

УДК 669.187.526.001.57

О ВЛИЯНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ В ПРОЦЕССЕ ЭЛПЕ НА СТРУКТУРУ ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ

Г. В. Жук

Обоснована перспективность получения крупногабаритных (диаметром более 1 м) слитков титановых сплавов способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Приведены расчетные данные, подтвержденные экспериментально, которые свидетельствуют о влиянии температурных условий в кристаллизаторе на структуру слитков. Установлены технологические режимы, способствующие получению улучшенной структуры титановых слитков.

Prospects of producing large-sized (more than 1 mm diameter) ingots of titanium alloys using a method of electron beam cold heat melting have been grounded. The calculated data, confirmed experimentally, are given to confirm the effect of temperature conditions in the mould on the structure of ingots. Technological conditions, promoting the producing of improved structure of titanium alloys, have been established.

Ключевые слова: титан; электронно-лучевая плавка; крупногабаритные слитки; кристаллизация; математическое моделирование; послойное формирование слитка

В настоящее время широкое применение титана и его сплавов в различных областях деятельности человека в значительной степени ограничивается его высокой стоимостью. Однако, если учитывать, например, тот факт, что стойкость к коррозии титана превышает стойкость нержавеющей сталей примерно в 100 раз (а соответственно, увеличивается и время эксплуатации изделий из титана), то дороговизна титана становится относительной. Если же при этом принимать во внимание его относительно низкую (4500 кг/м^3) плотность, то к факторам, положительно влияющим на экономические характеристики изделий из титана, добавятся еще и его удельные характеристики, что повлечет снижение расхода топлива, количества несущих конструкций и увеличение их полезной массы. Вместе с тем, для успешного внедрения титана следует снижать его себестоимость. Одним из путей уменьшения себестоимости слитков титана является увеличение их размера, что позволяет снизить удельные затраты на 1 кг металла за счет уменьшения времени на технологические операции по подготовке плавки и после нее, удельной поверхности слитка (что позволяет уменьшить потери металла при механической обра-

ботке после деформации в условиях нагрева вне вакуума), потерь на обрезь от головной и донной частей слитка и с краев полуфабрикатов, а также за счет увеличения количества стандартных (по массе) заготовок для последующей деформации, которые можно изготовить из одного слитка.

Увеличение размера слитков означает увеличение степени деформации при получении сортовой заготовки, что положительно сказывается на структуре кованого металла. Необходимо также отметить, что крупные слитки нужны и для изготовления массивных деталей в случае, если сварка невозможна или недопустима исходя из технических требований.

Проблема получения больших слитков состоит в обеспечении качества металла. Масштабный фактор оказывает значительное влияние на структуру и свойства металла слитков, зачастую устанавливая непреодолимый барьер на пути их укрупнения. Как отмечают авторы работ [1, 2], для определенных металлургических технологий существуют критические размеры слитков заданных сплавов, выше которых невозможно получить слитки удовлетворительного качества. Профессор А. Митчелл [2] связывает это ограничение с сегрегацией и образованием крупных включений в слитках большого диаметра. Основным источником таких «неприятнос-

