

Рис. 5. Структурная схема начальной неустойчившейся стадии формирования микропористого конденсата реиспарением второй фазы

родышами (пунктирные стрелки). Концентрация легкоплавкого вещества в смешанной паровой фазе и кинетика его реиспарения при осаждении являются одними из главных параметров, определяющих структуру микропористых конденсатов.

Таким образом, совместное электронно-лучевое испарение металлических или керамических материалов с NaCl или NaF и последующее осаждение смешанного парового потока на подложку, тем-

пература поверхности которой близка или превышает температуру плавления хлорида или фторида, позволяет получать пористые конденсаты (покрытия) с микронными или субмикронными размерами столбчатых микропор в широком диапазоне их объемного содержания.

1. Палатник Л. С., Черемский П. Г., Фукс М. Я. Поры в пленках. — М.: Энергоиздат, 1982. — 215 с.
2. Черемский П. Г., Слезов В. В., Бетехтин В. И. Поры в твердом теле. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 375 с.
3. Мовчан Б. А. Неорганические материалы, осаждаемые из паровой фазы в вакууме // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. — Київ: Наук. думка, 1998. — С. 318 – 332.
4. Блок Ф. Е., Уикс К. Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов. — М.: Металлургия, 1965. — 240 с.
5. Свойства неорганических соединений: Справочник / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. П. Чечев — Л.: Химия, 1983. — 390 с.
6. Сомов А. И., Тихоновский М. А. Эвтектические композиции. — М.: Металлургия, 1975. — 304 с.
7. Эллиот Р. Управление эвтектическим затвердеванием. — М.: Металлургия, 1987. — 352 с.

Международный центр электронно-лучевых технологий  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 06.06.2001

УДК 669.187.526:51.001.57

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ УСАДОЧНОЙ РАКОВИНЫ В СЛИТКАХ ЭЛПЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V

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

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса образования усадочной раковины в слитках титанового сплава Ti-6Al-4V при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью. Получены поля температур в слитках при квазистационарном режиме плавки и при кристаллизации последней зоны твердожидкой фазы. Определены глубина локализации и размеры усадочных раковин в слитках круглого сечения диаметрами 200; 300 и 400 мм при мгновенном отключении источника нагрева и постепенном снижении мощности.

Results of theoretical and experimental investigations of the process of formation of a shrinkage cavity in ingots of titanium alloy Ti-6Al-4V in electron beam melting with an intermediate crucible are given. The fields of temperatures in ingots at a quasi-stationary condition of melting and solidification of the last zone of the solid-liquid phase are obtained. Depth of localization and sizes of the shrinkage cavities in round-section ingots of 200, 300 and 400 mm diameters at an instantaneous disconnection of the heat source and a gradual reducing of power are defined.

**Ключевые слова:** электронно-лучевой переплав; математическое моделирование; тепловые процессы; титановый сплав; усадочная раковина

Одним из основных дефектов в слитке, связанных с его кристаллизацией при электронно-лучевом переплаве, является усадочная раковина (рыхлость). Этот дефект образуется вследствие неравномерного охлаждения верхнего торца слитка после отклю-

чения внешнего источника обогрева. При этом поверхность слитка охлаждается быстрее, чем более глубокие слои металла за счет лучистого теплообмена с окружающей средой, и тепловой центр температурного поля слитка перемещается от его верхнего торца в глубину. На уровне залегания теплового центра при окончательной кристаллизации слитка из-за сжатия вследствие затвердевания возникает усадочная раковина или рассеянная пористость.

