

денсатов и получать практически любые сложеннолегированные композиции. Нанокompозитные покрытия не только обеспечивают высокую микротвердость поверхностного слоя инструмента и низкую степень его взаимодействия с обрабатываемым материалом, но и повышают его вязкость. Особым направлением исследований, которые необходимо проводить до реализации промышленных процессов, является создание условий, обеспечивающих безопасность исследователей и производителей от возможного негативного влияния получаемых наноматериалов на биологические объекты. Целенаправленные исследования, которые, к сожалению, еще не находят должного понимания и государственной поддержки, проводятся нами совместно с медиками-токсикологами с целью создания не только высокопроизводительных, но и экологически безопасных и биосовместимых нанотехнологий.

1. Цветков Ю. В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. — М.: Наука, 1980. — 359 с.

Generalized are the results of many years of research aimed at development of physico-chemical fundamentals and optimum design-technological realization of the processes of plasma nanopowder metallurgy, ensuring the production of a wide range of powders of the nanosized elements and compounds to produce on their basis nanostructured functional and structural materials with special properties. The main directions are determined in the path of application of the produced nanopowders and commercialization of the developed processes of plasma nanopowder metallurgy.

Поступила в редакцию 05.02.2008

УДК 669.530.17

ДВА ПРИМЕРА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ: ПРОЦЕССЫ ПЕРЕПЛАВА И АЗОТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

А. ЖАРДИ, Д. АБЛИЗЕР (Лаб. материаловедения и металлургии, Гор. шк., г. Нанси, Франция)

Разработаны и использованы для оптимизации обработки данных числовые модели процессов переплава. В сотрудничестве с Институтом электросварки им. Е. О. Патона проведены теоретическое (моделирование) и экспериментальное исследования процесса азотирования сплава.

Ключевые слова: вакуумно-дуговой переплав, расходный электрод, никелевый сплав, мелкозернистая структура слитка, азотирование, деазотирование, метод взвешенной капли, цифровое моделирование, теплоперенос и транспортировка вещества

Процессы переплава расходного электрода. Эти процессы были разработаны для получения высококачественных сплавов, поскольку процессы первичной металлургии не позволяют достичь таких параметров, как формирование мелкозернистой структуры литого металла без кристал-

2. Цветков Ю. В. Особенности термодинамики и кинетики плазменно-металлургических процессов // Физ. и химия плазменных металлургических процессов. — М.: Наука, 1985. — С. 5–18.
3. Цветков Ю. В., Николаев А. В., Панфилов С. А. Плазменная металлургия. — Новосибирск: Наука, 1992. — 265 с.
4. Tsvetkov Yu. V. Plasma processes in metallurgy/Thermal plasma and new materials technology. Cambridge: Interscience publ. — 1995. — Vol. 2, P. 291–322.
5. Цветков Ю. В. Физикохимия плазменной металлургии — металлургии будущего. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов. — М.: Академкнига, 2002. — С. 296–308.
6. Цветков Ю. В. Плазменная металлургия — перспективная технология XXI века // Металлы. — 2001. — № 5. — С. 24–31.
7. Tsvetkov Yu. V. Plasma metallurgy. Current state, problems and prospects // Pure and Applied Chemistry. — 1999. — 71, № 10. — P. 1853–1862.
8. Самохин А. В., Алексеев Н. В., Цветков Ю. В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов // Химия высоких энергий. — 2006. — 40, № 2. — С. 1–6.
9. Цветков Ю. В. Плазма в металлургии // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. XI-5. — М.: Янус-К, 2006. — С. 189–222.

лизационных дефектов; обеспечить низкие уровни микро- и макросегрегаций, и, как следствие, высокое качество слитков.

