



УДК 669.187.526.001.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЛИТКОВ ЭЛПЕ

Г. В. Жук

Описаны основные этапы моделирования теплофизических процессов формирования слитков ЭЛПЕ. Определены перспективные направления совершенствования моделей. Исследован процесс остывания крупногабаритных титановых слитков в условиях вакуума. Установлена зависимость времени остывания от размера слитков.

The main stages of modeling the thermo-physical processes of formation of EBCH ingots are described. Challenging trends in updating the models are defined. The process of cooling large-sized titanium ingots under vacuum conditions was investigated. The dependence of time of cooling on size of ingots has been established.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; электронно-лучевая плавка; слиток; титановый сплав; кристаллизация; остывание

Метод математического моделирования уже давно и прочно занял свое место в исследовании процессов, происходящих при получении слитков способами специальной электрометаллургии. Он позволяет изучить такие аспекты переплава, как плавка исходной шихты, перемешивание и рафинирование компонентов сплава, формирование слитка в кристаллизаторе. При этом численно решаются задачи теплофизики, кинетики, гидродинамики и пр. Преимущество численных методов состоит в том, что они позволяют учитывать не только средние показатели физических величин, но и задавать их распределение в пространстве и времени, максимально приближенное к реальным процессам. Целью моделирования является отказ от дорогостоящего натурального эксперимента и вычисление распределения требуемого параметра в любой момент времени с заданной точностью. На практике, как правило, добиваются сокращения количества экспериментов за счет вычисления характера распределения и тенденции изменения требуемого параметра.

В полной мере оправдывает себя применение метода численного моделирования для электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Во-первых, способ ЭЛПЕ в последнее время нашел широкое применение в промышленности, он интенсивно развивается, совершенствуются технологии. Во-вторых, процесс достаточно дорогостоящий с точки зрения расхода электроэнергии (создание вакуума, перегрев поверхностного слоя металла) и стоимости переплавляемых материалов (высокореакционные титан, цирконий и тугоплавкие нибий, тантал, молибден, металлы и сплавы на их основе).

Поэтому сокращение количества экспериментальных плавков экономически целесообразно.

В последние 10–15 лет созданы несколько математических моделей, описывающих различные стадии ЭЛПЕ: плавление исходной шихты, перемешивание и испарение металла и примесей в промежуточной емкости, формирование слитка в кристаллизаторе (в т.ч. выведение усадочной раковины), остывание слитка.

Плавление шихты с последующей обработкой расплава в промежуточной емкости наиболее полно представлено в моделях, описывающих перенос массы с учетом гидродинамических, физико-химических и кинетических факторов [1, 2]. С учетом испарения легирующих элементов и рафинирования металла от примесей модели позволяют с достаточной точностью прогнозировать химический состав металла, попадающего в кристаллизатор, в зависимости от состава шихтовой заготовки. Модель, описанная в работе [3], дает распределение элементов в слитке в зависимости от состава, поступающего из промежуточной емкости. К недостаткам моделей можно отнести оперирование с усредненными величинами без учета их пространственного распределения, например химических элементов в сечении шихтовой заготовки.

Поскольку изменение химического состава исходного металла происходит в основном в промежуточной емкости, наибольший интерес представляют процессы затвердевания слитка в кристаллизаторе, в первую очередь решение задачи переноса тепла с последующим вычислением параметров кристаллизации. Задачей настоящей статьи является анализ состояния моделирования теплофизических процессов в кристаллизаторе.

