



УДК 669.187.526:51.001.57

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ-СЛЯБОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ СПОСОБОМ ЭЛПЕ

Г. В. Жук, В. А. Березос, Н. П. Тригуб

Приведены данные математических расчетов параметров кристаллизации: градиентов температуры, скоростей охлаждения расплава для слитков-слябов титанового сплава Ti-6Al-4V ЭЛПЕ. На основе скоростей охлаждения получены карты кристаллизации слитков. Показано совпадение прогнозированной и реальной структур слитков-слябов.

Data of mathematical calculations of parameters of crystallization are given: gradients of temperature, rates of melt cooling for ingots-slabs of titanium alloy Ti-6Al-4V of EBCHM. Charts of ingots crystallization are obtained on the basis of cooling rates. The correlation of predicted structure with structure of real ingots-slabs is shown.

Ключевые слова: слиток-сляб; электронно-лучевая плавка; математическое моделирование; скорости охлаждения; сплавы титана; структура слитка

Одной из основных тенденций развития современной металлургии является получение структуры и свойств металла слитка, максимально благоприятствующих его дальнейшей деформации и механической обработке. Особые требования предъявляются к слиткам легированных сплавов (жаропрочных, жаро- и коррозионно-стойких и т. п.). Проблемы, возникающими при выплавке таких слитков, являются измельчение структуры, преодоление структурной и химической макро- и микронеоднородности.

Структурообразование слитка определяется в основном марочным составом сплава, теплофизическими условиями его кристаллизации, а также содержанием в нем примесей. Теплофизические условия формирования слитка в кристаллизаторе имеют решающее влияние на его структуру.

Большие возможности по регулированию нагрева поверхности слитка металла в кристаллизаторе обеспечивает электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) благодаря применению независимого источника нагрева — электронного луча. Наличие промежуточной емкости дает возможность подавать металл в кристаллизатор необходимыми порциями с заданной частотой. ЭЛПЕ позволяет обеспечить разделение процессов плавки и кристаллизации и, таким образом, в широких пределах изменять условия нагрева металла в кристаллизаторе при неизменной технологической производи-

тельности плавки. Вместе с тем процессы структурообразования слитка при ЭЛПЕ изучены недостаточно.

Традиционный подход к прогнозированию структуры слитков, получаемых в полунепрерывных процессах специальной электрометаллургии, заключается в определении градиентов температуры G (К/см) и скоростей кристаллизации $v_{кр}$ (см/с) металла на фронте кристаллизации (границе жидкой ванны) [1, 2]. С нашей точки зрения, данный подход не всегда оправдан, особенно в случае значительных (более 1 К/с) скоростей охлаждения расплава, поскольку градиент температуры является характеристикой условий нагрева и охлаждения жидкого металла. Например, заливка в кристаллизатор более перегретого металла увеличивает градиент температуры в ванне жидкого металла и должна привести к измельчению структуры слитка. На практике же происходит обратное [3].

Скорость кристаллизации является вторичной характеристикой, поскольку характеризует уже происходящий процесс кристаллизации, а не предполагаемый. Наиболее значимой, на наш взгляд, характеристикой кристаллизации слитка является скорость охлаждения расплава $v_{охл}$ (К/с) перед началом его затвердевания, которая является углом наклона кривой охлаждения. Она определяет степень достигаемого переохлаждения расплава и напрямую влияет на структуру слитка [4, 5]. Препятствием в использовании скорости охлаждения расплава для прогнозирования структуры слитка является сложность ее экспериментального определения.



Рис. 1. Слитки-слябы (150×500×2000 мм) титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученные способом ЭЛПЕ

Большие возможности для расчетного определения $v_{\text{охл}}$ заложены в методах математического моделирования теплофизических процессов, происходящих при формировании слитка. Решение уравнения теплопроводности методом конечных разностей позволяет определить температурное поле слитка в любой момент времени. Исходя из эволюционирующего температурного поля в каждой точке путем соотношения разности температур с отрезками времени и расстоянием могут быть определены такие теплофизические параметры процесса формирования слитка, как G и $v_{\text{охл}}$.

