, что существующие технологии обработки металла в ковше многостадийны и достаточно продолжительны во времени. Так, длительность обработки стали с целью корректировки ее температуры и химического состава составляет в зависимости от поставленной задачи от 20 до 80 минут. Это вызывает определенные затруднения организационного характера, особенно в работе конвертерного цеха.

Сократить длительность обработки возможно за счет совмещения операций нагрева стали и корректировки ее химического состава, как в «ковше-печи». Более эффективно можно решить поставленную задачу обработкой металла в ковше погружаемой электрической дугой. Применение погружаемого блока специальной конструкции, наличие в материале, изолирующем электроды от окружающего металла, газообразующих, рафинирующих и (или) легирующих реагентов позволяет совместить нагрев и обработку железоуглеродистого расплава, дозированный ввод и высокий коэффициент усвоения реагентов, наиболее полное использование их реакционной способности.

На кафедре металлургии стали НМетАУ создана принципиально новая