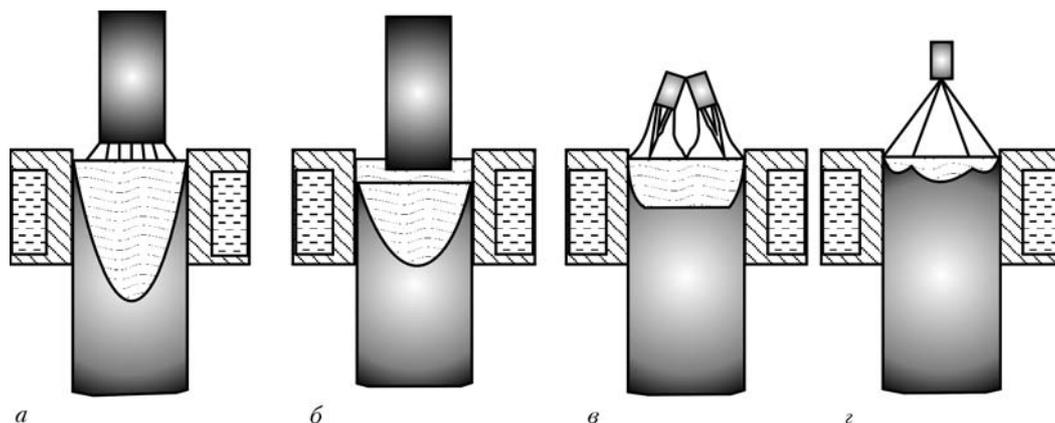


Рис. 1. Схемы кристаллизации слитков в процессах ВДП (а), ЭШП (б), ПДП (в) и ЭЛП (г)

тей» является наличие развитой жидкой ванны в головной части формируемого слитка. В сочетании с высокими градиентами температур, характерными для переплавных процессов в водоохлаждаемом кристаллизаторе, глубокая жидкая ванна приводит к значительной ликвации химических элементов. Таким образом, чтобы получить качественный слиток большого (около 1 м) диаметра, необходимо уменьшать объем жидкой ванны. Это можно сделать двумя путями: уменьшить подаваемую в кристаллизатор электрическую мощность или производительность плавки. В процессах с зависимым источником нагрева (например, вакуумно-дуговой (ВДП) или электрошлаковый (ЭШП) переплав) эти два фактора взаимосвязаны между собой. Уменьшая ток, мы тем самым уменьшаем производительность процесса. Проблема состоит в том, что при уменьшении тока ниже некоторого критического значения на периферии слитка, вблизи водоохлаждаемых стенок кристаллизатора, металл находится в твердом состоянии и не будет сплавляться в цельный слиток (возникнут неслитины). Перераспределить же нагрев в сторону периферийной части слитка в указанных процессах не представляется возможным. В данном случае жидкая ванна будет иметь вид, показанный на рис. 1, а, б, и существенно уменьшить ее объем без ущерба качеству слитков невозможно.

Гораздо большие возможности, с точки зрения управления глубиной жидкой ванны, предоставляют процессы специальной металлургии, использующие независимые источники нагрева — плазму и электронный луч. С их помощью можно не только изменять общую мощность нагрева слитка в кристаллизаторе, но и эффективно перераспределять нагрев по его поверхности. Применение же в указанных способах промежуточной емкости позволяет изменять производительность плавки (скорость подачи перегретого жидкого металла в кристаллизатор). Изменяя потоки тепловой энергии в кристаллизатор (количество перегретого металла, поступающего в единицу времени из промежуточной емкости, и поверхностный нагрев непосредственно зеркала жидкой ванны) можно в широких пределах менять глубину и конфигурацию жидкой ванны.

Использовать перераспределение нагрева в периферийную часть кристаллизатора в случае плазменно-дугового переплава (ПДП) (рис. 1, в) с промежуточной емкостью удастся в меньшей степени. Это связано с тем, что эффективный диаметр пятна нагрева на поверхности ванны соизмерим с размерами кристаллизатора. Увеличение диаметра слитков влечет за собой увеличение мощности плазмотронов, что приводит к укрупнению плазменной струи и размера пятна нагрева.

Наиболее широкие возможности для регулирования температурных условий формирования слитка в кристаллизаторе обеспечивает электронно-лучевой переплав (ЭЛП) с промежуточной емкостью (рис. 1, г) благодаря размеру пятна нагрева на поверхности нагреваемого металла, так называемого фокального пятна [3], и безынерционности нагрева электронным лучом. Для современных плавильных пушек аксиального типа, например «Патон-300» [4], при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 10 А диаметр фокального пятна равен 20...30 мм. По сравнению с диаметром кристаллизатора это составляет всего несколько процентов, поэтому диаметр фокального пятна можно считать точечным. Безынерционность нагрева дает возможность практически мгновенного перемещения луча в необходимую точку. На практике при необходимости нагрева площади определенной конфигурации луч сканируют по заданной траектории, при этом частота сканирования достигает 1000 Гц. Таким образом, время перемещения луча из одной точки нагрева в другую составляет около 0,001 с.

