



УДК 669.187.58.001.5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ВЫПЛАВКИ ГОМОГЕННЫХ СЛИТКОВ АЛЮМИНИДА ТИТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО И ИНДУКЦИОННОГО ИСТОЧНИКОВ НАГРЕВА

Г. М. Григоренко, И. В. Шейко, Ю. М. Помарин,
Э. Н. Чадюк, В. Ю. Орловский

Показана целесообразность использования плазменно-дугового переплава и индукционной плавки в секционном кристаллизаторе для получения слитков алюминидов титана с высокой химической однородностью, разработаны технологические рекомендации для выплавки однородных слитков, проведены всесторонние исследования полученного материала и обоснована возможность одностадийной технологии производства литого алюминидов титана.

It is shown that the use of plasma-arc remelting and induction melting in a sectioned mould is rational for producing titanium aluminide ingots of a high chemical homogeneity. Technological recommendations for melting homogeneous ingots are issued, comprehensive examination of the material produced is carried out and the feasibility of a single-stage technology of cast titanium aluminide production is grounded.

Ключевые слова: интерметаллид; алюминид титана; индукционная плавка; плазменно-дуговая плавка; микроструктура; макроструктура; слиток; водоохлаждаемый кристаллизатор; затравка

Одним из наиболее перспективных направлений, которые достаточно успешно развиваются в мире в области новых металлических материалов с высоким уровнем жаростойкости и термической стабильности, является создание интерметаллических сплавов системы Ti-Al и усовершенствование технологий их получения [1 – 4].

Эти сплавы в ближайшем будущем могут составить серьезную конкуренцию суперсплавам на основе никеля, поскольку по некоторым характеристикам они превосходят показатели никелевых сплавов. Так, алюминиды титана более легкие по сравнению с никелевыми сплавами, не требуют для легирования дорогостоящих и дефицитных легирующих компонентов, а значит более дешевые, отличаются высокой жаростойкостью при температурах, характерных для рабочих камер авиационных двигателей, и имеют достаточно высокие прочностные характеристики (предел прочности при 1200 °C более 100 МПа и при 1500 °C более 50 МПа).

К недостаткам алюминидов титана можно отнести практически нулевую пластичность при комнатной и особенно минусовой температуре, что сдерживает, а в некоторых случаях ограничивает возможности их применения в промышленных масштабах. В этом случае весьма проблематичным представляется получение и эксплуатация изделий сложной конфигурации. В то же время они могут быть широко использованы в виде литых изделий, например клапанов сверхмощных двигателей внутреннего сгорания [5]; в качестве жаростойких покрытий на лопатках газотурбинных двигателей и других деталей, подвергающихся воздействию высокотемпературных газовых потоков, наносимых методом электронно-лучевого испарения материалов в вакууме [6, 7]; в качестве присадочного материала при дуговой сварке [1], поскольку алюминид титана сравнительно несложно измельчить до порошкообразного состояния.

Промышленное применение алюминидов титана в значительной мере сдерживается из-за отсутствия надежной технологии получения слитка, которая обеспечивала бы равномерное распределение компонентов в объеме слитка,



жесткие требования к химическому составу по легирующим элементам и содержанию растворенных газов и примесей.

Процесс изготовления интерметаллидных сплавов системы Ti–Al достаточно сложный и многостадийный. Он включает в себя непосредственно выплавку сплава как такового, разливку его в изложницы и формы и достаточно длительный изотермический отжиг полученных изделий (слитков). Выплавка интерметаллидных сплавов в особых плавильных агрегатах сопряжена с определенными техническими трудностями из-за большого количества алюминия, входящего в состав сплава, значительной разницы в температурах плавления и кипения титана и алюминия, большой летучести алюминия, высокой химической активности расплава и необходимости перемешивания расплава для его гомогенизации [2].

Несмотря на указанные трудности в настоящее время выплавка интерметаллидов производится с использованием вакуумно-дугового перепада, индукционной плавки в секционном кристаллизаторе (ИПСК) и электрошлакового перепада.

Цель нашего исследования — разработка технологических принципов выплавки гомогенных слитков алюминидов титана в охлаждаемых кристаллизаторах с применением плазменно-дугового и индукционного источников нагрева.