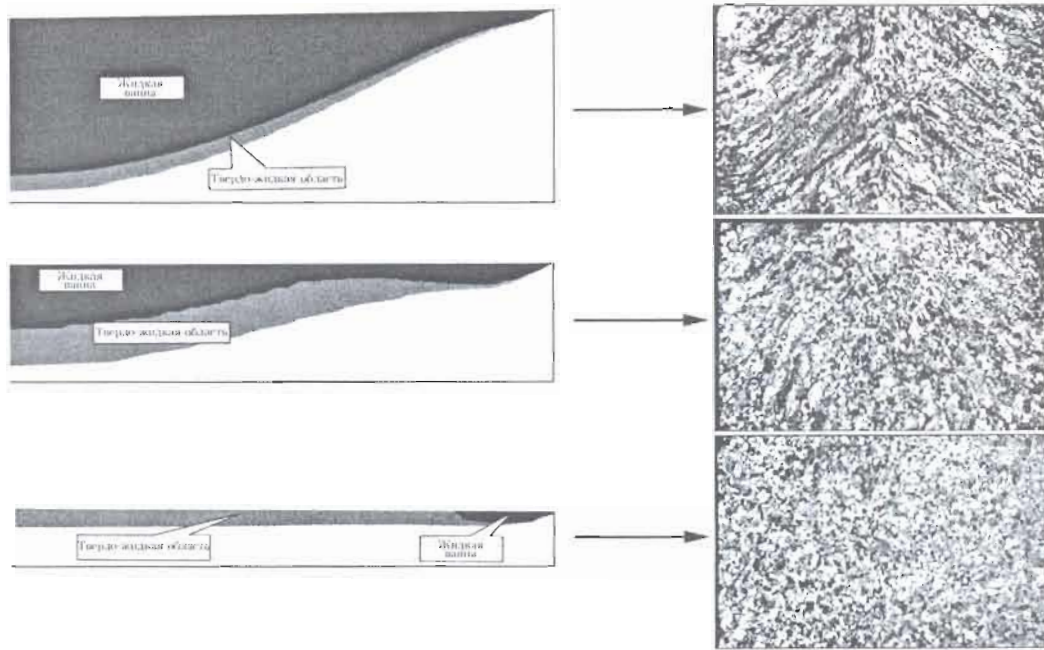


Рис. 1. Зависимость структуры слитка Тl-6Al-4V диаметром 200 мм от глубины жидкой ванны при плавке

**Общие принципы математических моделей.** Основные принципы моделирования теплофизических процессов в слитках, получаемых способами специальной электрометаллургии, сформулированы в работах [4, 5] для электрошлакового (ЭШП) и электронно-лучевого переплава (ЭЛП). Уравнение энергии с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры и выделения скрытого тепла кристаллизации в интервале температур описывается уравнением теплопроводности Фурье.

В случае ЭЛП энергия в кристаллизатор поступает в виде распределенного источника нагрева на формируемой поверхности слитка и перегретого жидкого металла (верхний торец слитка), расходуется на нагрев водоохлаждаемых частей кристаллизатора, находящихся в плотном контакте со слитком (в головной части боковой поверхности и донной части слитка), и водоохлаждаемых стенок камеры за счет излучения (с остальной части боковой поверхности слитка), обменивающимися с внешними холодильниками по законам кондуктивного теплообмена Ньютона-Рихмана и лучистого теплообмена Стефана-Больцмана, зависит от некоторой поверхностной температуры контакта, определяемой эмпирически.

**Формирование слитка ЭЛПЕ.** Созданы математические модели, позволяющие с достаточной точностью рассчитать температурные поля в формируемом слитке в заданный момент времени. Разработана модель, позволяющая вычислить распределение температур в цилиндрическом слитке в любой момент, а следовательно, форму и глубину металлической ванны [6]. Установлено, что глубина и объем ванны увеличиваются в начале плавления до достижения постоянного уровня, свидетельству-

ющего об устоявлении квазистационарного режима в верхней части слитка, на который больше не влияет изменение термического режима. В работе [7] довольно успешно совмещена теплофизическая задача с гидродинамической, что позволило значительно повысить точность расчетов. Вместе с тем, сделаны весьма грубые допущения об осесимметричности задачи, несмотря на то, что металл в кристаллизатор заливают на периферии несимметрично.

В работе [8] поставлена задача определения качественных закономерностей в процессах затвердевания слитков ЭЛПЕ. Для упрощения расчетов использованы допущения об описании теплоемкости

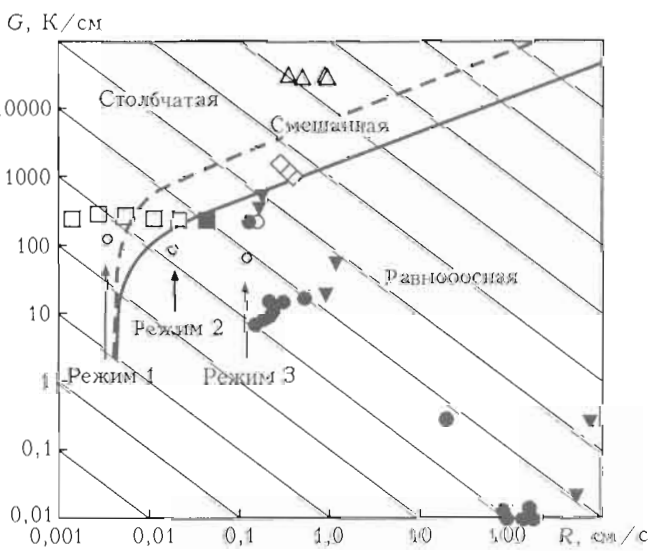


Рис. 2. Карта кристаллизации (скорость кристаллизации  $R$  температурный градиент  $G$ ) для слитков пикового сплава Тl-6Al-4V (стрелками отмечены данные работы [9] по слиткам ЭЛПЕ): ■ — зонная плавка; ● — литье в цилиндрический кристаллизатор; ▼ — зонная плавка; ◆ — оплавление  $CO_2$ -лазером; ▲ — оплавление твердотельным лазером; ■ — равноосная; □ — смешанная; ◻ — столбчатая



