

## НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

С.В. Ахонин, В.А. Березос, В.Ю. Белоус

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены работы по созданию новых титановых сплавов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Разработаны сплавы: СП15, который может применяться для производства высоконагруженных изделий, используемых в агрессивных средах; ТМ1 и ТМ2 — сплавы медицинского назначения, рассчитанные на различный уровень прочности; Т110 — сплав, который по технологичности, свариваемости и работоспособности в условиях циклических нагрузок превышает широко используемый в авиации сплав ВТ22; Т120 — сложнолегированный ( $\alpha+\beta$ )-титановый сплав с высоким комплексом механических и эксплуатационных свойств и хорошей свариваемостью. Библиогр. 17, табл. 8, рис. 11.

*Ключевые слова:* титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; слиток; химический состав; деформация; полуфабрикаты; структура; механические свойства

В последние десятилетия наблюдается значительное повышение объема исследовательских работ, целью которых является получение титановых сплавов с новым комплексом свойств [1–3]. В ведущих мировых материаловедческих центрах США, Китая, России и ЕС проводятся интенсивные работы по созданию новых титановых сплавов с повышенными эксплуатационными свойствами. Однако для более широкого применения сплавов на основе титана в различных отраслях промышленности необходимо не только повышать их механические характеристики, но и снижать стоимость производства, что может быть достигнуто при создании новых сплавов с улучшенными эксплуатационными свойствами и применении новых высокоэффективных технологий их производства, в первую очередь выплавки.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработано и освоено производство отечественных сплавов на основе титана с более высокими механическими и эксплуатационными свойствами, чем существующие в мировой практике, для использования их в медицине, химическом и атомном машиностроении, в авиационной и военной технике.

Первые исследования, выполненные в ИЭС им. Е.О. Патона, с целью создания новых более эффективных сплавов на основе титана были направлены на разработку сплавов для сварочной проволоки. Основная задача заключалась в том, чтобы повысить степень легирования проволоки и таким образом при сварке средне- и высоколегированных сплавов увеличить прочность швов, не снижая показателей пластичности. Так, в 80-х годах прошлого столетия в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработан сплав СП15 для применения в качестве присадочного материала при сварке высокопрочных титановых сплавов [4, 5]. Работы по изучению коррозионной стойкости по-

казали, что сплав СП15 в литом состоянии и после проката является стойким к растрескиванию под напряжением в условиях воздействия морской воды и атмосферы [6]. Согласно ГОСТ 26294–84 титановые сплавы, которые после испытаний под напряжением в растворе  $\text{CH}_3\text{OH} + 0,4\% \text{HCl}$  не растрескиваются в течение 100 ч, являются не склонными к коррозионному растрескиванию. Сплав СП15 двух состояний (литье и прокат), а также после всех режимов термообработки испытывали в растворе  $\text{CH}_3\text{OH} + 0,4\% \text{HCl}$  в течение 2000 ч. При визуальном осмотре поверхности образцов растрескиваний и локальных разрушений не обнаружено. Установлено, что по технологическим характеристикам сплав находится на уровне мировых стандартов, а по коррозионной стойкости превышает их. Поэтому были проведены исследовательские работы, задачей которых являлось изучение возможности изготовления труб из литейного деформируемого сваривающегося двухфазного ( $\alpha + \beta$ )-титанового сплава СП15. Трубы изготавливали из слитков диаметром 400 мм, выплавленных способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛП) с последующей ковкой на трубные заготовки диаметром 120 мм.

Химический состав трубной заготовки диаметром 120 мм из сплава СП15 приведен в табл. 1, а на рис. 1 показана ее макроструктура.

Исследования показали, что микроструктура металла заготовки состоит из претерпевших распад  $\beta$ -зерен размером 0,2...0,4 мм. По их границам местами наблюдалась прерывистая окантовка  $\alpha$ -фазы. Внутризеренная структура состояла из  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. Морфология внутризеренной  $\alpha$ -фазы — пластинчатая. Тонкие пластины  $\alpha$ -фазы различно ориентированы в пределах  $\beta$ -зерен, местами образывая  $\alpha$ -колонии, а  $\beta$ -фаза располагалась в промежутках между  $\alpha$ -пластинами. Толщина  $\alpha$ -пластин составляла примерно 1,0...1,3 мкм.

**Таблица 1.** Химический состав трубной заготовки из сплава СП15, мас. %

Сплав СП15	Al	Mo	V	Nb	Zr	O	N	H
Заготовка	5,0	2,73	2,95	3,8	1,6	0,13	0,04	0,015
ТУ1-809-55-83	3,8...5,1	2,2...3,2	2,0...3,4	1,8...4,0	1,5...2,3	<0,15	<0,05	<0,015

**Таблица 2.** Механические свойства труб из ( $\alpha+\beta$ )-титанового сплава СП15

Диаметр трубы	$\sigma_{\beta}$ , МПа	$\sigma_{\tau}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
92×5	1047...1060	889...902	13,3...14,0	31...33	43...44	25...26
30×4	1310...1320	1075...1080	10...11	41...45	—	—
115×16	1010...1040	887...895	12...13	30...31	72...74	35...37

После прошивки и механической обработки заготовки подвергали горячему и холодному переделу на трубы различных типоразмеров. Изготовленные трубы механически испытывали и их свойства приведены в табл. 2.

Таким образом, проведенные работы показали, что освоение и применение разработанного титанового сплава СП15 позволит выполнять технические проекты нового поколения, создавать аппараты для получения особо агрессивных компонентов, применяемых в специальных производствах оборонного комплекса, снизить их массу, повысить рабочие нагрузки.