Модельные образцы алюминидов титана изготавливали методом плазменно-дугового перепада на лабораторной плазменно-дуговой печи У-686 (рис. 1). Она представляет собой герметичную водоохлаждаемую емкость, в верхней части которой смонтирован плазмотрон ПДМ-7М-1, имеющий независимое водяное охлаждение катодного узла и медного сопла. Внутри камеры расположен медный водоохлаждаемый кристаллизатор емкостью 250 г. В верхней части камеры установлен механизм поворота плазмотрона, позволяющий регулировать его наклон в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в пределах 0... 15° от вертикальной оси.

Доступ в рабочий объем камеры осуществляется через люк, закрывающийся плоской герметичной крышкой. Люк расположен соосно с окном смотровой системы и служит для загрузки шихтовых материалов в медный водоохлаждаемый кристаллизатор. Установленный на печи мановакуумметр дает возможность следить за давлением в плавильной камере как

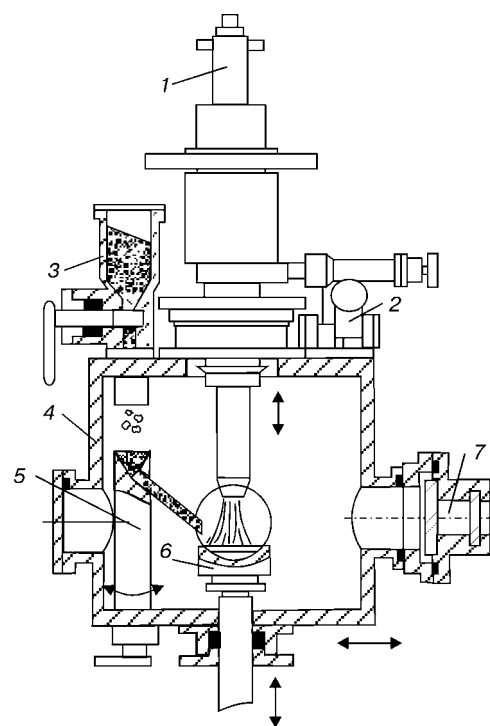


Рис. 1. Схема экспериментальной камеры лабораторной плазменной установки У-686: 1 — плазмотрон ПДМ-7М; 2 — механизм перемещения плазмотрона; 3 — дозатор флюса; 4 — плавильная камера; 5 — поворотная воронка; 6 — кристаллизатор; 7 — смотровое окно

при вакуумировании, так и во время работы. Плазменная установка У-686 позволяет проводить плавки при давлении газов до 5 ата и снабжена предохранительным клапаном максимального давления. Герметизация камеры достигается с помощью резиновых и фторопластовых уплотнителей. В качестве исходных материалов для плавки применяли иодидный титан и алюминий марки А-000. Плавки проводили в атмосфере аргона.

Слитки проходили трехкратный перепад с целью гомогенизации химического состава. Было выплавлено пять слитков Ti–Al диаметром 45 мм, высотой 12 мм и массой 100 г, содержание алюминия в которых изменялось от 32 до 40 %. Полученные слитки разрезали пополам вдоль продольной оси. Одну половину использовали для определения содержания алюминия химическим методом, а другую — для изучения макро- и микроструктуры в литом состоянии. В соответствии с химическим анализом были получены сплавы следующего химического состава: Ti — 31,9 % мас Al; Ti — 33,8 % мас Al; Ti — 35,4 % мас Al; Ti — 38,5 % мас Al; Ti — 40,6 % мас Al. Возможная ошибка в определении содержания алюминия химическим методом не превышает ±0,5 % мас. Содержание кислорода в полученных слитках не превышает 0,10 %, а азота 0,025 %. На рис. 2 представ-

