

Титова Е.С.,
ведущий инженер
Институт черной металлургии
Национальной академии наук Украины, Украина
Титова Т.М.,
канд. техн. наук, доцент
Днепродзержинский государственный технический университет, Украина

Участник конференции
Национального первенства по научной аналитике
Открытого Европейско-Азиатского первенства по научной аналитике

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СРЕДСТВ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ СОЗДАНИИ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Представлены результаты оптимизации технологических параметров непрерывной разливки, полученные на основании изучения теплофизических процессов затвердевания непрерывнолитой биметаллической сталемедной заготовки с использованием математического моделирования. Для оценки эффективности воздействия наночастиц на микроструктуру литых биметаллов привлечены средства современной электронной микроскопии.

Ключевые слова: математическое моделирование, электронная микроскопия, затвердевание, наночастицы, микроструктура.

The results of optimization of process parameters of continuous casting, obtained on the basis of studies of thermal solidification processes of continuously steel-copper bimetallic billets using mathematical modeling are submitted. Tools of modern electron microscopy involved to assess the effectiveness of the impact of nanoparticles on the microstructure of cast composite metals.

Keywords: mathematical modeling, electronic microscopy, solidification, nanoparticles, microstructure.

В наш век, несмотря на разнообразие имеющихся материалов и появление новых, металлы и металлические сплавы, в частности, сталь, продолжают оставаться основным конструкционным материалом, возможности которого реализованы еще не в полной мере. При этом в ряде промышленно развитых стран металлургия является базовой отраслью экономики. В частности, в Украине вклад металлургии в ВВП составляет примерно 1/3 и 1/4 – валютных поступлений в бюджет страны. Суть основной проблемы, решаемой сегодня мировой металлургией, состоит в поиске инновационных экологически безопасных, энерго- и ресурсосберегающих технологий производства конкурентоспособной металлопродукции. Существенное истощение повсеместно запасов природных ископаемых, требует бережного отношения к природным ресурсам и поиска альтернативной их замены при одновременном удовлетворении постоянно ужесточающихся требований со стороны металлопотребляющих отраслей промышленности, техники и пр. к уровню физико-механических и эксплуатационных свойств металлопродукции.

Одним из эффективных путей решения рассматриваемой проблемы является разработка технологий и производство композиционных металлоизделий и, в частности, наноструктуриро-

ванных и биметаллических. Такой подход позволяет получить металлопродукцию с принципиально новым уровнем требуемых свойств, недостижимых в обычных металлических материалах, или требующих существенных затрат дорогостоящих компонентов. Для производства композитной биметаллической продукции, рассчитанной на массового потребителя, целесообразно использовать технологию получения слоистых заготовок в процессе непрерывного литья. Нами рассмотрен вариант получения сталемедных заготовок, представляющих собой медную наноструктурированную матрицу, армированную по центру стальной вставкой, что обеспечивает, одновременно, повышение износостойкости и конструктивной прочности композита [1].

В условиях отсутствия собственных разработок меди на Украине, периодическом дефиците и постоянно растущей цене на нее на мировом рынке, а также росте потребности в медной продукции особую актуальность приобретает переработка вторичных медных отходов. Одним из возможных вариантов решения проблемы увеличения объема производства высокопрочных медных заготовок, по размерам, близким к размерам готовых изделий, является их получение в процессе непрерывной или полунепрерывной разливки меди. Хорошо известно, что

широкое и повсеместное использование меди в различных отраслях промышленности и техники во всем мире обусловлено, прежде всего, ее высокой электро- и теплопроводностью. Однако низкие прочностные характеристики не позволяют использовать этот металл в условиях высоких динамических нагрузок. Области применения этого, практически незаменимого, металла можно значительно расширить, повысив прочностные свойства меди. Применяемые обычно методы упрочнения меди либо практически исчерпали свои возможности (термоупрочнение, легирование), либо (армирование) ведут к потере ее электропроводности. Для избежания этого негативного явления нами предпринята попытка наноструктурирования меди в процессе воздействия наночастиц тугоплавких соединений на ее расплав.