Авторы выполнили расчеты поля температур в слитках-слябах титанового сплава Ti-6Al-4V (рис. 1) с применением математической модели процессов переноса тепла в слитках ЭЛПЕ [6], адаптированной для трехмерного случая.

Моделировали процесс ЭЛПЕ сплава Ti-6Al-4V в медный водоохлаждаемый кристаллизатор (рис. 2) и формирование в нем слитка сечением 150 × 500 мм. При этом жидкий металл, перегретый над температурой ликвидус на 50 К, сливали из промежуточной емкости в кристаллизатор с периодичностью 100 с. Производительность плавки составляла 200 кг/ч. В процессе многочисленных экспериментов варьировали режимы электронно-лучевого нагрева слитка в кристаллизаторе (при режиме 1 слиток обогревался электронным лучом мощностью 60 кВт при однородном распределении плотности энергии по торцу слитка; при режиме 2 нагрев лучом мощностью 50 кВт сосредотачивался по периферии слитка на расстоянии 0...30 мм от края кристаллизатора, остальная часть торца слитка равномерно нагревалась лучом мощностью 10 кВт; при режиме 3 на периферии слитка мощность луча составляла 35, на остальной части — 10 кВт).

Необходимо отметить, что моделируемые режимы 2 и 3 соответствуют реальным режимам электронно-лучевого нагрева периферийной части поверхности слитка в кристаллизаторе концентрированным электронным лучом. При этом нагрев лучом мощностью 10 кВт моделирует так называемый хвост луча, т. е. рассеянные электроны, неизбежно



Рис. 2. Процесс выплавки слитка-сляба

присутствующие при электронно-лучевом нагреве. Расчеты проводили до достижения слитком высоты более 150 мм (т. е. ширины наименьшей грани слитка), при которой плавка переходит в установившийся квазистационарный режим.

Результаты расчета температурных полей слитка приведены на рис. 3. При плавке по режиму 1 в головной части слитка зафиксирована относительно

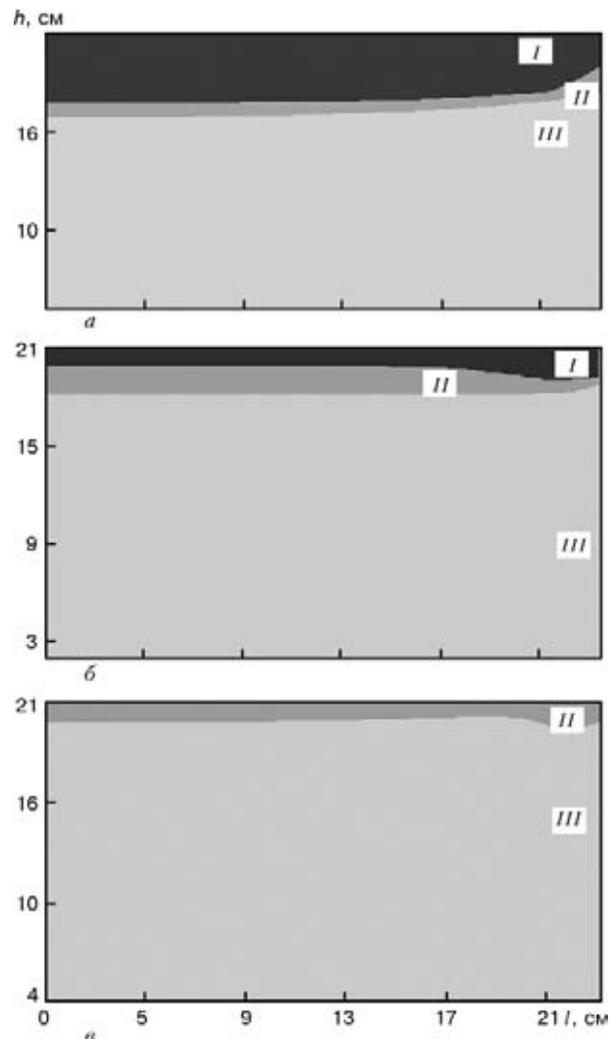


Рис. 3. Поля температур сляба (150×500 мм) сплава Ti-6Al-4V (продольное сечение): I — жидкая ванна (>1898 K); II — твердо-жидкая область (1868... 1898 K); III — затвердевающий металл (<1868 K); здесь и на рис. 4-7 a — режим 1; b — режим 2; v — режим 3; h — высота слитка; l — расстояние от оси