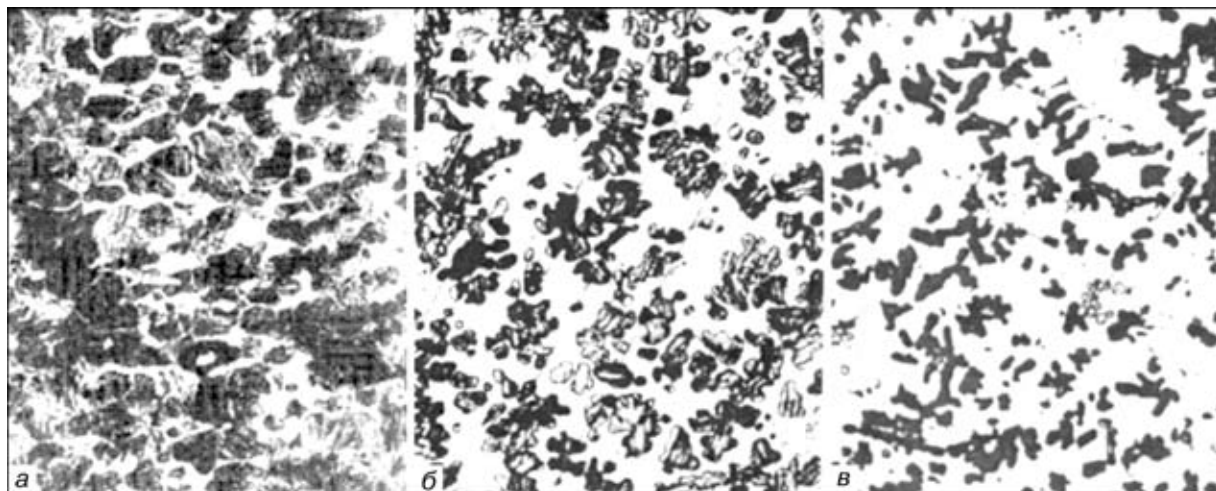


Рис. 2. Микроструктуры сплавов системы Ti–Al плазменно-дугового переплава ($\times 125$): а – Ti – 36,8 % Al; б – Ti – 38,2 % Al; в – Ti – 40,69 % Al

лены микроструктуры сплавов системы Ti–Al в литом состоянии, полученных плазменно-дуговым методом.

С целью обеспечить более равномерное распределение компонентов сплава модельные слитки подвергали повторному переделу с использованием индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Широко известно, что индукционный источник нагрева является наиболее мягким источником тепловой энергии, который во время плавки обеспечивает [8]:

интенсивное перемешивание жидкого металла, что способствует выравниванию температуры и химического состава в объеме металлической ванны;

низкий угар легирующих компонентов благодаря отсутствию локального перегрева металла;

возможность выдерживать металлический расплав в жидком состоянии неограниченное время;

возможность вести плавку в вакууме или газовой среде любого состава и при любом давлении.

Сущность процесса ИПСК заключается в том, что вместо огнеупорного тигля используется секционный водоохлаждаемый кристаллизатор, «прозрачный» для электромагнитного поля, в котором собственно и происходит плавление металла и формирование слитка. Отсутствие тигля из огнеупорного материала исключает загрязнение металлического расплава продуктами реакции взаимодействия компонентов тигля и расплава и позволяет переплавлять металлы и сплавы, обладающие высокой активностью в жидком состоянии, в том числе и титан.

В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе сведения о применении ИПСК для выплавки интерметаллидных сплавов системы Ti–Al представлены в небольшом объеме. Так, в работе [2] приводятся данные о содержании кислорода в алюминиде титана (~35 % Al), выплавленного в различных агрегатах, в том числе и на индукционной установке с холодным тиглем. При индукционной плавке в холодном тигле расплавление шихты и накопление жидкого металла происходит в секционном водоохлаждаемом кристаллизаторе, после чего металл разливается в обычные изложницы или литейные формы и полученный таким образом слиток имеет пороки, характерные для обычного литья. При ИПСК плавление металла (шихты) и формирование слитка происходит в секционном охлаждаемом кристаллизаторе путем его последовательного наплавления. На основании полученных данных авторы делают вывод о том, что в индукционных агрегатах с холодным тиглем можно выплавлять сплавы системы Ti–Al с содержанием кислорода в металле не более 0,02 %. Каких-либо сведений о структуре и свойствах выплавленного интерметаллидного сплава в работе не приводится. В работе [9] представлены данные, свидетельствующие о высокой эффективности индукционной плавки в секционном кристаллизаторе при выплавке интерметаллидного сплава системы Al–Zr, содержащего до 55 % Zr.

При выплавке слитков алюминиды титана на лабораторной установке ИПСК исследования проводились в двух направлениях: в качестве исходных материалов использовали модельные слитки, полученные плазменно-дуговой плавкой, а также шихту, состоящую из



Таблица 1. Химический состав компонентов для выплавки алюминидов титана

Материал	Содержание примесей, %				
	C	Fe	[O]	[N]	[H]
ТГ-100	0,25	0,03	0,055	0,009	0,006
А-000	0,004	0,001	0,002	0,002	0,0001

титановой губки марки ТГ-100 фракцией 8... 12 мм и стружки алюминия марки А-000. Химический состав исходных шихтовых материалов приведен в табл. 1.