Титановая промышленность России производит среднелегированные титановые сплавы системы Ti–Al–Mn (OT4-1, OT4, OT4-2). Они хорошо зарекомендовали себя при использовании их и в сварных конструкциях. Однако вакуумно-дуговой переплав (ВДП) слитков титановых сплавов, содержащих марганец, который легко испаряется, связан с большими технологическими трудностями. Их преодоление практически сводит на нет относительную дешевизну марганца, как легирующего элемента. Кроме того, в титановой промышленности Украины основным способом получения слитков сплавов титана является ЭЛП, который проводится в более глубоком вакууме, чем ВДП, что не позволяет выплав-

лять сплавы с марганцем. Следует также отметить, что сплавы с марганцем имеют пониженную коррозионную стойкость. Поэтому в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины выполнен комплекс исследований по созданию титановых сплавов, которые хорошо свариваются, с характеристиками, превышающими соответствующие показатели сплавов системы Ti–Al–Mn, а также разработана промышленная технология изготовления этих сплавов способом ЭЛП. На основании исследований разработаны низколегированные титановые сплавы, которые по своим механическим характеристикам превосходят, а по свариваемости не уступают, сплавам серии OT (Ti–Al–Mn). Это сплавы серии T80 (Ti–2Al–1,2Fe–1,2Nb–0,6Zr) и T90 (Ti–4Al–1,2Fe–1,2Nb–0,6Zr), заменяющие соответственно сплавы OT4-1 и OT4.

С развитием хирургии по замене больных суставов эндопротезами, а также с увеличением объемов использования имплантатов в стоматологии существенно возрос интерес к титану, который помимо низкого удельного веса и высокой коррозионной стойкости обладает еще и хорошей биологической совместимостью.

До настоящего времени для изготовления эндопротезов и имплантатов широко используются такие материалы, как нелегированный титан и сплав Ti–6Al–4V. Однако материалы, применяемые в медицине, особенно те, которые используют для изготовления эндопротезов, имплантатов, должны обеспечивать длительный срок службы изготавливаемых из них деталей и поэтому их необходимо легировать только биологически совместимыми, нетоксичными элементами, тогда как такие легирующие элементы, как ванадий, кобальт и никель могут образовывать в организме человека токсичные соединения [7], которые являются причиной воспалительных процессов с токсикологическими симптомами.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработаны два сплава медицинского назначения — TM1 системы Ti–3,5Al–5Nb–3Zr [8] и TM2 (Ti–5Al–6Nb–2Fe–0,6Zr) [9], рассчитанных на различный

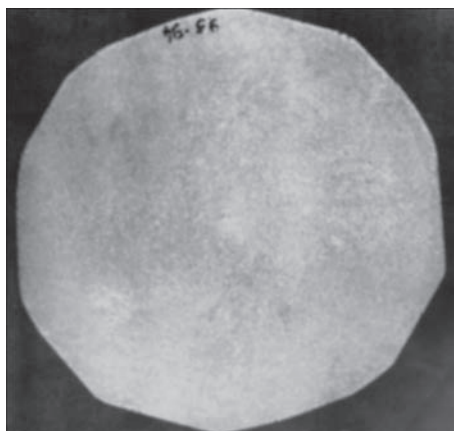


Рис. 1. Макроструктура трубной заготовки диаметром 120 мм из сплава СП15

Таблица 3. Механические свойства титановых сплавов, применяемых в медицине

Сплав	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$E$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma^{-1}$ , МПа
BT1-0	320	400	$11,1 \cdot 10^4$	25	–	170
Ti-6Al-4V	795	860	$11,5 \cdot 10^4$	10	25	400
Ti-6Al-7Nb (Швейцария)	900	1000	–	13	–	–
Кость	250	–	$2,5 \cdot 10^4$	0,5	–	200
Ti-Al-Nb-Zr (TM1)	780	800	$9,6 \cdot 10^4$	22	60	360
Ti-Al-Nb-Fe-Zr (TM2)	920	1000	–	16	40	–

уровень прочности. Механические свойства этих сплавов в сравнении с другими, применяемыми в медицине, представлены в табл. 3.

При создании стоматологических, ортопедических и кардиологических протезов важно, чтобы материал не только имел оптимальное соотношение механических свойств, но и обладал высоким уровнем сопротивления переменным нагрузкам и имел высокие усталостные характеристики. Сопоставление усталостных свойств сплава TM1 с усталостными характеристиками технического титана BT1 и сплава BT6 показало, что сопротивление усталости сплава TM1 несколько ниже, чем сплава BT6, но приблизительно в 2 раза выше чем у технического титана (рис. 2).

Разработанные сплавы TM1 и TM2 прошли испытания на общую коррозию в растворах серной и соляной кислот. Испытания при комнатной температуре проводили в УкрНИИХимМаше (табл. 4).

Анализ полученных результатов показал, что скорость коррозии сплавов TM1 и TM2 в разбавленной соляной и серной кислотах на порядок ниже, чем у нелегированного титана марки BT1-0 в тех же средах. В 10%-ном растворе HCl скорость коррозии ниже, чем у нелегированного титана как минимум в 2 раза.

Кроме определения механических, усталостных и коррозионных характеристик проведены исследования структуры разработанных титановых сплавов.

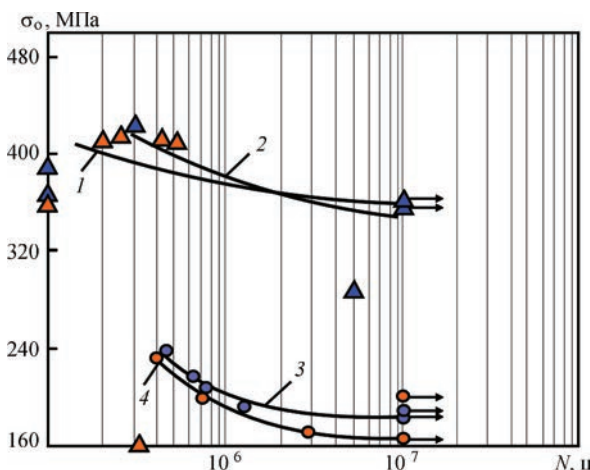


Рис. 2. Усталостные характеристики титановых сплавов TM1 (1, 2) и BT1 (3, 4)

Сплав TM1 (системы Ti-Al-Nb-Zr) относится к титановым псевдо- $\alpha$ -сплавам и является термически стабильным. Сплав после прокатки состоит из сильно деформированных, вытянутых в направлении прокатки первичных  $\beta$ -зерен. Внутренняя структура представлена колониями пластичной  $\alpha$ -фазы с различной кристаллографической ориентацией. Сплав TM2 (системы Ti-Al-Nb-Fe-Zr) можно отнести к титановым ( $\alpha + \beta$ )-сплавам мартенситного класса. В прокатанном состоянии этот сплав также имеет структуру, созданную пластинчатой  $\alpha$ -фазой, но в промежутках между  $\alpha$ -пластинами имеется  $\beta$ -фаза, количество которой зависит от режима термической обработки (рис. 3).

Разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона титановые сплавы TM1 и TM2 характеризуются высоким уровнем механических свойств, а также хорошей коррозионной стойкостью и биологической совместимостью, что позволяет широко применять их в таких областях медицины, как ортопедия и стоматология.

Также следует отметить, что сплавы TM1 и TM2 обладают хорошей свариваемостью, и это дает возможность выполнять сварные конструкции при изготовлении аппаратов и инструментов медицинского назначения.

Разработанные титановые сплавы прошли клинические испытания, на основании которых Государственной санитарной эпидемиологической службой Министерства здравоохранения Украины было выдано разрешение на применение сплавов TM1 и TM2 в медицине (заключение от 13.04.2007 № 05.03.02-04/18536, № 05.03.02-07/18539).

Таблица 4. Характеристики коррозионной стойкости титановых сплавов

Среда	Скорость коррозии, мм/год		
	TM1	TM2	BT1-0
1 % HCl	–	0,0001	0,0035
5 % HCl	0,0019	0,0002	0,0042
10 % HCl	0,0290	0,0270	0,0790
5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	0,0002	0,0039
10 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,0005	0,0005	0,0063
20 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,0005	0,0007	0,0550
Концентрат H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,140	–	1,4250

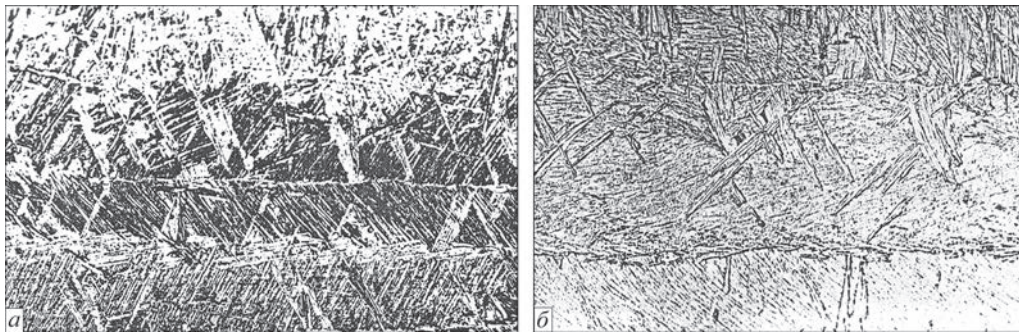


Рис. 3. Микроструктура титановых сплавов ( $\times 250$ ): а — TM1 (Ti–Al–Nb–Zr); б — TM2 (Ti–Al–Nb–Fe–Zr)

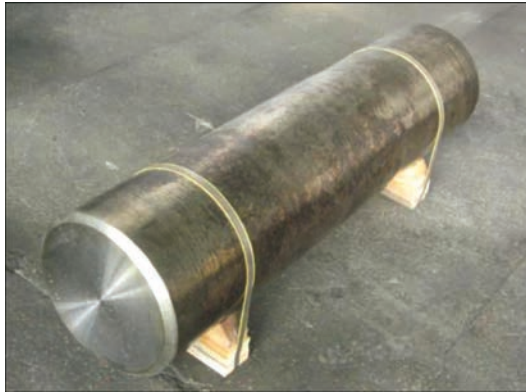


Рис. 4. Внешний вид слитка диаметром 400 мм из титанового сплава T110

Дальнейшие исследования в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины позволили создать новый перспективный сплав T110, который по технологичности, свариваемости и работоспособности в условиях циклических нагрузок превышает широко используемый в авиации сплав BT22 [3, 10]. Сплав создан на основе сырьевой базы Украины, защищен патентом Украины [11], разработаны технические условия на производство полуфабрикатов из этого сплава. Основные области применения нового сплава T110 — изготовление высоконагруженных силовых узлов авиакосмической техники, корпусов реакторов для атомной

энергетической промышленности, авиационных двигателей, специзделий, работающих в условиях импульсного высокотемпературного нагружения, а также сборных сварных элементов бронезащиты самолетов и бронесредств индивидуальной защиты личного состава. Сплав может применяться в нефтехимической промышленности при сооружении платформ по добыче нефти и газа на шельфе, создании бурового и обсадного оборудования и глубоководных аппаратов.

На производственных мощностях ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработана технология получения слитков титанового сплава T110 диаметрами от 100 до 400 мм, слитков-слябов сечением  $150 \times 540$  мм и длиной до 3000 мм.

По разработанной технологии получены слитки высокопрочного титанового сплава T110 диаметром 400 мм (рис. 4).

Исследование содержания легирующих элементов в слитке сплава T110 показало, что они равномерно распределены как по длине, так и по поперечному сечению слитка (табл. 5).

Важнейшим критерием качества титановых слитков является отсутствие в металле неметаллических включений, особенно в виде азотсодержащих альфированных частиц или нитридов титана. При переплаве титана по технологии электрон-

Таблица 5. Распределение легирующих элементов и примесей по длине слитка титанового сплава T110, полученного способом ЭЛП, мас. %

Марка сплава	Часть слитка	Место отбора пробы*	Al	Mo	V	Nb	Fe	Zr	O	N
T110	Верх	О	5,48	1,02	1,18	5,32	1,63	0,40	0,09	0,02
		С	5,52	1,01	1,41	4,91	1,61	0,35		
		П	5,57	1,06	1,40	5,02	1,60	0,33		
	Середина	О	5,45	1,02	1,50	5,45	1,58	0,37	—	—
		С	5,30	1,12	1,49	5,26	1,60	0,31		
		П	5,14	1,14	1,45	5,27	1,61	0,37		
	Низ	О	5,54	1,01	1,42	4,98	1,59	0,32	—	—
		С	5,43	1,12	1,39	4,78	1,69	0,34		
		П	5,21	1,31	1,33	4,84	1,47	0,30		
Временные ТУ			5,0...6,0	1,0...1,5	1,2...2,0	4,5...5,5	1,5...2,0	0,3...0,5	<0,15	<0,04

\*О — вблизи оси слитка; С — вблизи середины радиуса; П — в периферийной зоне (10 мм от поверхности слитка).