Суть процесса вакуумно-дугового переплава (ВДП) (рис. 1, а) состоит в переплаве расходного металлического электрода требуемой марки в высоком вакууме с целью получения качественного слитка с хорошей структурой. Во время переплава электрическая дуга поддерживается между концом электрода и металлической ванны. Жидкий металл проходит через плазму дуги и

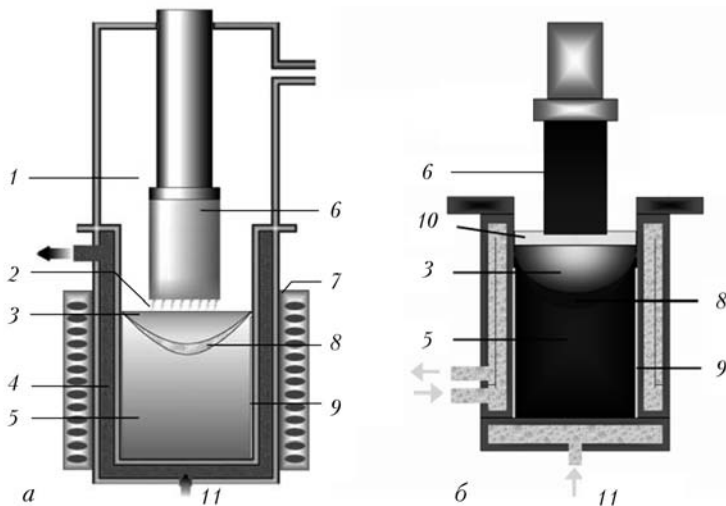


Рис. 1. Схематическое изображение процессов ВДП (а) и ЭШП (б): 1 — вакуумная камера; 2 — электрическая дуга; 3 — жидкая ванна; 4 — охлаждающий контур; 5 — твердый слиток; 6 — электрод; 7 — электрические катушки; 8 — полужидкая зона; 9 — зазор; 10 — шлак; 11 — вода

наполняет ванну, из которой формируется слиток в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе. При электрошлаковом переплаве (ЭШП) источником тепла для расплавления металла является шлак на основе фтористого кальция, который располагается между расходуемым электродом и металлической ванной формируемого слитка и через который проходит электрический ток. В первом и втором случае металл от расходуемого электрода к формируемому слитку переносится в виде капель, контактирующих с вакуумом или шлаком, которые улучшают качество металла слитков [1].

Переплавляемыми материалами чаще всего являются специальные стали и сверхпрочные сплавы на основе никеля. Способ ВДП представляет собой также конечный этап в цикле плавки высокорекреакционных металлов (циркония и титана). Математическое моделирование позволяет связать такие рабочие параметры, как скорость плавки, диаметр слитка, условия охлаждения с условиями получения качественного слитка.

Настоящая работа является частью программы, начатой 15 лет тому назад в Лаборатории материаловедения и металлургии (Горная школа, Франция) по разработке программного обеспечения и оптимизации процесса ВДП. Первая версия числовой модели SOLAR SOLidification during arc remelting, что обозначает затвердевание во время дугового переплава, применялась для моделирования процесса ВДП высокорекреакционных металлов [2, 3]. Эта модель постоянно совершенствовалась. Сначала она использовалась для сверхпрочных сплавов на никелевой основе и специальных сталей [4, 5], а позднее была разработана для ЭШП [6, 7]. Работы в этом направлении начали с создания основной гидродинамической модели шлака, сложность которой увеличивали по-

этапно (2004 г.). Последняя модель имеет несколько общих баз с кодом SOLAR, поскольку рост слитка и его затвердевания в процессах ЭШП и ВДП происходят довольно похоже.

Краткое описание математических моделей. Обе модели — SOLAR и SOLECS (обозначает полное моделирование ЭШП по типу SOLAR—SOLAR-type esr complete simulation) основаны на решении девяти частных дифференциальных уравнений, которые представляют реальные физические явления вместе с требуемыми граничными условиями. Эти модели могут описать электромагнетизм, жидкое течение, тепло- и массоперенос во время роста и затвердевания слитка и соответственно взаимно связать параметры плавки с конфигурацией расплавленной ванны,

гидродинамическим поведением жидкого металла, условиями местного затвердевания и макросегрегацией. В любой момент процесса плавки рассчитываются плотность тока в слитке, поля электромагнитной силы и скорость в шлаковой фазе, жидкая металлическая ванна и твердожидкая зона, интенсивность турбулентности потока (если имеется), температура и карты жидких фракций во всем слитке, а также карта состава для любого данного растворенного вещества. Классическая модель RANS (усредненная Рейнольдса—Навье—Стокса) k - ϵ включена в коды для учета турбулентности. Специальная разработка была выполнена для процесса ВДП сталей и сверхпрочных сплавов — расчет дополнительного охлаждения слитка путем введения гелия в зазор кристаллизатора.