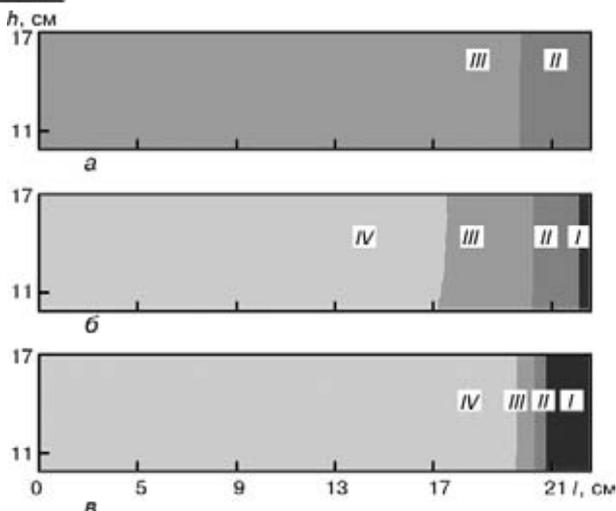


Рис. 4. Карта градиентов температур в слябе: I — >60; II — 50...60; III — 40...50; IV — 30...40 К/см

глубокая жидкая ванна (до 50 мм). Плавка по режиму 2 характеризуется относительно мелкой ванной жидкого металла (около 20 мм) с незначительным перегревом в периферийной части слитка, по режиму 3 — твердожидким состоянием металла по всей поверхности слитка в кристаллизаторе.

На основании данных эволюционирующего во времени температурного поля в слитке выполнены расчеты градиентов температур, скоростей охлаждения и кристаллизации расплава в каждой точке слитка в момент прохождения этой точки интервала солидус-ликвидус, т. е. в момент затвердевания металла (рис. 4, 5).

Анализ полученных данных позволяет установить зависимость значений обеих теплофизических характеристик от режимов 1–3 электронно-лучевого нагрева слитка-сляба. С понижением мощности электронно-лучевого нагрева и переводом его максимума в периферийную часть слитка указанные значения возрастают. Вместе с тем карта скоростей охлаждения наиболее точно отражает условия кристаллизации слитка. Так, для режима 2 на ней четко виден минимум скорости охлаждения в периферийной части слитка. При этом на карте градиента тем-

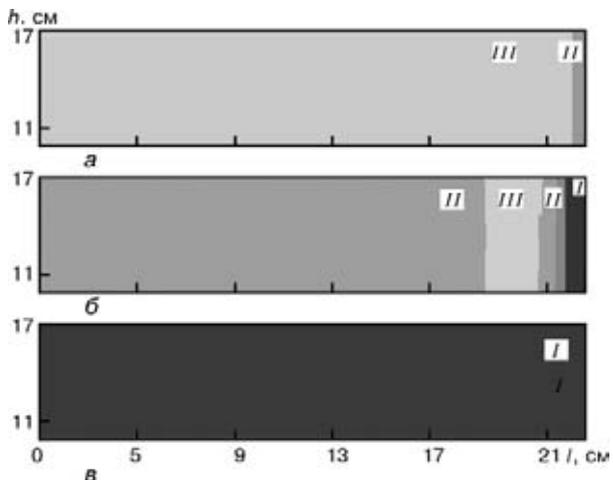


Рис. 5. Карта скоростей охлаждения в слябе: I — >3; II — 2...3; III — 1...2; IV — 0...1 К/с