но-лучевой плавки с промежуточной емкостью создаются термические и физико-химические условия, обеспечивающие удаление вышеуказанных включений. В этой связи были проведены работы по изучению структуры полученных слитков. Макроструктуру изучали на поперечных темплетях, вырезанных на расстоянии 150 мм от верха и низа слитков, а также из их середины. Выявление структуры проводили травлением темплетов в 15%-ном растворе фтористой кислоты с добавлением 3%-ной азотной кислоты при комнатной температуре [12]. Установлено, что структура металла слитков титанового сплава Т110, полученных способом ЭЛП, плотная, однородная, с отсутствием различных травящихся зон по сечению слитка (рис. 5).

Существенной разницы в структуре центральной и периферийной зон слитка не наблюдали. Дефектов в виде пор, раковин, трещин и неметаллических включений не обнаружено. Характерной для слитков ВДП сегрегации легирующих элементов не выявлено [13]. Кристаллическое строение металла одинаковое по всей длине слитков и характеризуется кристаллами, близкими к равноосным по форме. Участки столбчатой структуры отсутствовали.

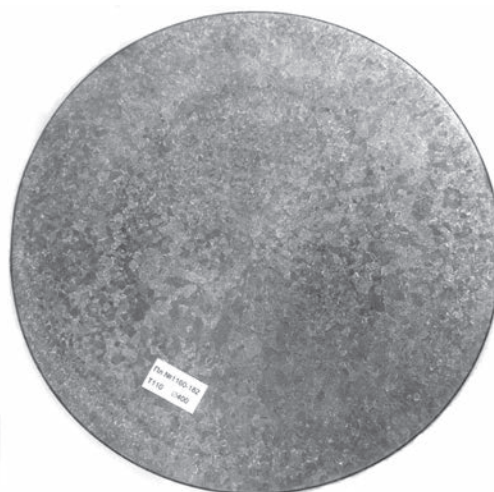


Рис. 5. Макроструктура поперечного сечения слитка диаметром 400 мм из сплава Т110

Прочность высокопрочных титановых сплавов определяется не только степенью легирования, но и параметрами обработок давлением и последующих термической или термомеханической. Однако с повышением прочности сплава, как правило, снижается его пластичность, что является существенным недостатком материала при изготовлении из него

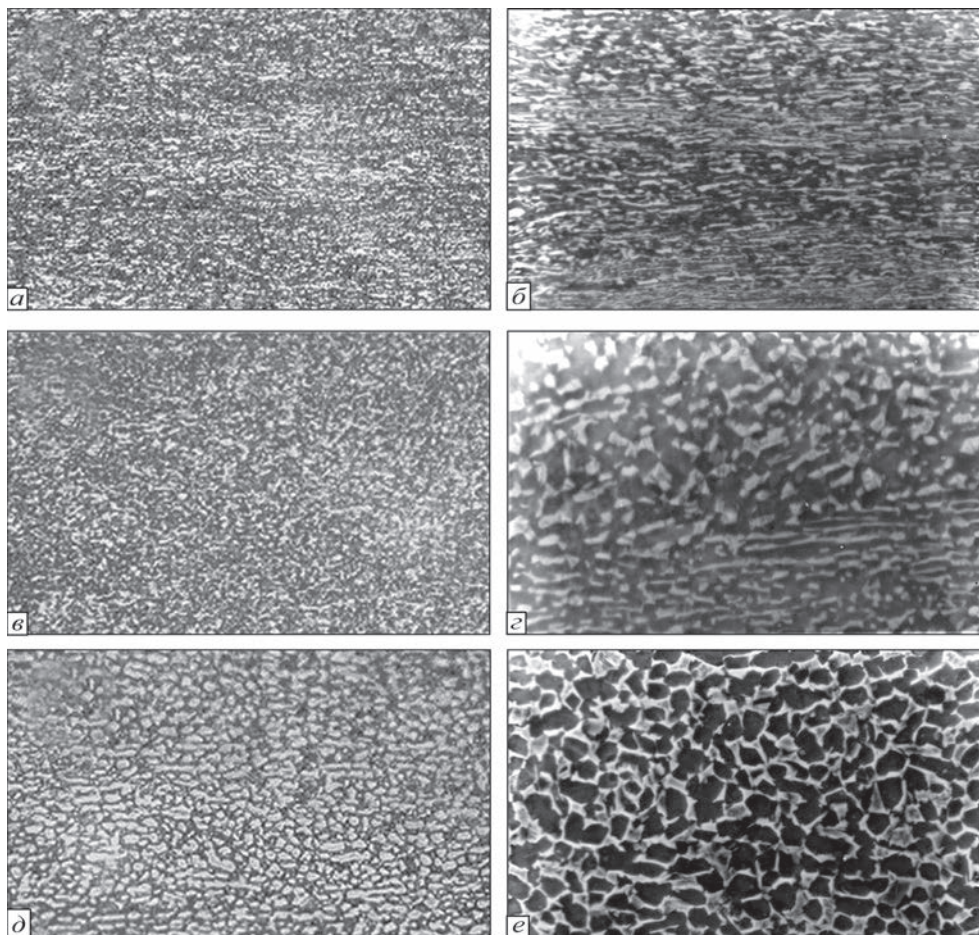


Рис. 6. Микроструктура материала образцов сплава Т110 после разных видов термической обработки: а, б — для образца № 1; в, г — № 2; д, е — № 3 (см. табл. 6); а, в, д —  $\times 500$ ; б —  $\times 1200$ ; г —  $\times 4000$ ; е —  $\times 2000$

Таблица 6. Механические свойства образцов сплава Т110 после термической обработки

Номер образца	Вид термической обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
1	Отжиг 750 °С, $\tau = 1$ ч, охлаждение с печью	1100	1060	21	50	35...39
2	Закалка 800 °С, $\tau = 1$ ч, в воду, старение 600 °С, $\tau = 3$ ч, охлаждение на воздухе	1220	1115	19	60	28...29
3	Вакуумный отжиг 850 °С, $\tau = 1$ ч	1050	992	20	53	56...58

конструкций, работающих при вибрации, повторной статике, изгибе, ударных нагрузках.