В связи с ограниченным объемом настоящей статьи невозможно подробно представить уравнения состояния. Основные моделируемые физические явления приведены ниже.

Теплоперенос: теплоперенос в пределах слитка и шлака путем конвекции и проводимости; тепло, передаваемое электрической дугой (ВДП) или джоулевым теплом в шлаке (ЭШП); воздействие скрытой теплоты на шлак и затвердевание металла; потеря тепла при контакте с кристаллизатором (слиток и шлак); потеря тепла в зазоре при боковой усадке: охлаждение радиационное и конвективное (ЭШП) или гелием (ВДП).

Перенос растворенного вещества: перенос элементов растворенного вещества в пределах жидкой ванны и полужидкой зоны; подвод материала к верхней части слитка; испарение с поверхности слитка ВДП; перераспределение растворенного вещества на поверхности раздела твердое вещество—жидкость.

Перенос количества движений: естественная конвекция, вызванная градиентами температуры и концентрации; принудительная, вызванная взаимодействием тока плавки и самонаводящимся магнитным полем, а также электромагнитным перемешиванием во время ВДП высокорезакционных металлов; условия ламинарных и турбулентных потоков; взаимодействие твердых и жидких веществ в пределах полужидкой зоны.

Что касается взаимодействия жидкого и твердого металла в твердожидкой зоне слитка, то в моделях используется теория смеси сплошных сред, впервые предложенная Бенноном и Инкропером в работе [8], где твердожидкое состояние рассматривается как пористое твердое вещество, характеризующееся его проницаемостью.

Электромагнитные составляющие (плотность тока, силы Лоренца и джоулева теплота) рассчитываются при каждом значительном изменении электрического тока, а уравнения потока жидкости и теплопереноса решаются в каждом промежутке времени совместно. Они дискретизируются методом конечных объемов [9] при полностью неявной временной схеме. Сочетание давление-скорость обрабатывается с помощью алгоритма SIMPLEC (полювный метод для разрешимых уравнений, связанных с давлением), предложенного Ван Дурмалом и Рейтби [10]. Как показано в работе [4], вследствие изменения сетки относительно роста слитка в уравнениях появляются дополнительные члены.

Достоверность моделей. Результаты цифрового моделирования неоднократно проверяли путем их сравнения с экспериментальными данными, полученными на основе исследования различных слитков, переплавленных в опытных установках или промышленных печах.

В качестве примера моделировали промышленную плавку слитка сплава Ti-6-4, полученного способом ВДП (таблица) на основе результатов плавки, параметров печи и содержания кислорода, известного из предыдущей плавки, а его про-

гнозируемое содержание сравнивали с действительными в конечном выплавленном слитке. Последние результаты были получены на кованом изделии в местах, расположенных на кромке, среднем радиусе, в центре и в семи вертикальных положениях относительно начального слитка. Результаты представлены в процентном соотношении между измеренными и прогнозируемыми значениями.

O ₂ (от вершины слитка), %	Погрешность, %		
	на кромках	в среднем радиусе	в центре
3,4	+1,6	+0,9	+12,1
7,6	-1,5	+0,1	+2,7
9,1	-1,5	+2,9	+1,5
25,2	-6,8	+7,5	-4,2
51,3	-4,2	+4,1	-3,0
75,5	-3,6	+0,9	-4,3
95,6	-4,5	+0,4	+0,4

гнозируемое содержание сравнивали с действительными в конечном выплавленном слитке. Последние результаты были получены на кованом изделии в местах, расположенных на кромке, среднем радиусе, в центре и в семи вертикальных положениях относительно начального слитка. Результаты представлены в процентном соотношении между измеренными и прогнозируемыми значениями.

Прогноз был довольно точным. В верхней точке, расположенной в центре слитка, было самое большое отличие от действительных результатов. По нашему мнению, модель может использоваться для прогнозирования сегрегации кислорода при оптимизации профилей ванны.