Создание и отработка технологии получения принципиально нового вида металлопродукции, начиная со стадии выплавки и разливки металла, в частности, отработка параметров технологии получения медных и сталемедных непрерывнолитых заготовок в реальных условиях производства, связаны с большими материальными и финансовыми затратами и усложняется «работой» с высокотемпературными и непрозрачными расплавами металлов. В данной ситуации

целесообразно прибегнуть к математическому моделированию, как наиболее эффективному и рациональному приему решения такого рода задач.

Анализ современных публикаций не позволил выявить наличие математических моделей описания процесса затвердевания сталемедной заготовки, получаемой в процессе взаимодействия расплава меди со стальной вставкой. Поставленная в работе цель, состоящая в определении особенностей влияния теплофизических параметров литья на процесс затвердевания сталемедной заготовки в кристаллизаторе для оптимизации параметров разрабатываемой технологии, достигается посредством создания соответствующей базовой математической модели, описывающей теплофизические процессы, происходящие в водоохлаждаемом кристаллизаторе с учетом кристаллизации и плавления заготовки. Математическая модель включает уравнения

передачи теплоты для медного расплава, стальной вставки, внутренней и внешней медной стенки кристаллизатора с соответствующими краевыми условиями. Учен также тепловой поток, отведенный от стенки кристаллизатора к воде, а также возможные наплавка слоя меди на стальную вставку и подплавление медной оболочки. Для описания перемещения фронта кристаллизации в формирующейся заготовке введен эффективный коэффициент теплопроводности в двухфазной среде, учитывающий механизм массопереноса тепла по длине заготовки [2]. При этом исходили из предположения, что ввод в медный расплав незначительного количества (тысячные доли %) мелкодисперсных частиц тугоплавких соединений нанометрового диапазона не окажет существенного влияния на температуру и скорость вытягивания затвердевающей заготовки.

Численные и графические расчеты,

выполненные по программе реализации математической модели, позволили определить параметры технологического процесса и условия управления процессом образования затвердевающей корочки посредством изменения скорости вытягивания заготовки, а также, зная необходимую минимальную толщину корочки, определить максимальную скорость вытягивания, при которой невозможен прорыв оболочки заготовки. Изменение же температурных параметров литья, режима охлаждения и скорости вытягивания заготовки позволяет управлять процессами продвижения фронта кристаллизации и температурой заготовки на выходе из кристаллизатора, которые могут оказывать значительное воздействие на качество получаемой заготовки. В качестве примера на рис. 1 показано определение оптимальной скорости вытягивания сталемедной заготовки ($V_{\text{выт.}}$) при изменении расхода воды (G) – (верхние ко-