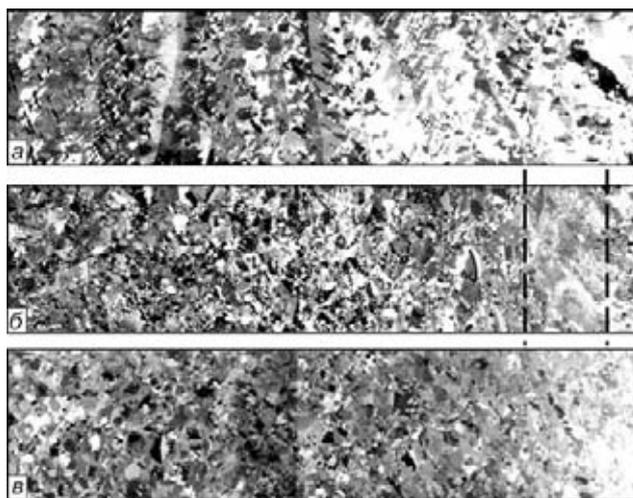


Рис. 6. Макроструктура слябов титанового сплава Ti-6Al-4V (полуширина, продольное сечение), выплавленных при различных режимах электронно-лучевого нагрева

ператур при движении от оси слитка к его периферии для квазистационарного процесса выплавки слитка экстремум значений не обнаружен.

Для проверки адекватности расчетных данных в ИЭС им. Е. О. Патона проведены экспериментальные плавки слябов сечением 150 × 500 мм и длиной до 200 мм из титанового сплава Ti-6Al-4V [7]. Исследование продольных темплетов слябов Ti-6Al-4V ЭЛПЕ, выплавленных по режимам 1–3 (рис. 6), подтвердило справедливость изложенного выше. Относительно низким (до 1 К/с) скоростям охлаждения (рис. 5, а) соответствует структура слитков, состоящая из столбчатых кристаллитов (рис. 6, а), а при скоростях охлаждения более 1 К/с (рис. 5, б) образуется равноосная структура металла сляба (рис. 6, б). Особенно показательным является эффект, достигнутый при режиме электронно-лучевого нагрева 2. Область минимальных скоростей охлаждения, представленная на карте (рис. 5, б), соответствует локальной области столбчатых кристаллитов в слитке-слябе (рис. 6, б). Таким образом, если принять скорость охлаждения 1 К/с как переход от столбчатой структуры к равноосной, то карты кристаллизации, построенные в данном предположении (рис. 7), полностью соответствуют реальной структуре слитков.

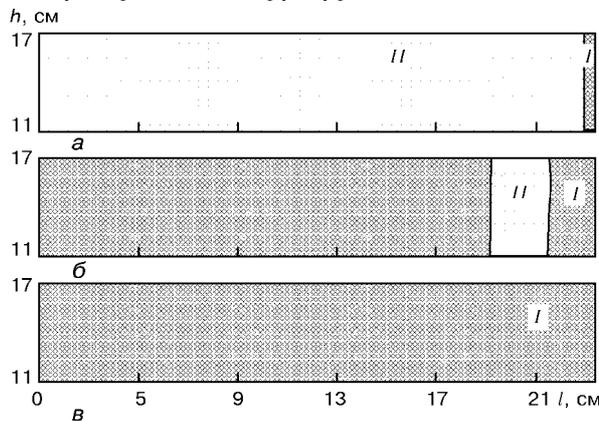


Рис. 7. Прогнозируемая структура слябов: I — равноосная; II — столбчатая



Выводы

1. Установлено, что скорость охлаждения, достигаемая путем металлического расплава перед началом кристаллизации, оказывает решающее влияние на структуру слитков ЭЛПЕ.

2. Показано, что с помощью карты скоростей охлаждения, построенной с использованием математической модели переноса тепла в слитке ЭЛПЕ, можно прогнозировать структуру слитков-слябов титановых сплавов.

1. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. — М.: Металлургия, 1976. — 552 с.
2. *Kobryn P. A., Semiatin S. L.* Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti-6Al-4V // J. of materials proc. technology. — 2003. — № 135. — P. 330-339.

3. *Чалмерс Б.* Теория затвердевания / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1968. — 288 с.
4. *Мирошниченко И. С.* Закалка из жидкого состояния. — М.: Металлургия, 1982. — 168 с.
5. *Жук Г. В., Тригуб Н. П., Калинюк А. Н.* Влияние скорости охлаждения на структуру цилиндрических слитков ЭЛПЕ титанового сплава Ti-6Al-4V // Процессы литья. — 2003. — № 4. — С. 79-82.
6. *Жук Г. В., Ахонина Л. В., Тригуб Н. П.* Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 2. — С. 21-25.
7. *Жук Г. В., Калинюк А. Н., Тригуб Н. П.* Производство титановых слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Соврем. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 22-24.