В случае сталей и сверхпрочных сплавов несколько промышленных плавок ВДП были отбракованы вследствие отключения энергии для фиксации геометрии жидкой ванны. На макроснимке видна очень мелкозернистая структура, что связано с изменением условий местного затвердевания. Были выполнены два перепада слитков диаметром 500 мм из мартенситностареющей стали: один — при низкой скорости плавления, а второй — при более высокой. Экспериментальные профили ванны в конце перепада сравнивались

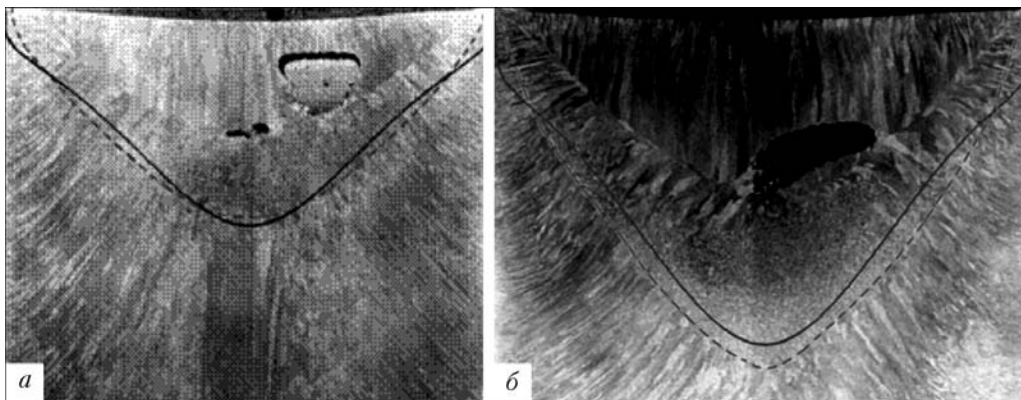


Рис. 2. Макроструктура металла слитка из мартенситностареющей стали диаметром 500 мм, полученные методом ВДП (действительные и расчетные профили ванны): а, б — соответственно низкая и высокая скорость плавления; штриховая линия — экспериментальные данные; сплошная — моделирование с помощью SOLAR

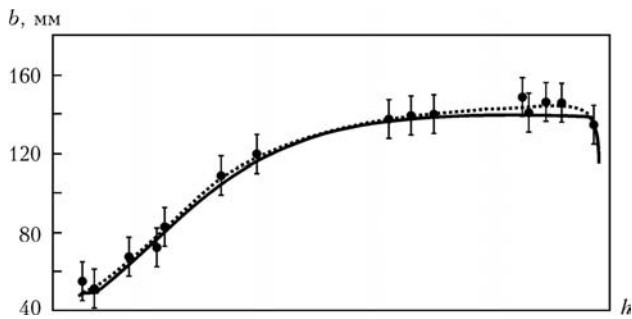


Рис. 3. Изменение жидкой ванны в процессе ЭШП; маркеры — экспериментальные данные; сплошная линия — моделирование с помощью SOLAR; h — глубина жидкой ванны; b — высота слитка

с расчетными (рис. 2). Сравнения расчетных профилей ванны с их микроснимками показало, что моделирование дало удовлетворительные результаты для широкого диапазона режимов переплава.

Изменение жидкой ванны во время плавки изучали на макротемплетах промышленного слитка In 718. Во время плавки в некоторых случаях для маркировки ванны используется электромагнитное перемешивание. На рис. 3 видно изменение глубины экспериментальной ванны (увеличение глубины почти до начала горячей подпитки приводит к снижению мощности дуги; видимый

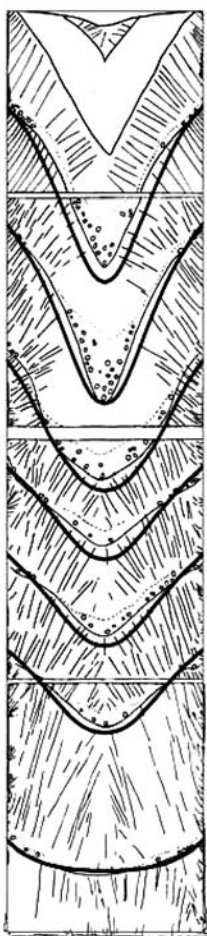


Рис. 4. Полномасштабный слиток ЭШП из сплава Nimonic 80

эффект горячей подпитки — к уменьшению глубины ванны). Из рисунка видно, что результаты прогнозируемого и наблюдаемого изменения глубины ванны хорошо согласуются. Это свидетельствует о том, что модель SOLAR эффективна для прогнозирования всех этапов плавки — старта, устойчивого состояния и горячей подпитки.