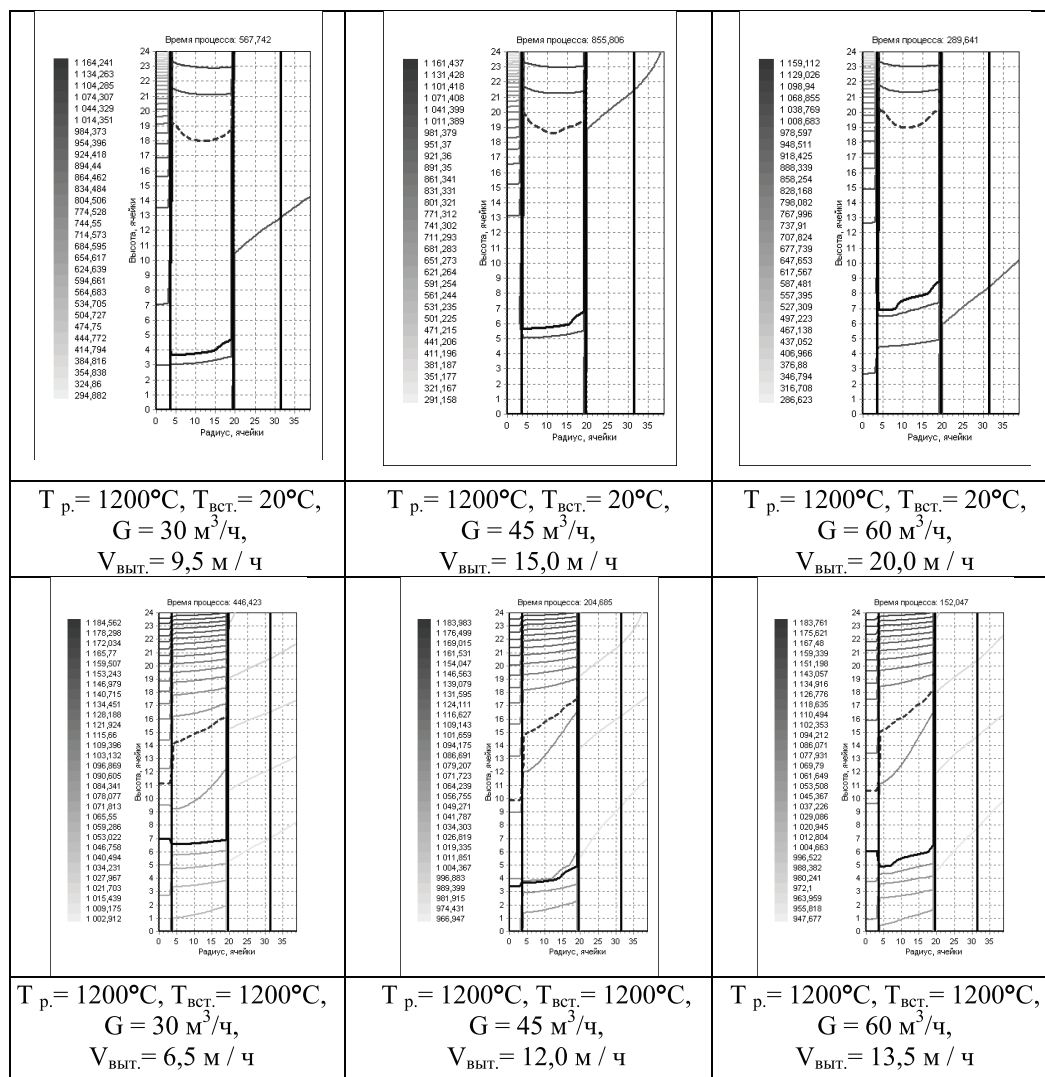


Рис. 1. Изменение параметров разливки и затвердевания сталемедной заготовки.

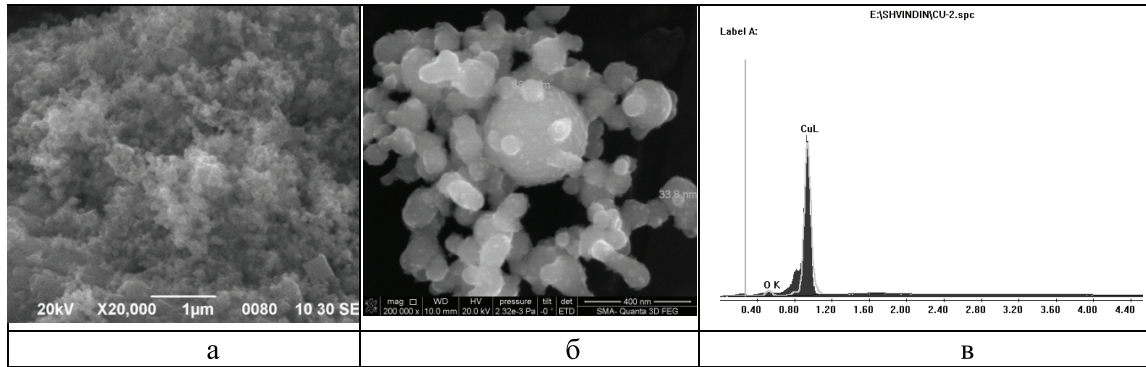


Рис. 2. Общий вид и размер ультрадисперсных частиц TiCN (а – увел. 20 000) и наночастиц меди (б – увел. 200 000); состав наночастиц меди (в).

