

УДК 621.745.5:66.046.5

*В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, В. Б. Сидак, А. Н. Сушков*  
*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,*  
*Киев*

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ**

В последние годы проявляется большой интерес к жидкофазной восстановительной плавке, позволяющей получать сплавы из различных оксидосодержащих материалов, в том числе из первородного рудного сырья. Эффективность этого процесса плавки подтверждена данными многочисленных исследований. Несмотря на это, данные о влиянии технологических факторов на экономические показатели жидкофазной плавки в литературе отсутствуют.

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины на основе экспериментальных данных выполнена оценка технико-экономической эффективности восстановительной плавки.

Установлено, что на показатели процесса плавки влияет технология плавки. Так, при плавке оксидных материалов на жидком “болоте” металла достигается более высокая степень восстановления металла и низкий удельный расход электроэнергии по сравнению с плавкой в жидком шлаке. При плавке на жидком “болоте” металла удельный расход электроэнергии в 3 раза ниже, а степень восстановления, например, хрома на 11-12 % выше.

Выявлено, что основными технологическими факторами, влияющими на экономические показатели плавки, являются технология ведения плавки, содержание оксидов металла в шихте и качество подготовки шихты. Эти факторы оказывают существенное влияние на энергоёмкость процесса плавки, являющейся основным показателем эффективности плавки.

Так, например, энергоёмкость плавки нержавеющей стали X18N10 из шихты, содержащей углеродистую сталь, оксиды хрома и никеля, по сравнению с обычной плавкой увеличивается на 23 %. Выплавка стали с содержанием хрома 30 % повышает энергоёмкость процесса плавки на 45 %.

Следует отметить, что энергоёмкость жидкофазной плавки будет всегда выше по сравнению с обычной. Однако большая разница в стоимости легирующих элементов в виде ферросплавов и оксидов металла полностью покрывает дополнительные затраты на энергоноситель при восстановительной плавке.

УДК 669.06:621.746.6.001.57

*В. В. Наумик*  
*Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

### **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВОК**

Изучили особенности теплопередачи при моделировании процессов кристаллизации, осуществляемом на разработанной и собранной установке, согласно разработанной методике.

В процессе моделирования образец перемещается относительно плоского нагревателя и кристаллизатора. При этом теплопередача от нагревателя через образец к кристаллизатору, а также к окружающему образцу воздуха осуществляется, в основном, за счет теплопроводности.

Для изучения процессов теплопередачи использовали образцы на подложках из меди и нихрома. Первые из них предназначались для моделирования теплофизических условий процессов кристаллизации меди и её сплавов, вторые – жаропрочных сплавов на основе никеля.

Установленные на плоский нагреватель образцы нагревали до температуры 250 °С и циклически перемещали. Длина одного цикла перемещения составляла 10 мм, после чего следовала пауза до стабилизации температуры (обычно 8 – 10 с). Установившаяся температура фиксировалась цифровым милливольтметром в течение восьми циклов, при этом торец образца с закрепленной в нем термопарой удалялся на расстояние 70 мм от края плоского нагревателя.

В результате были получены графики, являющиеся аналогами термограмм охлаждения отливок, соответственно, из меди и жаропрочного сплава в различных условиях отвода тепла.

Представляет практический интерес изучение изменения температуры образцов в процессе их непрерывного перемещения через нагреватель и охлаждающую среду, так как по такой схеме осуществляется ряд технологических процессов при непрерывном литье заготовок. Исследование было выполнено на образцах из меди и нихрома. Характер кривых охлаждения для указанных образцов был практически идентичным.

Рассчитаны продольный и поперечные тепловые потоки, проходящие через образцы с медной и нихромовой подложкой для различных условий охлаждения. Показано, что определяющее влияние на процессы формирования двумерных кристаллов олова при физическом моделировании имели продольный тепловой поток, который зависит от материала подложки и создаёт условия теплопередачи, подобные реальным внутри формирующейся отливки, и поперечный, который определяется интенсивностью отвода тепла кристаллизатором и режимом перемещения образца относительно

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