Исходя из сказанного выше следует, что электронным лучом можно создавать практически любую конфигурацию нагрева поверхности слитка в кристаллизаторе. Очевидно, что для компенсации повышенного теплоотвода в области высоких градиентов температуры у стенок кристаллизатора необходимо перераспределение электронно-лучевого нагрева в периферийную часть слитка. Для более объективной качественной и количественной оценки такого перераспределения необходимо выполнить численные расчеты. Для исследования теплофизических процессов, происходящих при формировании слитка, были использованы математические модели

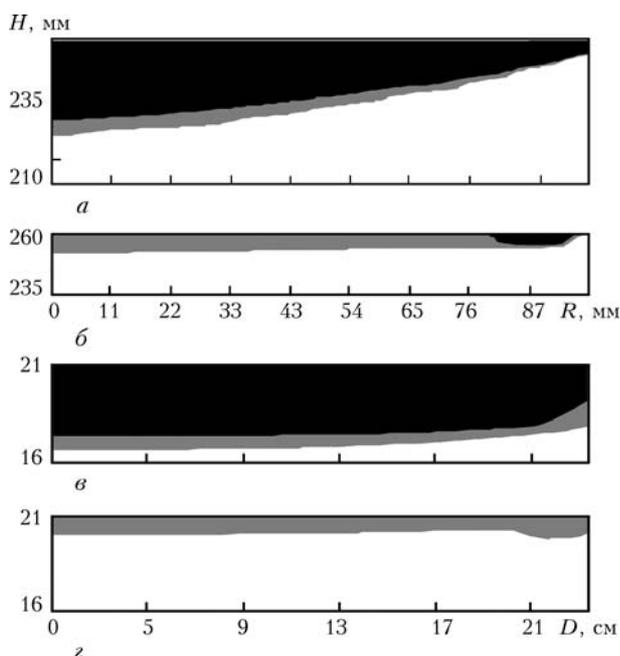


Рис. 2. Температурные поля в продольных сечениях слитков титанового сплава Ti-6Al-4V при мощности электронно-лучевого нагрева: a — 35; $б$ — 15 кВ (слиток диаметром 200 мм); $в$ — 60; $г$ — 45 кВ (слиток-сляб прямоугольного сечения 150×500 мм); R — радиус слитка; D — расстояние от оси слитка; H — высота от дна слитка до его поверхности; черный участок — жидкий металл (>1898 K); серый — зона двухфазного состояния (1868... 1898 K)

[5, 6] — двумерная теплопереноса в цилиндрических слитках и трехмерная для слитка прямоугольного сечения. Модели позволяют получить эволюционирующую картину температурного поля слитка, конфигурации жидкой ванны и зоны твердожидкого состояния металла в зависимости от технологических параметров ЭЛП, производительности процесса, периодичности заливки расплава в кристаллизатор и мощности электронно-лучевого нагрева.

Расчеты, выполненные для слитка диаметром 200 мм и слитка-сляба прямоугольного сечения 150×500 мм титанового сплава Grade 5 ASTM (Ti-6Al-4V), показали, что в зависимости от мощности и конфигурации нагрева поверхности слитков в кристаллизаторе можно достичь режимов плавки как с наличием жидкой ванны в верхней части слитка, так и с твердожидким состоянием его верхнего торца (рис. 2). Для уменьшения глубины жидкой ванны и в последующем перехода ко второму режиму требуется при постоянной производительности плавки уменьшить общую мощность нагрева металла в кристаллизаторе и перераспределить ее в периферийную часть слитка. Как показали результаты расчетов, подтвержденные экспериментально, для перехода к режиму с твердожидким состоянием торца слитка, имеющего прямоугольное сечение, мощность нагрева должна быть меньше на 25 %, а в слитке диаметром 200 мм — более чем в 2 раза [5, 7]. При этом электронные лучи