Отработку технологических режимов и выплавку самих слитков осуществляли на лабораторной установке ИПСК, основные технические характеристики которой следующие:

- Диаметр секционного кристаллизатора, мм 69
- Количество секций в кристаллизаторе, шт. 16
- Скорость вытягивания слитка, мм/мин 1,5... 7,0
- Максимальная длина выплавляемого слитка, мм 270
- Мощность ВЧ генератора, кВт 100
- Частота рабочего тока, кГц 66
- Количество витков в индукторе, шт. 2
- Высота индуктора, мм 52
- Среда в плавильной камере во время плавки Разрежение, инертный газ

Лабораторная установка ИПСК (рис. 3) включает в себя водоохлаждаемую стальную камеру диаметром 400 мм. Плавильная камера оснащена технологическими люками, которые обеспечивают ее подключение к вакуумным насосам, газовой системе и ввода шихты, а также к смотровой системе. На днище плавильной камеры установлен плавильный узел, в состав которого входят секционный кристаллизатор и индуктор. Для размещения кусковой шихты и ее подачи в кристаллизатор установка имеет бункер, выполненный в виде горизонтальной трубы с толкателем.

Вытяжка слитка во время плавки производится с помощью винтового механизма с электроприводом, который обеспечивает заданную (регулируемую) скорость вытягивания.

Вакуумирование плавильной камеры осуществляется с помощью вакуумной системы, состоящей из двух насосов (РВН-20 и АВП-05), вакуумной задвижки, кранов и трубопроводов.

Для заполнения плавильной камеры после ее вакуумирования инертным газом и организации его протока через камеру в процессе плавки установка подключена к газовой системе, состоящей из блока очистки и приборов для регулирования и контроля расхода инертного газа. В качестве затравок для выплавки алюминидов титана использовали

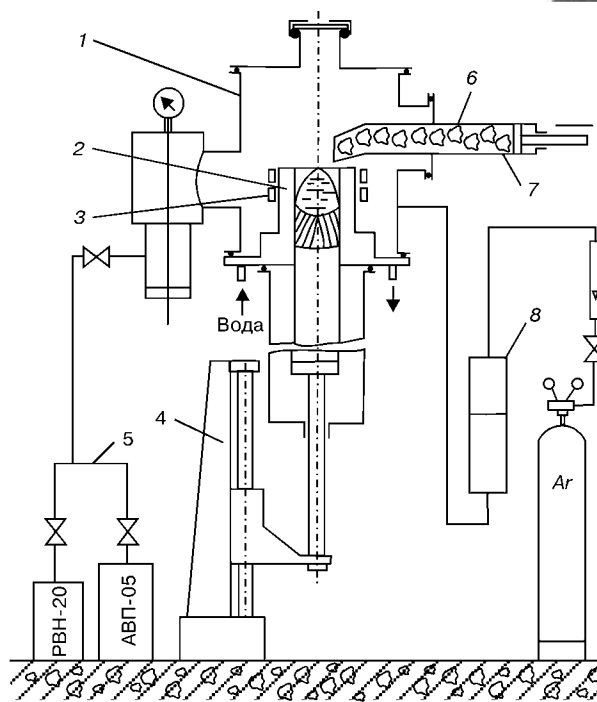


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки ИПСК: 1 – плавильная камера; 2 – секционный кристаллизатор; 3 – индуктор; 4 – механизм вытягивания слитка; 5 – вакуумная система; 6 – бункер; 7 – шихта; 8 – газовая система

технически чистый титан марки ВТ1-0. Толщина затравок составляла 20... 25 мм, а диаметр на 1,0... 1,5 мм меньше диаметра кристаллизатора.

Процесс выплавки начинали с нагрева засыпанного на поддон более тугоплавкого компонента шихты (титановой губки) и ее расплавления, после чего в металлическую ванну вводили необходимое количество алюминиевой стружки. Последняя, попадая на выпуклую поверхность ванны, скатывалась к стенкам кристаллизатора. Находясь у основания мениска, стружка алюминия под воздействием электромагнитных сил вдавливалась в расплав, где при высокой температуре алюминий достаточно быстро расплавлялся и усваивался жидким титаном.

После полного растворения алюминия производилась подача заранее подготовленных порций шихты. Каждая из порций представляла собой предварительно взвешенную навеску (150 г) со строго установленным количеством алюминиевой стружки и титановой губки. Масса каждой порции примерно составляла 1/4... 1/3 массы металлической ванны. Выплавленные слитки имели хорошее качество поверхности (рис. 4).