Для проверки кода SOLECS несколько электродов переплавляли в печи ЭШП. Для экспериментов получен расплав электрода Nimonic 80 с использованием классического шлака на основе CaF_2 с добавкой таких компонентов, как известь и глинозем. Поскольку этот расплав предназначен специально для проверки модели, то и рабочие режимы были нестандартными. Процесс плавки состоял из двух стадий: первая — при низких значениях скорости плавления и тока; вторая — при их высоких значениях скорости плавления и тока. Во время переплава последовательно семь раз добавлялись никелевые шарики (4 кг). Затем слиток был разрезан и подвергнут травлению. На рис. 4 представлены макроструктура и расположение никелевых шариков, которыми отмечены разные профили ванны. На рисунке сравниваются экспериментальные и расчетные профили ванны. Как видно, результаты SOLECS хорошо согласуются с полученными при исследовании.

Азотирование сплавов на основе никеля. Первые эксперименты. Знание механизмов массопереноса и реакции между жидким металлом и газовой фазой является важным фактором для оптимизации некоторых металлургических процессов, включая операции дегазации стали, алюминия и сверхпрочных сплавов на основе никеля. Изучение взаимодействия азота с жидкими хромоникелевыми сплавами стало темой для совместных исследований, проводимых Лабораторией материаловедения и металлургии и ИЭС им. Е. О. Патона еще 12 лет тому назад [11].

Для исследования реакции между газом и жидким металлом использовали метод взвешенной капли [12]. В соответствии с ним осуществляют расплавление и удержание металлического образца во взвешенном состоянии в катушке, которая питается высокочастотным переменным током. Применение электромагнитного взвешенного состояния для изучения реакций, происходящих между газом и жидким металлом, имеет ряд преимуществ: обеспечивается безопасность окружающей среды; не требуется использование тигеля или подложки; большая контактная поверхность и эффективное перемешивание расплавленного металла позволяют системе газ-жидкость быстро достигать равновесия.

Метод взвешенной капли используется в ИЭС им. Е. О. Патона для исследования азотирования и деазотирования различных жидких металличе-

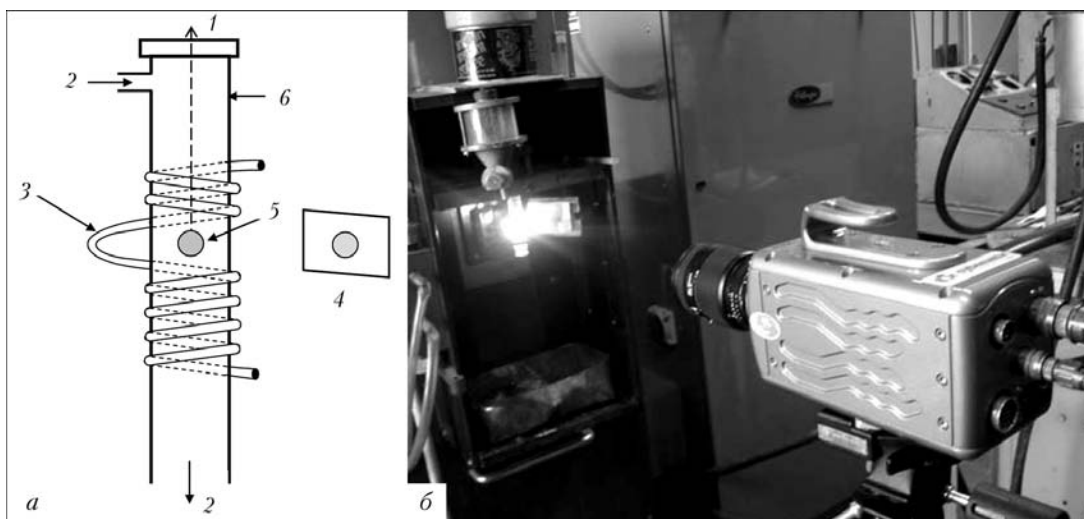


Рис. 5. Метод взвешенной капли: *а* — схема эксперимента; *б* — экспериментальное устройство для наблюдения за поведением капли; 1 — направление к пирометру; 2 — газ; 3 — обратный виток индукционной катушки; 4 — зеркало, расположенное под углом 45°; 5 — жидкая капля; 6 — кварцевая трубка