© А. Н. КАЛИНЮК, Г. В. ЖУК, Н. П. ТРИГУБ, 2001

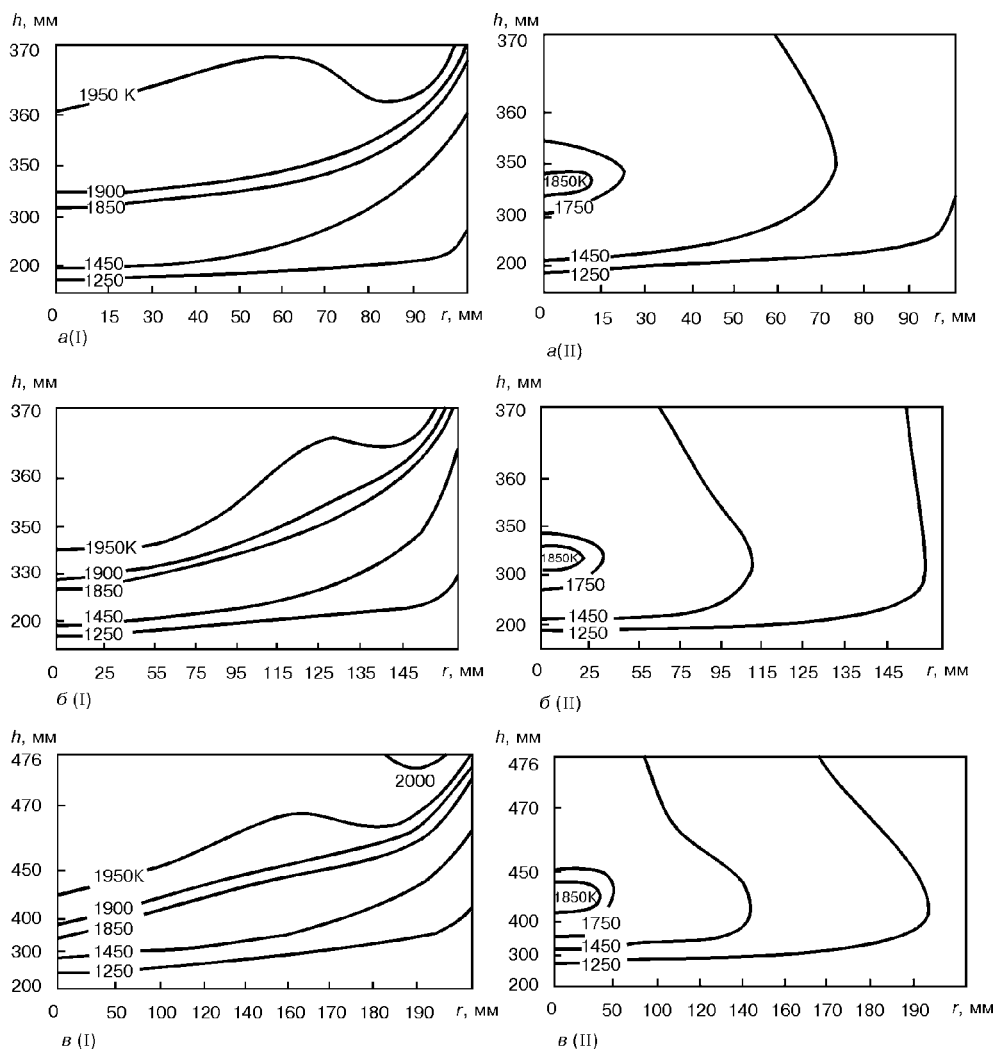


Рис. 1. Распределение значений температуры по высоте  $h$  и радиусу  $r$  слитков при квазистационарном режиме плавки (I) и после отключения источника обогрева (II): а — диаметром 200 мм; б — 300 мм; в — 400 мм

В слитках титана и его сплавов усадочная раковина представляет собой полость или совокупность ячеек и пор, сосредоточенных в головной части слитка и изолированных от окружающей среды посредством «моста» — корочки плотного, лишенного каких-либо несплошностей металла [1].