С целью изучения качества полученного металла из слитков титанового сплава Т110 методом горячей деформации были изготовлены пластины толщиной примерно 3,2...3,3 мм и площадью 150×150 мм<sup>2</sup>. Заготовки прокатывали в ( $\alpha + \beta$ )-области. Вырезанные пластины (образцы № 1–3) отжигали или подвергали упрочняющей термической обработке в двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-области при температурах 750...850 °С.

Результаты механических испытаний материала образцов, после разных видов термической обработки представлены в табл. 6.

При исследовании макроструктуры установлено, что схема термомеханической обработки, по которой изготавливали листы под образцы для испытаний, позволила получить в них продольную текстуру прокатки.

Исследования микрошлифов в продольном и поперечном направлениях показали, что микроструктура образцов после термической обработки имела глобулярную морфологию  $\alpha$ -выделений внутри зерен (рис. 6). В образцах № 1 и 2 наблюдали структурную неоднородность, связанную с частичной рекристаллизацией в процессе термической обработки. При этом в образцах сохранилась текстура деформации. В образце № 3 наблюдали более крупнозернистую, равноосную микроструктуру. Это объясняется тем, что при вакуумной термообработке в результате прохождения собирательной рекристаллизации глобуляризация выделений  $\alpha$ -фазы произошла в более полном объеме. Пластинчатых выделений практически не наблюдалось.

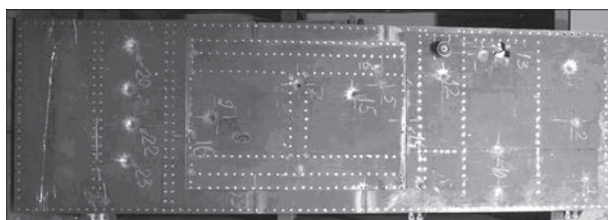


Рис. 7. Конструкция после испытаний на стойкость в условиях статического и динамического импульсно-ударного воздействия тараном и инденторами весом 7,9...8,1 и 15,6 г, диаметрами 9,0 и 10,9 мм соответственно

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о преимуществах термообработки для образцов № 1 и 2, которые позволяют получить более высокие показатели прочности сплава Т110.

Натурные испытания сопротивлению ударной импульсно-динамической нагрузке проводили на отдельном экземпляре конструкции, изготовленном по промышленной технологии. Цель испытаний заключалась в определении работоспособности конструкции в условиях статических и динамических нагрузок. Общий вид конструкции после испытаний показан на рис. 7.

В результате проведенных исследований разработан и предложен вариант конструктивно-технологического решения, обеспечившего необходимую стойкость материалов и конструкции в условиях высокоимпульсных ударных нагрузок.

Одним из важных преимуществ сплава Т110 является его хорошая свариваемость. При этом свойства сварных соединений практически не зависят от термического цикла сваривания, что позволяет использовать в производстве различные модификации дуговой сварки в среде аргона и сварки электронным лучом.

В настоящее время во всем мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли высоко-



Рис. 8. Внешний вид слитков диаметром 150 мм сплава Т110

Таблица 7. Химический состав нового титанового сплава Т120, мас. %

Место отбора проб		Al	V	Mo	Nb	Zr	Fe	Cr	Ti
Верх	Центр	4,8	2,2	2,9	4,3	2,4	0,9	1,3	Основа
	Край	5,0	2,3	2,8	4,2	2,6	0,8	1,0	→→
Середина	Центр	5,3	→→	→→	→→	→→	1,0	1,1	→→
	Край	5,4	2,5	2,9	4,1	2,7	1,1	1,2	→→
Низ	Центр	5,1	2,7	2,7	4,0	→→	1,0	1,3	→→
	Край	5,0	2,6	→→	4,1	2,6	1,2	→→	→→
Техническое задание		4,5...5,5	1,5...2,5	2,5...3,0	3,5...4,5	2,3...3,0	0,7...1,2	1,0...1,5	→→

прочных материалов, которые обеспечивают высокий комплекс механических и эксплуатационных свойств и при этом хорошо свариваются. В связи с этим в ИЭС им. Е.О. Патона проведены работы по разработке высокопрочного титанового сплава на основе 8-ми компонентной системы легирования [14], а также технологии получения слитков нового высокопрочного титанового сплава Т120 способом электронно-лучевой плавки. Полученные слитки диаметром 150 мм нового высокопрочного титанового сплава Т120 характеризуются высокой однородностью как по длине, так и по их поперечному сечению (рис. 8, табл. 7).

Для измельчения исходной литой структуры за счет процессов рекристаллизации, улучшения химической однородности материала, а также устранения дефектов, возникающих при металлургическом производстве литых слитков, используют традиционные способы обработки давлением — ковку, прокатку, экструзию [15]. Использование прокатки позволяет получать листы, которые можно сваривать.

С целью определения режимов термомеханической обработки, изучения механических свойств нового высокопрочного титанового сплава Т120 обработанные слитки подвергали горячей деформационной обработке на реверсивном прокатном дуо стане Skoda 355/500. Нагрев загото-

вок осуществляли в электропечах сопротивления мощностью от 50 до 70 кВт.