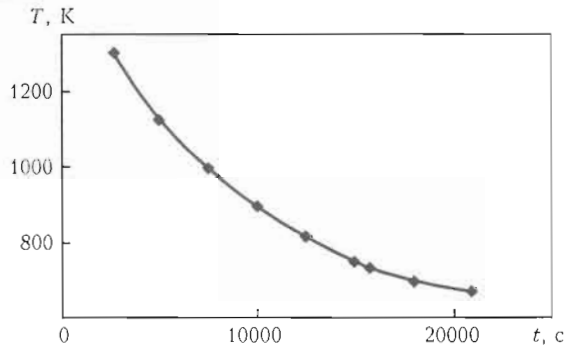


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры  $T$  на поверхности слитка от времени остывания  $t$

металла в жидкой фазе путем умножения известной теплоемкости в твердой фазе на некоторый эмпирический коэффициент, тем самым исключив из описания поведения жидкой фазы гидродинамические аспекты. При этом удалось смоделировать режимы плавки, при которых достигаются различные состояния головной части формируемого слитка (с глубокой ванной, с мелкой ванной и без ванны жидкого металла) подтвержденные экспериментально (рис. 1).

Важным шагом вперед стало моделирование основных теплофизических параметров кристаллизации слитка: скоростей охлаждения и кристаллизации расплава, градиента температур в слитке [9]. Справедливость расчетов подтвердило совпадение теплофизических характеристик описанных выше режимов с экспериментальными данными многочисленных экспериментов других исследователей [10] (рис. 2).

**Выведение усадочного (теплового) центра.** Причиной возникновения усадочной раковины в кристаллизующемся слитке является наличие на заключительной стадии процесса выплавки слитка развитой ванны жидкого металла. Избежать возникновения указанных дефектов в головной части позволило создание на заключительном этапе плавки такого режима обогрева поверхности слитка в кристаллизаторе, при котором глубина жидкой ванны плавно уменьшалась до нулевого значения без образования твердой корки на торце слитка [11]. При этом тепловой центр перемещается из глубины на поверхность слитка, и замкнутых жидких полостей в головной части слитка не возникает. Были рекомендованы оптимальные технологические параметры вывода усадки.

**Охлаждение слитка.** Проблема моделирования охлаждения слитка ЭЛПЕ появилась после того, как в электронно-лучевых печах начали изготавливать цилиндрические слитки массой в несколько тонн. При этом вступил в силу масштабный фактор. Поскольку масса слитка пропорциональна третьей степени его радиуса, тогда как площадь поверхности — второй степени радиуса, т. е. с увеличением диаметра слитка время его остывания в условиях вакуума растет и при значительной массе может достигать больших значений, неприемлемых с точки зрения кон-

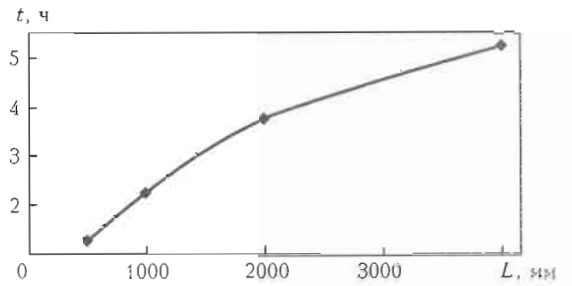


Рис. 4. Зависимость продолжительности остывания от длины  $L$  слитка

курентоспособности технологии. Технологически представляет интерес вычисление времени остывания слитка до значений температуры 400... 450 °С (673... 723 К), при которых, как показывает практика, окисление поверхности слитка минимально и не требует удаления поверхностного слоя.

Для расчета времени остывания слитка использовали математическую модель [12], усовершенствованную таким образом, что после выведения усадочной раковины электронно-лучевой нагрев слитка «выключали» и остывание происходило за счет излучения. Расчеты проводили для слитка титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 600 мм, при этом длину слитка варьировали от 0,5 до 4,0 м. Рассчитывали температурные поля слитка с интервалом в 1 с до достижения поверхностью слитка указанной критической температуры. Изменение во времени максимальной температуры поверхности этого слитка в процессе остывания представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, с понижением температуры слитка отвод тепла за счет излучения становится менее эффективным, и температура слитка выравнивается по его объему.

На основании данных рассчитанных полей температур построена зависимость продолжительности остывания от длины слитка (рис. 4).

График зависимости представляет собой кривую с тенденцией к снижению роста, но уже на длине слитка 4 м время его остывания превышает 5 ч (время выплавки слитка при производительности 500 кг/ч составляет не более 12 ч).