Описанная картина характерна, в частности, для слитков титанового сплава Ti-6Al-4V, получаемых электронно-лучевым переплавом с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) [2]. Существуют механизмы постепенного снижения мощности обогрева верхнего торца слитка, при которых тепловой центр выводится на поверхность слитка, благодаря чему усадочная раковина в готовом слитке отсутствует. Тем не менее, при выплавке слитков имеют место внештатные ситуации внезапного отключения источника обогрева (при ЭЛПЕ — электронных пушек), когда реализовать данные механизмы не представляется возможным.

Задачей настоящего исследования является расчет залегания усадочной раковины в слитках круглого сечения при мгновенном полном отключении источника обогрева. Расчеты проводили в рамках математической модели кристаллизации цилиндрических слитков при ЭЛПЕ [3].

Слитки выплавляли по традиционной технологии ЭЛПЕ с горизонтальной подачей расходоуемой заготовки, накоплением жидкого металла в промежуточной емкости, его переливом в кристаллизатор и формированием там готового слитка [2, 4, 5]. Средняя массовая скорость переплава составляла: для слитков диаметром 200 мм — 150 кг/ч, диаметром 300 мм — 210 кг/ч, диаметром 400 мм — 250 кг/ч. Высота порции жидкого металла, заливаемой в кристаллизатор, во всех случаях колебалась в пределах 10...15 мм. Обогрев верхнего торца слитков осуществляли двумя аксиальными электронными пушками, энергия которых распределялась по поверхности слитка в виде концентрических кругов. Мощность первого луча  $W_1$  равномерно распределялась в центральной области, а второго  $W_2$  — при помощи кольцевой разбёртки шириной 20...30 мм по периферии со смещением на стенки кристаллизатора 6 мм. При этом изменялась как общая мощность ( $W_1 + W_2$ ), так и мощность каждой пушки.

После достижения квазистационарного режима плавки (когда высота слитка превышала его диаметр) моделировали мгновенное отключение электронных пушек. В результате расчетов были получены температурные поля в слитках (рис. 1)



**Параметры кристаллизации слитков титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ**

№ эксперимента	Диаметр слитка, мм	Мощность электронного пучка, кВт		Глубина залегания усадочной раковины, мм	Время до полной кристаллизации, с
		$W_1$	$W_2$		
1	400	55	55	52	400
2	300	40	20	48	330
3	300	30	30	38	120
4	200	15	15	50	275
5	200	11	15	33	200
6	200	9	15	16	100

при квазистационарном режиме плавки и при кристаллизации последней зоны твердожидкой фазы после отключения источника обогрева.

Расчеты показали (таблица), что повышение общей мощности обогрева верхнего торца слитка, равно как и перераспределение мощности в сторону центральной области, влечет за собой увеличение времени от момента отключения источника обогрева до полной кристаллизации слитка и глубины залегания усадочной раковины. При этом в слитках всех диаметров расчетная глубина залегания усадочной раковины колебалась в пределах 20...60 мм.

Для получения бездефектных слитков очень важна количественная оценка процесса усадки. Между тем в литературе практически отсутствуют конкретные данные об усадочных явлениях в слитках титана и его сплавов при электронно-лучевой плавке.

В исследованиях использовали ультразвуковой контроль (УЗК) с применением дефектоскопа УД-11А. Оптимальную рабочую частоту УЗК определяли экспериментально на исследуемом материале. Наилучшее соотношение сигнал – шум обеспечила частота 2,5 МГц. Исследования проводили методом эхо-контроля. Ультразвуковые колебания прикладывались к исследуемому слитку с применением промежуточной среды

(глицерина) для улучшения акустического контакта. Сканирование поверхности осуществляли по образующей слитков в двух взаимно перпендикулярных плоскостях вручную с шагом линий сканирования, равным диаметру рабочей поверхности излучателя (20 мм).

Исследовали локализацию усадочной раковины в головной части слитков при полном мгновенном отключении обогрева в конце плавки, а также при постепенном снижении мощности обогрева ванны до нуля. Для слитков диаметром 400 мм время снижения мощности составляло 5 мин., для слитков диаметром 300 мм – 3 мин и диаметром 200 мм – 2 мин. Распределение мощности по поверхности слитка в кристаллизаторе не изменяли.