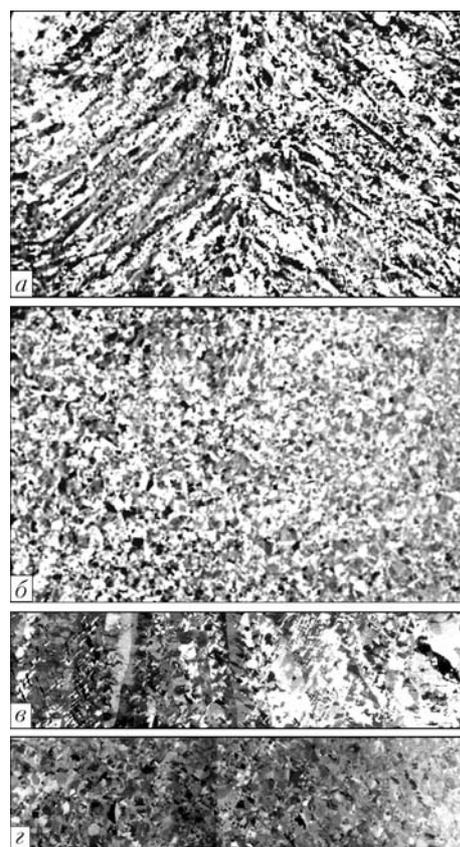


Рис. 3. Макроструктура продольного сечения слитков сплава Ti-6Al-4V: $a, б$ — слиток диаметром 200 мм; $в, г$ — слиток-сляб с прямоугольным сечением 150×500 мм

фактически обогревали слиток «в линию» в его периферийной части, а центральная часть слитка нагревалась только за счет рассеянных электронов (часть кривой распределения Гаусса, выходящая за эффективный диаметр фокального пятна).

На основании данных об изменяющемся во времени температурном поле в слитке произведены также расчеты градиента температур и скорости охлаждения расплава в каждой точке слитка на момент прохождения этой точки интервала солидус-ликвидус, т. е. в момент затвердевания металла. Анализ полученных результатов позволил установить зависимость значений обеих теплофизических характеристик от режимов электронно-лучевого нагрева слитка-сляба. С понижением мощности электронно-лучевого нагрева и переводом его максимума в периферийную часть слитка значения ука-

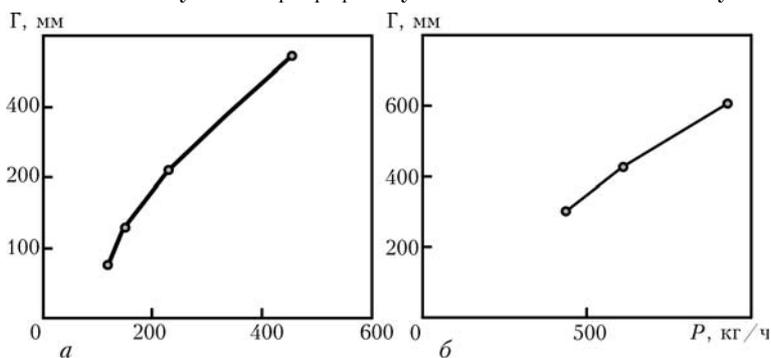


Рис. 4. Влияние производительности плавки P на глубину ванны G в слитках диаметрами 600 (a) и 1200 мм ($б$)

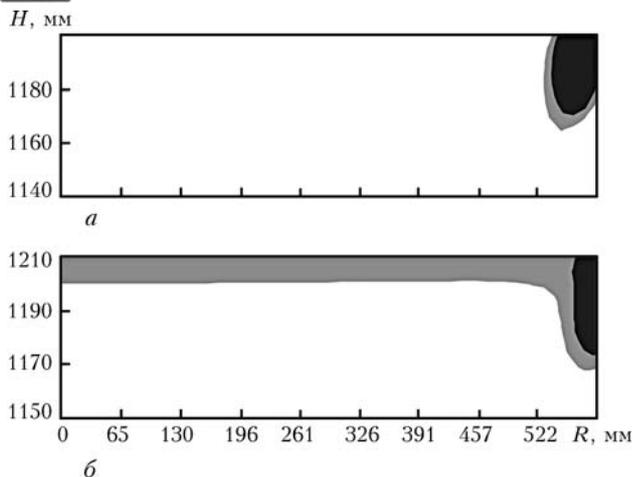


Рис. 5. Температурные поля слитка диаметром 1200 мм в условиях послойной кристаллизации: перед заливкой порции (а) и через 15 с после нее (б)