ких сплавов, включая высокореакционные сплавы титана, циркония и хрома, а также хромоникелевые. Эксперимент левитации основан на воздействии потока азота на расплавленный образец во взвешенном состоянии, который находится при постоянной температуре в течение контролируемого периода времени. Содержание газа в металле определяется путем химического анализа после затвердевания образца. Такие эксперименты дают возможность оценить растворимость газа в металле при данной температуре и помогают определить кинетические параметры переноса азота на границе газ-жидкий металл.

Однако полученных экспериментальных данных недостаточно для точного установления граничной стадии переноса азота. В связи с этим параллельно в Лаборатории материаловедения и металлургии проводилось моделирование эксперимента взвешенной капли. Основная цель разработки такой модели — прогнозировать изменение во времени содержания азота в металлическом образце в процессе эксперимента азотирования и деазотирования, что требует моделирования потока жидкого металла, индуцированного силами электромагнитного перемешивания в капле. Такой подход уже позволил достоверно описать растворение и удаление азота во время эксперимента Сивертса [13].

На первом этапе, целью которого является определение межграничной области, с помощью высокоскоростной съемки определили форму свободной поверхности капли. Схема используемого при эксперименте оборудования представлена на рис. 5, *а*. Эксперименты проводили в кварцевой стеклянной трубке диаметром 17,4 мм. Вокруг трубки была установлена шестивитковая индукционная катушка с двумя противоположными витками в верхней части. Движение и форму образца

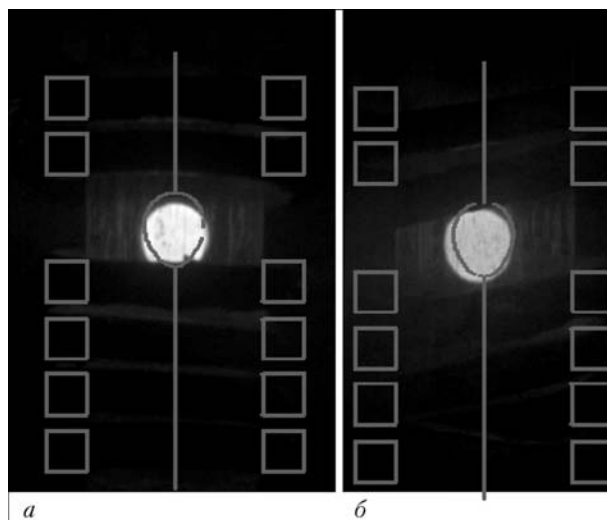


Рис. 6. Сравнение расчетных и наблюдаемых форм жидкой капли хромоникелевого сплава во время эксперимента в ИЭС им. Е. О. Патона: *а*, *б* — вид соответственно спереди, сбоку

во взвешенном состоянии записывали с помощью высокоскоростной видеокамеры (1000 кадр/с, 768×768 пикселей), установленной перед оборудованием для левитации (рис. 5, *б*). Для определения геометрии и динамики образца во взвешенном состоянии разработана собственная компьютерная программа с последующей обработкой видеоизображений. С ее помощью на каждом цифровом изображении можно определить края капли и рассчитать площадь и координаты центра гравитации поверхности, связанной с обнаруженными краями (т. е. очевидное поперечное сечение капли в наблюдаемой плоскости). Для идентификации типичных частот динамики системы выполнен спектральный анализ изменения во времени основных параметров.

Моделирование. Моделирование поведения капль во взвешенном состоянии под действием

электромагнитных сил является предметом многочисленных исследований, основанных на использовании различных аналитических и цифровых методик. Перспективной задачей является всестороннее описание системы связи между электромагнитным полем, формой жидкого металла и потоком жидкости в капле. Наиболее известной и полной является модель, представленная в последние годы Бояревичем и Периклоусом [14], которая позволяет рассчитывать с помощью спектрального метода тепловые поля и потоки в пределах осесимметричной взвешенной капли одновременно со свободными колебаниями поверхности.