## Выводы

1. Показано, что математическое моделирование позволяет эффективно исследовать процессы получения слитков ЭЛПЕ (кристаллизация, выведение усадки, остывание).
2. Установлено, по мере увеличения массы выплавляемых слитков возрастает влияние на технологию ЭЛПЕ этапа остывания слитка.
3. Определено, что для слитков титановых сплавов массой 5 т остывание в условиях вакуума составляет более 5 ч, что сравнимо с временем их выплавки.

1. Математическое моделирование процесса электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и его применение для производства сплава / А.К. Ш. Бельмо, Е. Флоран, Е. Эсс, Д. Аблизер // Пробл. совм. электроннолучевой металлургии. — 1996. — №4. — С. 27-37.



2. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
3. *Лесной А. Б., Демченко В. Ф., Жадкевич М. Л.* Моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации слитков электронно-лучевого переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — №2. — С. 17-21.
4. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
5. *Электронно-лучевая плавка крупных слитков сложнотермически обработанных сплавов с мелкозернистой структурой* / Д. А. Козлитин, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, А. Я. Дереча // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1994. — №3-4. — С. 42-47.
6. *Термогидродинамическое состояние расплава при электронно-лучевом переплаве слитка титана* / Ж.-П. Белло, А. Жарди, С. Анс, Д. Аблизер // Там же. — 1997. — №3. — С. 3-18.
7. *Лесной А. Б., Демченко В. Ф.* Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2003. — №3. — С. 19-23.
8. *Жук Г. В., Тригуб М. П., Калишок А. Н.* Влияние скорости охлаждения на структуру цилиндрических слитков ЭЛПЕ титанового сплава Ti-6Al-4V // Процессы литья. — 2003. — №4. — С. 79-82.
9. *Жук Г. В., Березос В. А., Тригуб Н. П.* Прогнозирование структуры титановых слитков-слябов, получаемых способом ЭЛПЕ // Современ. электрометаллургия. — 2005. — №3. — С. 28-30.
10. *Zhuk H. V., Kobryn P. A., Semiatin S. L.* Influence of heating and solidification conditions on the structure and surface quality of electron beam melted Ti-6Al-4V Ingots // JMPT. — 2007. — №190. — P. 387-392.
11. *Калишок А. Н., Жук Г. В., Тригуб Н. П.* Моделирование режимов вывода усадочной раковины в цилиндрических слитках ЭЛПЕ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — №1. — С. 23-25.
12. *Жук Г. В., Ахонина Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Там же. — 1998. — №2. — С. 21-25.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 17.09.2008

УДК 669.187.526:51.001.57

## РАЗРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ПОВЫШЕННЫМИ ЖАРОПРОЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А. Ю. Северин, Г. В. Жук, Н. П. Тригуб,  
В. Н. Замков, П. Ф. Топольский, И. К. Петриченко

Разработан и получен сплав на основе титана с повышенными жаропрочными свойствами и ресурсом работы, по сравнению с существующими жаропрочными сплавами. Установлена возможность улучшения жаропрочных свойств сплавов титана, выбрана система легирования. Рассчитан состав шихты и создана технология электронно-лучевой плавки для данного сплава. Разработаны режимы его деформации и определены оптимальные режимы термической обработки. Исследована структура сплава после деформации и термической обработки.

Alloy on the titanium base with increased heat-resistant properties and service life, as compared with existing heat-resistant alloys, has been developed and produced. The feasibility was established for improving the heat-resistant properties of titanium alloys, system of alloying was selected. Charge composition was calculated and technology of electron beam melting for the given alloy was developed. Conditions of its deformation were developed and optimum conditions of thermal treatment were defined. Structure of alloy after deformation and heat treatment was investigated.

**Ключевые слова:** жаропрочные титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; деформация; термическая обработка; механические свойства; микроструктура

Для создания авиационных двигателей нового поколения с рабочими температурами на первой ступени двигателя более 600 °С необходимо решить проблемы разработки титановых сплавов с повышенной жаропрочностью. Жаропрочные титановые сплавы, выпускаемые серийно, имеют требуемый ресурс при значениях температуры до 500... 550 °С.

В последние годы в качестве перспективных жаропрочных материалов рассматриваются сплавы на основе алюминидов титана TiAl, Ti<sub>3</sub>Al. Однако они имеют очень низкую пластичность при температуре 20 °С, что резко понижает их технологичность и не позволяет использовать в узлах и деталях двигателей. Существуют также сплавы системы Ti-Al-Si с содержанием кремния до 4... 5 %, что существенно повышает жаропрочность и жаростойкость, но пластичность при комнатной температуре в литом состоянии остается весьма низкой, что также предопределяет их неудовлетворительную технологичность.

© А. Ю. СЕВЕРИН, Г. В. ЖУК, Н. П. ТРИГУБ, В. Н. ЗАМКОВ, П. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ, И. К. ПЕТРИЧЕНКО, 2008