Ин-т электросварки НАН Украины, Киев

Поступила 07.06.2005

Слияние усиливает мировые рыночные позиции концерна «Siemens» в развивающихся отраслях экономики

Европейская комиссия одобрила предложение «Siemens» о приобретении австрийской компании «VA Technologie AG» («VA Tech»). О решении было объявлено 13 июля 2004 года в Брюсселе. После завершения сделки «Siemens» становится держателем 97,15 % акций компании «VA Tech».

«VA Technologie AG» — австрийская инжиниринговая компания — является одним из мировых лидеров в области инжиниринга и производства оборудования для металлургической, сталелитейной и алюминиевой промышленности. Помимо этого, компания занимает сильные позиции на рынке оборудования для передачи и распределения энергии (распределительная и коммутационная техника, силовые трансформаторы), а также имеет опыт в разработке комплексных инфраструктурных решений для промышленности, инженерных сетей зданий и сооружений, коммунального хозяйства. Компания внедряет проекты в различных странах мира. Объем продаж в 2004 году составил 4,1 млрд евро. Количество сотрудников — 16,5 тысяч человек.

«Siemens» полностью интегрирует металлургический бизнес «VA Technologie AG» — группу «Voest Alpine Industrieanlagenbau» (VAI) — в свой департамент «Комплексные решения и услуги для промышленности». Объединенная компания «Siemens и VAI» станет одним из ведущих мировых поставщиков технологий, решений и услуг для заводов по производству чугуна, стали и алюминия, а также позволит укрепить свои позиции как одной из ведущих в этом секторе международных компаний и обеспечить крепкий фундамент для дальнейшего развития.

В целом, слияние компаний позволит создать крупнейшего поставщика электротехнического оборудования, систем и услуг в промышленном, строительном и коммунальном секторах, включая ИТ-услуги, будет способствовать более интенсивному развитию деятельности концерна «Siemens» в Центральной и Юго-Восточной Европе.

На украинском рынке металлургическое подразделение компании «VA Tech» — группа «Voest Alpine Industrieanlagenbau» (VAI) — занимает прочные позиции ведущего поставщика оборудования и решений для одного из важнейших секторов украинской экономики — горно-металлургической промышленности. В настоящее время консорциум ИСД совместно с VAI реализует едва ли не самый крупный инвестиционный проект в Украине по реконструкции Алчевского металлургического комбината (АМК, Луганская область). Общая стоимость программы реконструкции составляет 1,4 млрд евро. После ее реализации объемы производства увеличатся вдвое. Группа VAI принимает активное участие в модернизации таких металлургических гигантов Украины, как Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича, комбинат Азовсталь, Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского.

«Мы чрезвычайно удовлетворены решением Центрального правления концерна усилить инжиниринговый бизнес «Siemens» за счет приобретения компании «VA Tech». Это важно для регионального подразделения «Siemens» в Украине, поскольку инфраструктурные преобразования в промышленности, в частности в металлургии, сейчас как никогда актуальны и имеют большие перспективы. Мы надеемся, что после объединения двух наших компаний, имеющих большой опыт работы на рынке Украины, мы сможем предоставлять нашим заказчикам еще более эффективные инновационные продукты и решения, а объединенная команда наших специалистов сможет укрепить и расширить круг наших украинских партнеров и клиентов», — так прокомментировал приобретение австрийской инжиниринговой компании Мартин Грунерт, генеральный директор дочернего предприятия «Сименс Украина».

«Сименс» в Украине представлен широким спектром своих продуктов и решений, особенно в области телекоммуникаций и медицинского оборудования, а также транспортных систем, средств автоматизации производства и энергетического оборудования. В 2004 финансовом году объем продаж всех консолидированных подразделений «Сименс» в Украине составил 217 млн евро, а портфель заказов достиг 291 млн евро.