В модели учитывались три основных аспекта: расчет распределения электромагнитного поля, генерируемого катушкой внутри и с внешней стороны капли, и распределение сил Лоренца, воздействующих на жидкий металл;

определение турбулентного потока жидкого металла, образуемого в капле силами Лоренца; анализ деформации формы свободной поверхности капли.

В частности, модель учитывает влияние электромагнитного поля и внутренней динамики потока в капле на форму свободной поверхности. На первой стадии разработки модели явления тепло- и массопереноса в расчет не берутся, а капля предполагается изотермической. Модель построена по программе FLUENT (версия 6.2.), которая является пакетом CFD конечных объемов для моделирования многофазного течения жидкости.

Наша модель может применяться для прогнозирования эксперимента левитации, проведенного в ИЭС им. Е. О. Патона. При эксперименте капля сплава Ni–20 % Cr радиусом 3,1 мм располагалась в левитационной катушке при обычных условиях гравитации. На рис. 6 форма взвешенной капли, прогнозируемая моделью, сравнивается с формой капли, видеоизображение которой получено во время эксперимента. Рассчитанная равновесная форма была получена путем усреднения разных форм капель в течение первых 3 с моделирования. Видеоизображения являются

результатом усреднения 400 кадров. Имело место хорошее согласование между расчетной формой капли и ее формой, наблюдаемой при эксперименте. Равновесная высота капли также хорошо прогнозируется с помощью модели.

Данная модель будет усовершенствована с целью включения явлений теплопереноса и транспортировки растворенного вещества в пределах жидкой капли, при этом она подходит для моделирования полного эксперимента взвешенной капли при исследовании взаимодействия газ–жидкий металл. И, наконец, разработанную модель планируется использовать в дополнение к экспериментально полученным данным для установления граничной стадии массопереноса между газом и жидким металлом, а также кинетики их взаимодействия.

1. Duckworth W. E., Hoyle G. *Electro-Slag Refining*. — London: Chapman and Hall, 1969.
2. Hans S. *Modelisation des transferts couples de chaleur, de solute et de quantite de mouvement lors de la refusion a l'air sous vide (VAR). Application aux alliages de titane*. — Nancy, INPL, 1995.
3. Jardy A., Hans S., Ablitzer D. *Proc. 7th Intern. conf. on «Modeling of casting, welding and advanced solidification processes»*. — London: TMS-AIME, 1995, — P. 205–212.
4. Quatravaux T. // *J. of Mater. Sci.* — 2004. — **39**, № 24. — P. 7183–7191.
5. Jardy A., Hans S. *Proc. 11th Intern. conf. on «Modeling of casting, welding and advanced solidification processes»*. — Opio: TMS, — P. 953–960.
6. Weber V. *Proc. Intern. symp. on «Liquid metal processing and casting LMPC2007»*. — Nancy, 2007. — P. 83–88.
7. Weber V. *Simulation numerique du procede de refusion sous laitier electroconducteur*. — Nancy, INPL, 2008.
8. Bennon W. D., Incropera F. P. // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. — 1987. — **30**, № 10. — P. 2161–2170.
9. Patankar S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. — N. Y.: Graw-Hill Company, 1980.
10. Van Doormaal J. P., Raithby G. D. // *Numerical Heat Transfer*. — 1984. — **7**, № 2. — P. 147–163.
11. Petitnicolas L. // *Advances in special electrometallurgy*. — 1998. — **14**, № 4. — P. 235–241.
12. Bakhtiyarov S. I., Overfelt R. A. // *Recent Res. Dev. Mater. Sci.* — 2003. — **4**, № 81.
13. Petitnicolas L., Jardy A., Ablitzer D. // *Rev. Metall.* — 1998. — **95**. — P. 177–188.
14. Bojarrevics V., Periccleous K. // *ISIJ Intern.* — 2003. — **43**, № 890.

A continuous research in the field of special electrometallurgy was carried out in France during the last 20 years, and numerical models of remelting processes (ESR or VAR) have been developed. In close collaboration with the E.O. Paton Electric Welding Institute a theoretical (i.e. modelling) and experimental study of the nitriding process of a Ni-20 % Cr alloy was performed.

Поступила в редакцию 11. 03. 2008