занных величин возрастают. Вместе с тем, поле скоростей охлаждения наиболее точно отражает условия кристаллизации слитка. Установлено, что при увеличении скорости охлаждения выше некоторого критического значения (для сплава Ti-6Al-4V оно составляет около 1 К/с) в слитках образуется структура, полностью состоящая из равноосных зерен (рис. 3, б, з). Рассчитанные градиенты температур и скорости охлаждения также соответствуют переходу от столбчатой к равноосной структуре на карте кристаллизации сплава Ti-6Al-4V [6].

Если экстраполировать полученные зависимости на процесс производства слитков больших размеров способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ), то можно рекомендовать следующий технологический подход:

перераспределить мощность электронно-лучевого нагрева в периферийную часть слитка (нагрев в линию) и снизить мощность нагрева до значения, при котором обеспечивается наличие жидкой ванны на периферии слитка;

обеспечить равномерный нагрев центральной части слитка на минимальном уровне, необходимом для поддержания ее в жидком или твердо-жидком состоянии.

На практике такой подход сталкивается с определенными трудностями. Так, при увеличении сечения (диаметра) слитка ЭЛПЕ на процессы его кристаллизации начинает влиять масштабный фактор. По-видимому, за счет удаления центральной части слитка от охлаждающей поверхности кристаллизатора процесс отвода тепла из нее замедляется и снижение мощности обогрева не приводит к существенному уменьшению глубины ванны. В связи с этим в рамках вышеупомянутой математической модели оптимизация режимов плавки для цилиндрических слитков диаметром 600...1200 мм осуществлялась путем изменения производительности плавки (рис. 4). Формальным критерием глу-

бины жидкой ванны выбран радиус слитка как общепринятый при оценке удовлетворительности условий кристаллизации. Установлено, что глубина жидкой ванны не превышает радиуса слитка при следующей производительности плавки: при диаметре 600 мм — 350 кг/ч; 840 мм — 550 кг/ч; 1200 мм — 800 кг/ч. Дальнейшее уменьшение глубины жидкой ванны требует уменьшения производительности плавки ниже указанных значений, что является технологически нецелесообразным, поскольку при этом значительно увеличиваются время плавки и затраты электроэнергии на выплавку 1 кг слитка.

Выход из этой ситуации может состоять, по нашему мнению, в снижении мощности центрального обогрева слитков большого диаметра и переводе их поверхности в твердое состояние, температура поверхности должна постоянно быть на уровне не ниже 100 К от точки плавления. При этом на периферии поверхности слитка в кристаллизаторе поддерживают жидкую ванну для формирования удовлетворительной поверхности слитка. Такой режим обеспечит металлургическое взаимодействие между порциями металла, сливаемыми в кристаллизатор и затвердевающими с образованием слитка, и одновременно исключит ликвацию легирующих элементов в условиях отсутствия жидкой ванны в центре слитка. Указанные предположения подтверждены математическими расчетами. Как видно из рис. 5, вновь заливаемая порция перегретого металла подплавляет предыдущую. Таким образом обеспечивается стабильность структуры, химического состава и свойств металла в слитке, исключаются расслоение его металла и образование неслитин. Несомненно, идея послойного формирования слитка при ЭЛПЕ требует практического подтверждения путем проведения экспериментальных плавков.

1. *Титан* / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, А. Н. Галицкий и др. — М.: Металлургия, 1983. — 559 с.
2. *Митчелл А.* Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // *Соврем. электрометаллургия.* — 2005. — № 2. — С. 3–8.
3. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
5. *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.
6. *Zhuk G. 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 // *J. Materials Proc. Techn.* — 2007. — **190**. — P. 387–392.
7. *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.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 02.04.2008