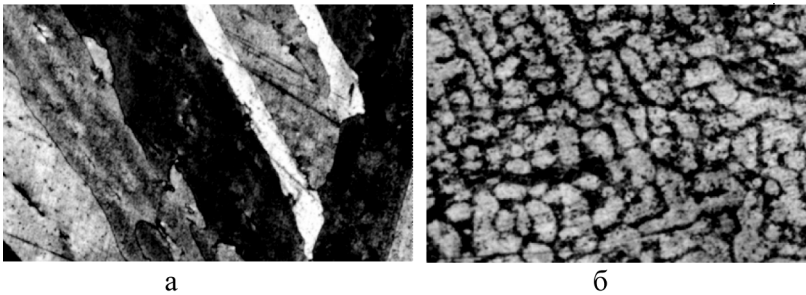


Рис. 3. Микроструктура меди без присадок наночастиц (а) и наноструктурированной наночастицами меди (б).

лонки) и температуры нагрева стальной вставки (Твст.) – (нижние колонки). Разработанная модель может быть использована для математического моделирования параметров технологий, предусматривающих формирование в кристаллизаторе непрерывнолитой заготовки из других металлов или их композиций.

Ввиду отсутствия общепризнанной теории модифицирования, наноструктурирования и направленного изменения структуры металлов и сплавов с помощью ультрадисперсных добавок особую актуальность представляет детальное исследование микроструктуры металлических композитов с предварительно введенными в них наночастицами, исследование которых стало возможным только благодаря появлению современных средств электронной микроскопии. Это, несомненно, позволит продвинуться по пути разработки теоретических основ наноструктурирования высокотемпературных металлических расплавов и понимания механизма воздействия наночастиц на их микроструктуру в процессе затвердевания, что представляет значительный научный и практический интерес, прежде всего, для грамотного и целенаправленно эффективного использования таких высокоактивных реагентов в металлургии.

При исследовании полученных литых сталемедных заготовок с введенными наночастицами различных тугоплавких соединений преследовали, прежде всего, цель определения эффективности воздействия последних на микроструктуру меди. При этом оценочной характеристикой являлась степень дисперсности микроструктуры меди. С помощью средств современной электронной микроскопии: растрового электронного микроскопа Ultra plus фирмы Carl Zeiss, японского микроанализатора нового поколения фирмы Jeol, а также микрорентгеноспектрального анализа (Camebax) уточнен состав и морфология вводимых ультрадисперсных частиц, полученных плазмохимическим синтезом. (Рис. 2 иллюстрирует морфологию и размер вводимых наночастиц).

В ходе проведенного металлографического исследования обнаружено существенное измельчение микроструктуры меди (в 5-10 раз) под действием наночастиц меди, карбидов кремния, бора и карбонитридов титана (рис. 3).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа и замеры микротвердости зоны контакта слоев сталемедного композита свидетельствуют о ее прочности и надежности.

Ввод в медный расплав наночастиц,

обеспечивающих получение однородной мелкодисперсной микроструктуры во всем объеме подвергнутого воздействию слитка (заготовки), может быть существенным резервом повышения качества металлопродукции.

Изучение теплофизических процессов затвердевания и микроструктуры биметаллических заготовок с наноструктурированным поверхностным слоем с помощью математического моделирования и средств современной электронной микроскопии обеспечивают активное воздействие на процесс кристаллизации непрерывного слитка непосредственно по ходу разлива с гарантированной возможностью управления процессом структурообразования формирующихся композитных непрерывнолитых заготовок. Выполненные исследования показали, что получение качественно нового состояния традиционно используемой меди на основе формирования и самоорганизации упрочняющих наноструктур представляет важнейший компонент повышения конкурентоспособности медных изделий на мировом рынке.

Литература:

1. Титова Е.С., Титова Т.М. Концепция технологии получения литых наноструктурированных сталемедных композитов и ее поэтапная реализация / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №7. – С. 184-186.
2. Титова Е.С. Математическое моделирование процесса затвердевания медных и сталемедных заготовок при непрерывном литье / Е.С. Титова Е.С., А.Н. Сокол, Т.М. Титова [и др.] / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. - Вип.42. – 324с. – С.274 – 278.