Ультразвуковой контроль показал, что при мгновенном полном отключении источника обогрева усадочная раковина располагается на глубине 20...90 мм от верхнего торца слитков, имеет протяженность до 70 мм и, как правило, смещена от продольной оси на 30...50 мм. С увеличением диаметра слитков глубина локализации усадочной раковины возрастает с 30 мм в слитках диаметром 200 мм до 55 мм в слитках диаметром 400 мм. Увеличение диаметра слитка незначительно влияет на протяженность и объем усадочной раковины. В слитке диаметром 200 мм максимальная протяженность усадочной раковины составляла 50 мм, в слитке диаметром 400 мм – 70 мм. Очевидно, что смещение усадочной раковины относительно продольной оси слитка и места слива жидкого металла в кристаллизатор (напротив носка промежуточной емкости) связано с гидродинамикой жидкой ванны.

При постепенном снижении мощности, подаваемой на кристаллизатор, УЗК также обнаружил наличие усадочных дефектов в слитках. Они расположены в осевой зоне слитков на глубине 20...50 мм от верхнего торца. В этом случае для слитков всех исследованных диаметров была характерна большая амплитуда отраженного сигнала. Это может быть связано с крупным размером зерна слитка. Размеры зон, в которых наблюдали отражения от дефектов,

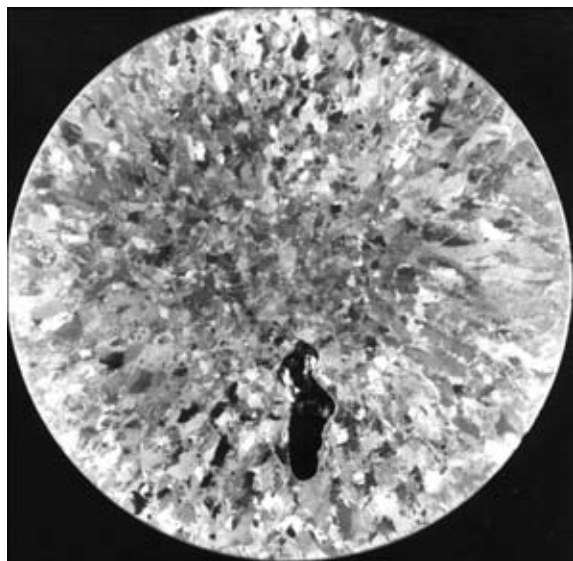


Рис. 2. Усадочная раковина в слитке диаметром 200 мм при мгновенном полном отключении источника обогрева

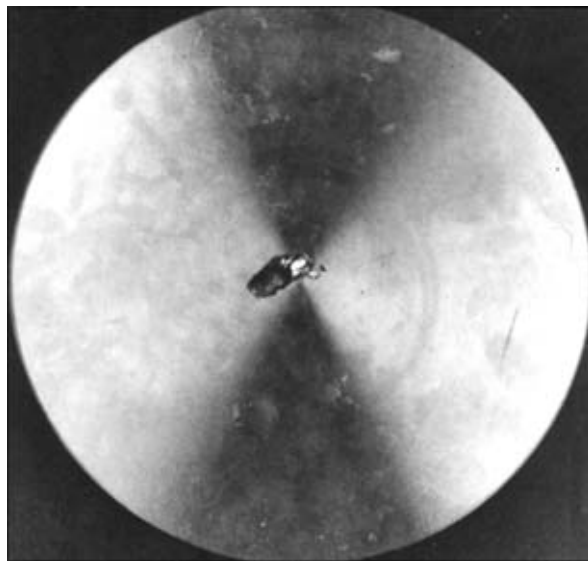


Рис. 3. Усадочная раковина в слитке диаметром 300 мм при постепенном (3 мин.) снижении мощности



невелики (примерно 20×20 мм в слитке диаметром 400 мм, 10×10 мм в слитке диаметром 300 мм), что свидетельствовало о небольшом объеме дефектов. Механическая обработка головной части слитков подтвердила результаты УЗК.