Деформационная обработка заготовок из экспериментальных сплавов типа Т120 осуществляли по следующим технологическим режимам: нагрев в печи до температуры 1050 °С без применения защитной атмосферы и защитных покрытий с выдержкой в течение 1 ч; прокат поперек оси слитка от 145 до приблизительно 200 мм (рис. 9, а); деформация за один проход — 5 мм; температура окончания проката — не менее 850 °С; при достижении размера примерно 200 мм заготовку поворачивали на 90° (рис. 9, б) и производили ее докатку с промежуточными подогревами до достижения степени деформации заготовки около 60 %; нагрев заготовок в печи до температуры 960 °С с выдержкой 0,5 ч; «чистовая» докатка заготовок до толщин 8, 10, 13, 15 мм; деформация заготовки за один проход — 2...3 мм. В дальнейшем проводили рихтовку на гидравлическом прессе с целью устранения прогибов.

Остывание заготовок осуществляли на воздухе до температуры окружающей среды. Размер прокатанной заготовки по длине составлял более 450 мм, что позволило вырезать из одной заготовки две чистовые пластины.

Прокатанные заготовки были подвергнуты пескоструйной обработке с целью устранения

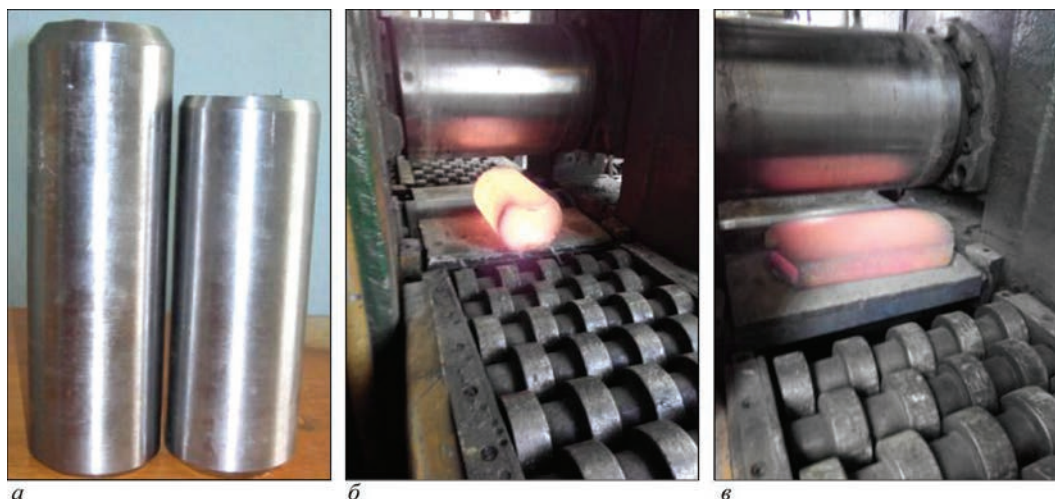


Рис. 9. Исходные заготовки диаметром 145 мм сплава Т120 (а), процесс деформации в продольном (б) и поперечном (в) направлениях

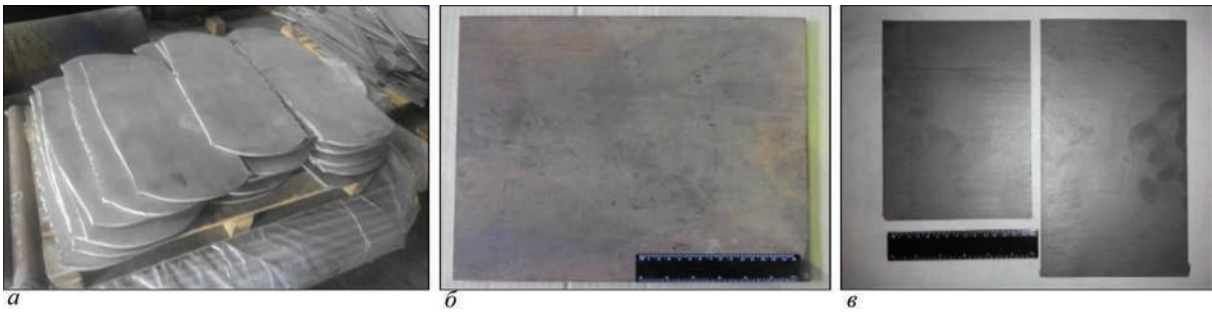


Рис. 10. Экспериментальная партия пластин из сплава титана Т120 (а), готовые пластины размерами 25×300×15 мм (б), 150×250×8 мм и 150×300×10 мм (в)

окисленного слоя. Получена экспериментальная партия пластин из сплава титана Т120 (рис. 10, а). Порезку в готовый размер производили на строгальном станке. Выход годного готовых пластин из заготовок после проведенной пластической деформации составил около 70 % (рис. 10, б, в).

Исследования микроструктуры проводили на поперечных и продольных микрошлифах, вырезанных из деформированных заготовок, с помощью оптического микроскопа «NEOFOT-30», оснащенного приставкой для цифрового фотографирования. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) определяли структурные составляющие по размерам и составу на приборе JSM-840. Определение микротвердости осуществляли на приборе М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 100 г.

Проведенные исследования микроструктур титанового сплава Т120 показали, что после прокатки при температурах, соответствующих области

существования  $\beta$ -области, сплав Т120 состоял из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен размером 150...200 мкм (рис. 11, а). Внутризеренная структура была представлена  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, причем  $\alpha$ -фаза имела пластинчатую морфологию с толщиной пластин около 0,5 мкм (рис. 11, б). В структуре сплава встречались участки с нераспавшейся  $\beta$ -фазой — т. н. « $\beta$ -пятна» (рис. 11, в). В некоторых местах по границам зерен зафиксированы неметаллические выделения (рис. 11, г).

Микроструктура деформированных заготовок экспериментального титанового сплава Т120 имела удовлетворительную однородность по сечению образца. Обнаружены равноосные ( $\alpha+\beta$ )-зерна размерами 240...360 мкм, что соответствует 2...3 баллам [16]. Твердость по Виккерсу составляла 4750...5170 МПа.

Для стабилизации структуры и снятия остаточных напряжений после прокатки сплав Т120 подвергали отжигу при температурах 800, 850 и 900 °С.