На поперечном изломе головной части слитка (рис. 5) структура металла была достаточно плотной за исключением осевой зоны, в которой имелась пористость. Объясняется

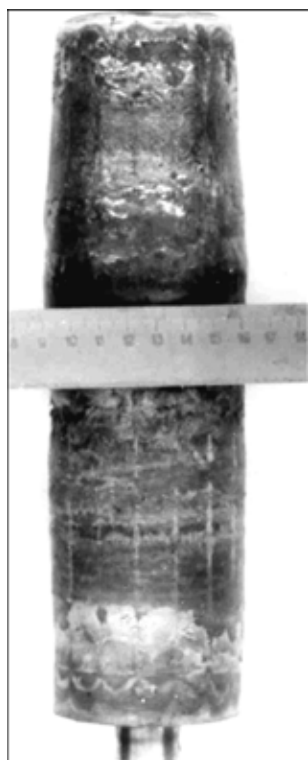


Рис. 4. Внешний вид слитка алюминид титана, полученного на установке ИПСК

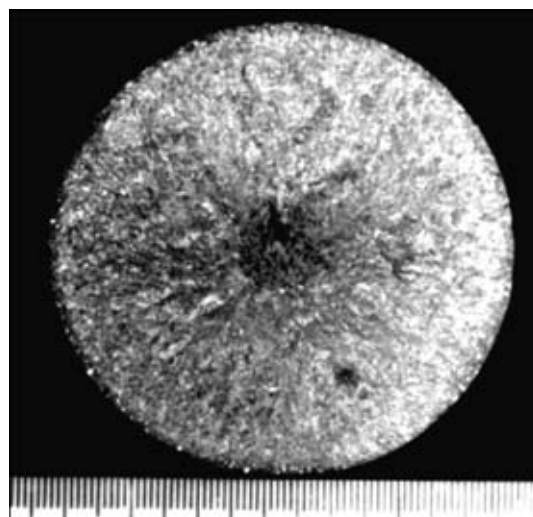


Рис. 5. Поперечный излом головной части слитка, полученного на установке ИПСК (X1,5)

это тем, что при выплавке слитков не применялся комплекс технологических приемов по выведению усадочной раковины.

Как показали результаты химического анализа (табл. 2, 3), слитки, выплавленные из чистой шихты и полученные повторным переплавом размельченного слитка ИПСК и модельных слитков плазменно-дугового переплава, достаточно однородные по распределению алюминия и существенно не отличаются друг

Таблица 2. Распределение алюминия в слитках алюминид титана, выплавленных на установке ИПСК из «чистых» шихтовых материалов

Расчетное содержание алюминия в сплаве, %	Высота слитка, мм	Место отбора проб по высоте слитка	Содержание алюминия по сечению слитка, %		
			Ось слитка	0,5R	Поверхность
36	252	Низ	35,90	35,87	35,85
		Середина	35,62	35,60	35,64
		Верх	35,74	35,80	35,77
40	246	Низ	40,62	40,58	40,44
		Середина	40,10	40,02	40,13
		Верх	40,14	40,04	40,06

Таблица 3. Распределение алюминия в слитках алюминид титана, выплавленных на установке ИПСК с повторным переплавом

Переплавляемый материал	Расчетное содержание алюминия в сплаве, %	Высота слитка, мм	Место отбора проб по высоте слитка	Содержание алюминия по сечению слитка, %		
				Ось слитка	0,5R	Поверхность
Измельченный слиток ИПСК	36	250	Низ	35,83	35,8	35,81
			Середина	35,85	35,84	35,80
			Верх	35,84	35,86	35,84
Модельный слиток ПДП	36	248	Низ	35,30	35,20	35,15
			Середина	35,20	35,45	35,25
			Верх	35,40	35,25	35,22