При мгновенном полном отключении источника обогрева в слитке диаметром 200 мм на глубине 17 мм от верхнего торца была выявлена усадочная раковина протяженностью 63 мм, которая располагалась под углом к продольной оси слитка со смещением относительно нее на 25 мм (рис. 2). Дальнейшее металлоструктурное исследование с использованием глубокого травления показало, что усадочная раковина смещается на угол 70° относительно места слива жидкого металла в кристаллизатор, представленного кристаллитами вытянутой формы, направленными от оси слитка к периферии. В результате постепенного снижения мощности, подаваемой на кристаллизатор в конце плавки, усадочная раковина локализовалась в осевой зоне слитка (рис. 3). Так, в слитке диаметром 300 мм раковина располагалась на глубине 25 мм от верхнего торца практически по центру слитка, под небольшим углом к его продольной оси. Ее относительные размеры и глубина залегания уменьшились на 30 %.

Сравнение результатов, полученных численными методами в рамках математической модели

и экспериментальным путем (УЗК и металлография), показало адекватность математической модели. С использованием данной модели можно рассчитывать глубину залегания усадочной раковины в цилиндрических слитках и рекомендовать технологические режимы ее выведения на поверхность. Это позволяет исключить операцию механической обработки головной части слитков перед дальнейшим переделом и сэкономить до 60 кг металла на каждом слитке.

1. *Слитки титановых сплавов* / В. И. Добаткин, Н. Ф. Аношкин, А. Л. Андреев и др. — М.: Металлургия, 1966. — 286 с.
2. *Утилизация отходов титанового производства методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ)* / А. Н. Калинюк, А. Л. Тихоновский, Н. П. Тригуб и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 1. — С. 59–63.
3. *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.
4. *Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью* / И. Ю. Варич, С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб, А. Н. Калинюк // Там же. — 1997. — № 4. — С. 15–21.
5. *Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью* / Н. П. Тригуб, А. Я. Дереча, А. Н. Калинюк и др. // Там же. — 1998. — № 2. — С. 16–20.

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

Поступила 13.04.2001

УДК 669.187.526.001.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕПЛАВА

А. Б. Лесной, В. Ф. Демченко, М. Л. Жадкевич

Рассмотрена сопряженная модель теплообмена и гидродинамики при затвердевании слитка электронно-лучевого передела (ЭЛП). Модель базируется на уравнении конвективно-кондуктивного переноса энергии и полной системе уравнений Навье – Стокса с учетом термогравитационной, термокапиллярной и вынужденной конвекций, обусловленных сливом металла из промежуточной емкости. Методами компьютерного моделирования проанализирована тепловая и гидродинамическая обстановка в кристаллизующемся слитке ЭЛП цилиндрической формы.

Conjugate model of heat exchange and hydrodynamics in solidification of the electron beam remelted (EBR) ingot is considered. The model is based on the equation of a convective-conductive transfer of energy and a full system of Navier – Stokes equations with allowance for a thermogravitational, thermocapillary and forced convection which is caused by a metal pouring from the intermediate crucible. Heat and hydrodynamic situation in a solidifying EBR cylindrical ingot was analyzed using the methods of a computer modelling.

**Ключевые слова:** электронно-лучевой передел; численное моделирование; тепловые, гидродинамические процессы; термогравитационная, термокапиллярная, вынужденная конвекция; кристаллизация слитка

При затвердевании жидкого расплава существенное влияние на формирование кристаллической структуры литого металла, образование в нем дефектов ликвационного и усадочного происхождения оказывает динамика движения расплава. Форма ме-

© А. Б. ЛЕСНОЙ, В. Ф. ДЕМЧЕНКО, М. Л. ЖАДКЕВИЧ, 2001