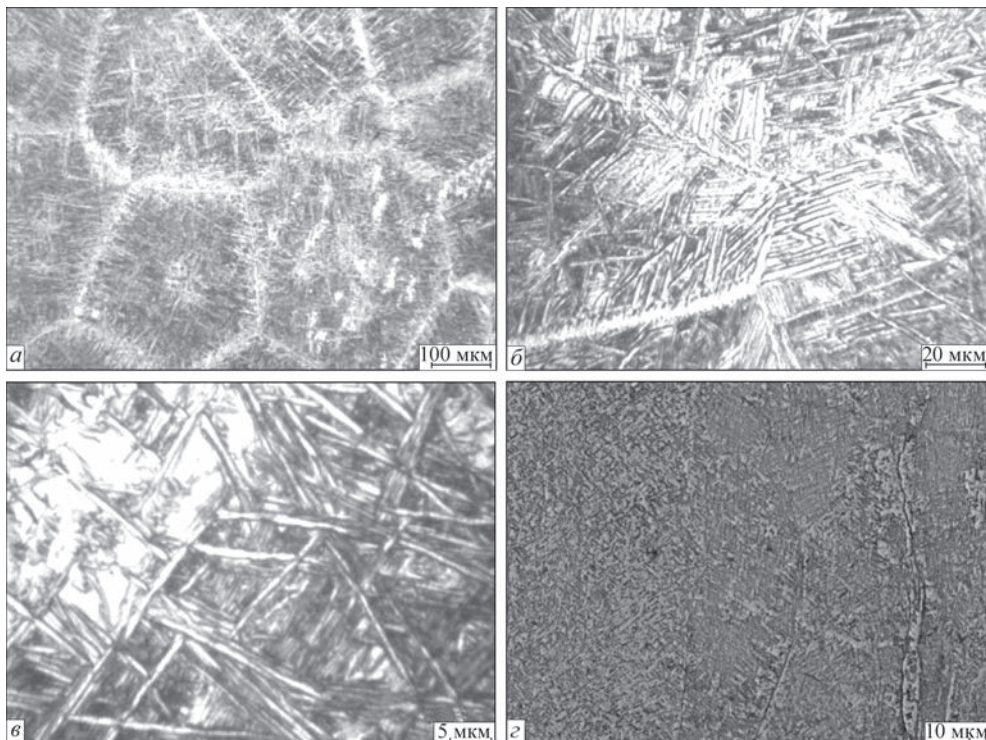


Рис. 11. Микроструктура сплава Т120 после горячей деформационной обработки (а–г — см. в тексте)



Таблица 8. Механические свойства деформированного титанового сплава Т120

Номер образца	Вид термообработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
1	Отжиг 800 °С, 1 ч	1317,8	1262,3	2,7	12,9	6,7
2	Отжиг 850 °С, 1 ч	1214,9	1089,2	10,0	18,5	9,0
3	Отжиг 900 °С, 1 ч	1186,0	1123,6	13,3	19,0	13,5

Механические свойства определяли при нормальной температуре на образцах, которые вырезали из металла после деформационной, а также соответствующей термической обработок. Механические свойства сложнолегированного титанового сплава Т120 после проведенных термических обработок приведены в табл. 8.

Как видно из таблицы, наилучшее сочетание механических свойств для деформированного сплава Т120 обеспечивает отжиг при температуре 850 °С в течение 1 ч. При этом предел прочности созданного сложнолегированного ( $\alpha + \beta$ )-титанового сплава Т120 составляет не менее 1200 МПа. На сплав Т120 получен патент Украины [17].

### Выводы

1. В ИЭС им. Е.О. Патона проведены работы по созданию новых титановых сплавов с улучшенными эксплуатационными свойствами по отношению к существующим сплавам.

2. Разработан сплав СП15, который помимо применения в качестве присадочного материала при сварке высокопрочных титановых сплавов может применяться и для производства высоконагруженных изделий, используемых в агрессивных средах (морская вода, растворы кислот и т.п.).

3. Разработаны сплавы медицинского назначения, рассчитанные на различный уровень прочности. Показано, что разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона титановые сплавы ТМ1 и ТМ2 характеризуются высоким уровнем механических свойств, а также хорошей коррозионной стойкостью и биологической совместимостью, что позволяет широко применять их в таких областях медицины, как ортопедия и стоматология.

4. Одним из перспективных сплавов, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, является сплав Т110, который по технологичности, свариваемости (все виды сварки) и работоспособности в условиях циклических нагрузок превышает широко используемый в авиации сплав ВТ22.

5. Проведен комплекс работ по созданию сложнолегированного ( $\alpha+\beta$ )-титанового сплава Т120, который обеспечил высокие показатели механических и эксплуатационных свойств и хорошей свариваемости.

6. Таким образом, в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины накоплен большой опыт по разработке новых титановых сплавов для нужд отечественной промышленности, медицины и оборонного сектора. Ведутся дальнейшие работы по усовершенствованию существующих и разработке новых сплавов титана, технологий их выплавки и обработки.

### Список литературы

- Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю. (2011) Перспективы разработки новых титановых сплавов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. «Машиностроение»*, **S2**, 60–67.
- Хореев А.И., Хореев М.А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, **7**, 25–34.
- Антонюк С.Л., Моляр А.Г., Калинин А.Н. и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–14.
- Замков В.Н., Топольский В.Ф., Тяпко И.К. (1996) Проволока для сварки титановых ( $\alpha+\beta$ )-сплавов. *Автоматическая сварка*, **7**, 51–52.
- Белоус В.Ю., Замков В.Н., Петриченко И.К. и др. (2003) Присадочная проволока для сварки титанового сплава ВТ23 в узкий зазор. *Там же*, **5**, 50–52.
- Замков В.Н., Топольский В.Ф., Тяпко И.К. и др. (1993) Термически упрочняемый коррозионностойкий титановый сплав СП15. *Там же*, **8**, 32–34.
- Mutsuo Niinomi (2007) Titanium alloys for biomedical, dental and healthcare application. *Proc. of the 11th World Conf. on Titanium, 3–7 June 2007 Kyoto, Japan*. The Japan Inst. of Metals, pp. 1417–1424.
- Патон Б.Е., Замков В.Н., Топольский В.Ф. (1995) *Термически стабильный высококоррозионностойкий титановый сплав*. Украина, Пат. № 7386.
- Патон Б.Е., Замков В.Н., Топольский В.Ф. (1996) *Термически упрочняемый коррозионностойкий титановый сплав*. Украина, Пат. № 7385.
- Моляр А.Г., Коцюба А.А., Бычков А.С. и др. (2015) *Конструкционные материалы в самолетостроении*. Киев, КВИЦ.
- Замков В.Н., Топольский В.Ф., Тригуб Н.П., Петриченко И.К. и др. (2001) *Высокопрочный титановый сплав*. Украина, Пат. 40087 С22С14/00.
- Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. (1989) *Структура и коррозия металлов и сплавов: атлас*. Москва, Металлургия.
- Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
- Ахонин С.В., Селин Р.В., Березос В.А. и др. (2016) Разработка нового высокопрочного титанового сплава. *Современная электрометаллургия*, **4**, 22–27.
- Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС–МАТИ.