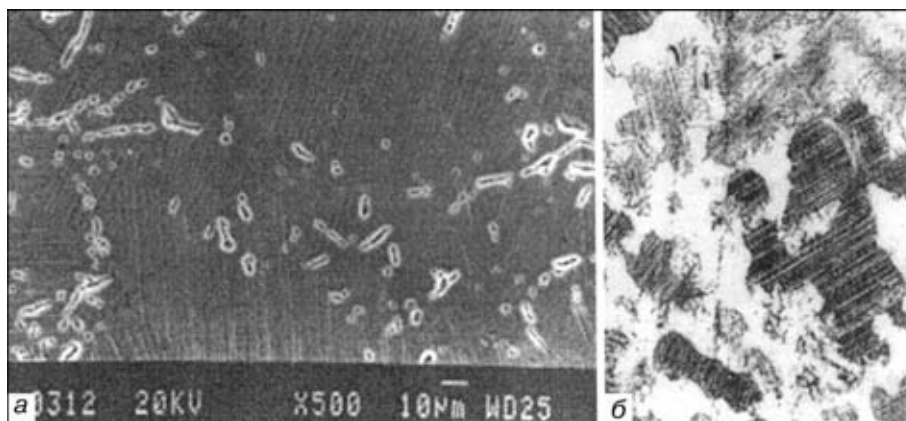


Рис. 6. Включения в зернах сплава Ti — 36 % Al, полученного на установке ИПСК:
а — $\times 500$; б — $\times 125$

от друга. Это свидетельствует о нецелесообразности повторных переделов в любой их последовательности (высокий уровень гомогенности слитка достигается уже при первичной выплавке, а повторный переплав увеличивает риск загрязнения металла газовыми примесями).

На рис. 6 приведены микроструктуры сплавов системы Ti-Al в литом состоянии, полученных методом индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. При анализе структуры слитков, выплавленных с использованием плазменного и индукционного источников нагрева, обнаружена разная величина зерен, что, по нашему мнению, объясняется различной скоростью охлаждения. Детальная идентификация фаз и структурных составляющих проводилась на растровом электронном микроскопе JSM-840. Из рисунка видно, что все сплавы имеют характерную двухфазную ($\alpha_2 + \gamma$) + γ структуру, в которой с повышением содержания алюминия увеличивается площадь γ -фазы. Структура $\alpha_2 + \gamma$ -фазы имеет характерное «видманштеттово» строение. В обеих фазах наблюдаются включения, в которых содержание титана превосходит его содержание в матрице. Характер происхождения этих включений на данный момент не нашел объяснения у исследователей.

Таким образом, проведенные исследования позволили отработать технологические режимы выплавки гомогенных слитков алюминидов титана с использованием индукционного и плазменно-дугового нагревов и рекомендовать как наиболее рациональную схему их получения — выплавку из исходной шихты слитков на установках ИПСК и последующий

переплав на установках ПДП или ИПСК для более полного усреднения состава. В случае использования шихты мелких фракций в качестве первичного переплава целесообразно применять ПДП, так как переплав с использованием ИПСК в такой ситуации затруднен.

1. *Банних О. А., Поварова К. Б.* Перспективы создания жаропрочных и жаростойких сплавов и интерметаллических соединений // Новые металлические материалы: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. — С. 29 — 33.
2. *Changes in oxygen contents of titanium aluminides by vacuum induction. Cold crucible induction beam melting* / K. Sakamoto, K. Yoshikawa, T. Kusamichi, T. Onoje // ISIJ International. — 1992. — 32, N 5. — P. 616 — 624.
3. *Химический состав и структура алюминидов титана электрошлаковой выплавки* // Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, Л. Б. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1996. — № 3. — С. 3 — 8.
4. *Electroslog technology for TiAl ingots* / В. I. Medovar, L. B. Medovar, В. B. Fedorovskii et al. // Proc. XITC'98, Xi'an, China, Sept. 15 — 18, 1998. — P. 741 — 750.
5. *Economical production of titanium-aluminide valves using. Cold crucible induction melting and centrifugal casting in permanent mold* / A. Choundhury, M. Blum, H. Sholz, P. Busse // Proc. of the International symposium on liquid metal processing and casting, ed. A. Mitchell and P. Auburtin. Vacuum Metallurgy Division of AVS, 1997. — P 226 — 236.
6. *Мовчан Б. А., Малащенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 220 с.
7. *Бадиленко Г. Ф., Кривасов А. К., Мовчан Б. А.* Некоторые закономерности испарения и конденсации бинарных сплавов системы титан — алюминий // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 3. — С. 43 — 46.
8. *Индукционный переплав отходов титана и его сплавов* / И. В. Шейко, В. С. Константинов, Ю. В. Латаш, В. В. Степаненко // Металл и литье Украины. — 1994. — № 6.
9. *Качур Л. И., Губченко А. П.* Особенности плавки и получения гомогенных сплавов в индукционных печах с холодным тиглем // Цветные металлы. — 1978. — № 3. — С. 67 — 69.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 18.01.2001