16. (1983) *ГОСТ 5639–82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.*
17. Ахонін С.В., Березос В.О., Білоус В.Ю. та ін. (2016) *Високоміцний титановий сплав.* Україна, Пат. 111002, МПК C22C 14/00 C22B 34/12.

References

1. Antashev, V.G., Nochovnaya, N.A., Shiryaev, A.A., Izotova, A.Yu. (2011) Perspectives of development of new titanium alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman, Ser. Mashinostroenie*, **S2**, 60–67 [in Russian].
2. Khoreev, A.I., Khoreev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and perspectives of development. *Materialovedenie*, **7**, 25–34 [in Russian].
3. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N. et al. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Advances in Elektrometall.*, **1**, 9–12 [in Russian].
4. Zamkov, V.N., Topolsky, V.F., Tyapko, I.K. (1996) Wire for welding of titanium ( $\alpha+\beta$ )-alloys. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 51–52 [in Russian].
5. Belous, V.Yu., Zamkov, V.N., Petrichenko, I.K., Topolsky, V.F. (2003) Filler wire for narrow-gap welding of titanium alloy VT23. *The Paton Welding J.*, **5**, 46–48.
6. Zamkov, V.N., Topolsky, V.F., Tyapko, I.K. et al. (1993) Heat-treatable corrosion-resistant titanium alloy SP15. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 32–34 [in Russian].
7. Mutsuo Niinomi (2007) Titanium alloys for biomedical, dental and healthcare application. In: *Proc. of the 11th World Conf. on Titanium (3–7 June, Kyoto, Japan)*. The Japan Inst. of Metals, 1417–1424.
8. Paton, B.E., Zamkov, V.N., Topolsky, V.F. (1995) *Thermally stable high corrosion-resistant titanium alloy.* Ukraine Pat. 7386 [in Russian].
9. Paton, B.E., Zamkov, V.N., Topolsky, V.F. (1996) *Heat-treatable corrosion-resistant titanium alloy.* Ukraine Pat. 7385 [in Russian].
10. Molyar, A.G., Kotsyuba, A.A., Bychkov, A.S. et al. (2015) *Structural materials in aircraft construction.* Kiev, KVITs [in Russian].
11. Zamkov, V.N., Topolsky, V.F., Trigub, N.P., Petrichenko, I.K. et al. (2001) *High-strength titanium alloy.* Pat. UA 40087 C22C14/00 Ukraine [in Russian].
12. Sokol, I.Ya., Ulyanin, E.A., Feldgandler, E.G. et al. (1989) *Structure and corrosion of metals and alloys: Atlas.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
13. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bocharov, G.A. et al. (1979) *Semiproducts from titanium alloys.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
14. Akhonin, S.V., Selin, R.V., Berezos, V.A. et al. (2016) Development of new high-strength titanium alloy. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 22–27 [in Russian].
15. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties.* Moscow, VILS-MA-TI [in Russian].
16. (1983) *ГОСТ 5639–82: Steels and alloys. Methods of identification and definition of grain size* [in Russian].
17. Akhonin, S.V., Berezos, V.O., Bilous, V.Yu. et al. (2016) *High-strength titanium alloy.* Ukraine Pat. 111002, Int. Cl. C22C 14/00 C22B 34/12. PWI.

НОВІ ПЕРСПЕКТИВНІ СПЛАВИ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

С.В. Ахонін, В.О. Березос, В.Ю. Білоус

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено роботи по створенню нових титанових сплавів з поліпшеними експлуатаційними властивостями. Розроблено сплави: СП15, який може застосовуватися для виробництва високонавантажених виробів, використовуваних в агресивних середовищах; ТМ1 та ТМ2 — сплави медичного призначення, розраховані на різний рівень міцності; Т110 — сплав, який по технологічності, зварюваності та працездатності в умовах циклічних навантажень перевищує широко використовуваний в авіації сплав ВТ22; Т120 — складнолегований ( $\alpha + \beta$ )-титановий сплав з високим комплексом механічних і експлуатаційних властивостей і при цьому добре зварюється. Бібліогр. 17, табл. 8, рис. 11.

*Ключові слова:* титанові сплави; електронно-променева плавка; зливок; хімічний склад; деформація; напівфабрикати; структура; механічні властивості

NEW PROMISING TITANIUM-BASED ALLOYS

S.V. Akhonin, V.A. Berezos, V.Yu. Belous

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Work has been performed on development of new titanium alloys with improved service properties. The following alloys were developed: SP15, which can be applied for manufacturing heavy-duty parts, used in aggressive media; TM1 and TM2 are alloys for medical applications, designed for different strength levels; T110 is an alloy which in terms of adaptability to fabrication, weldability and performance under the conditions of cyclic loads exceeds the widely used in aviation VT22 alloy; T120 is a complex ( $\alpha + \beta$ )-titanium alloy with a set of high mechanical and service properties, which is also readily weldable. Ref. 17, Tabl. 8, Fig. 11.

*Key words:* titanium alloys; electron beam melting; ingot; chemical composition; deformation; semi-finished products; structure; mechanical properties

Поступила в редакцію 08.04.2019