

РАЗРАБОТКА НОВОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА

С. В. Ахонин¹, Р. В. Селин¹, В. А. Березос¹,
А. Н. Пикулин¹, А. Ю. Северин¹, А. Г. Ерохин²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».

03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

В настоящее время во всем мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли высокопрочных титановых материалов, сварные соединения которых обеспечивают высокий комплекс механических и эксплуатационных свойств. При этом отсутствуют титановые сплавы с прочностью ≥ 1200 МПа, удовлетворительной пластичностью и хорошей свариваемостью в отожженном состоянии. Создание нового высокопрочного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава с такими характеристиками значительно расширит номенклатуру деталей ответственного назначения для военной, авиационной, космической и других отраслей промышленности. Наиболее перспективным направлением повышения конструкционной прочности при разработке высокопрочных сложнолегированных титановых сплавов является комплексное легирование. В ходе работы, базируясь на результатах расчетов и проведенных экспериментов по определению механических характеристик, разработан новый высокопрочный сложнолегированный ($\alpha + \beta$)-титановый сплав Т120 на основе восьмикомпонентной системы легирования Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr с пределом прочности не менее 1200 МПа. Новый высокопрочный сложнолегированный ($\alpha + \beta$)-титановый сплав Т120 защищен патентом Украины. Библиогр. 14, табл. 4, ил. 1.

Ключевые слова: титановый сплав; легирующие элементы; предел прочности; структура; электронно-лучевая плавка; химический состав; механические свойства

Дальнейшее развитие авиакосмической техники и транспортного машиностроения в значительной мере связано с повышением эксплуатационных характеристик используемых конструкционных материалов. Это в полной мере относится и к сплавам на основе титана, что обуславливает необходимость проведения исследовательских работ по созданию новых титановых сплавов с улучшенным комплексом механических свойств, в частности, повышенной прочностью и хорошей свариваемостью.

В последние годы в ведущих материаловедческих центрах США, Китая, России и Японии создана целая серия новых титановых сплавов с повышенными эксплуатационными свойствами. Так, например, в США создан высокопрочный титановый сплав Ti-575 (Ti–5Al–7V), в России (ВИАМ) — новый конструкционный сплав ВТ43 (Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Nb–Zr–Cu) и жаропрочный сплав ВТ41 (Ti–Al–Sn–Zr–Mo–Si), а специалистами ВСМПО разработан и начато производство нового российского β -сплава 55531 (Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr–1Zr) с уровнем прочности 1100 МПа. Эксплуатационные свойства этих сплавов превышают характеристики своих аналогов на 10...30 %. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработан

отечественный сплав на основе титана – новый высокопрочный конструкционный сплав Т110 системы легирования Ti–Al–Mo–Nb–Fe–Zr, который в отожженном состоянии имеет прочность ≥ 1100 МПа при высоких показателях пластичности $\delta \geq 18$, $\psi \geq 50$ %; $KCV \geq 40$ Дж/см² и хорошую свариваемость.

Титан может находиться в двух аллотропических модификациях: низкотемпературной (α -), имеющей гексагональную плотноупакованную решетку (ГПУ), и высокотемпературной (β -) с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК). Для получения необходимых механических и физико-химических свойств титан традиционно легируют алюминием, молибденом, ванадием, марганцем, хромом, оловом, железом, цирконием, ниобием, кремнием и другими элементами. При этом легирующие элементы также как и примесные, изменяют температуру полиморфного $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения и, соответственно, повышают стабильность α - или β -фазы. К элементам, стабилизирующим α -фазу титана, относятся: алюминий, в меньшей степени олово и цирконий, а также примеси — азот, кислород и углерод; α -стабилизаторы упрочняют титан, образуя твердый раствор с α -модификацией титана (рис. 1, а). В свою оче-

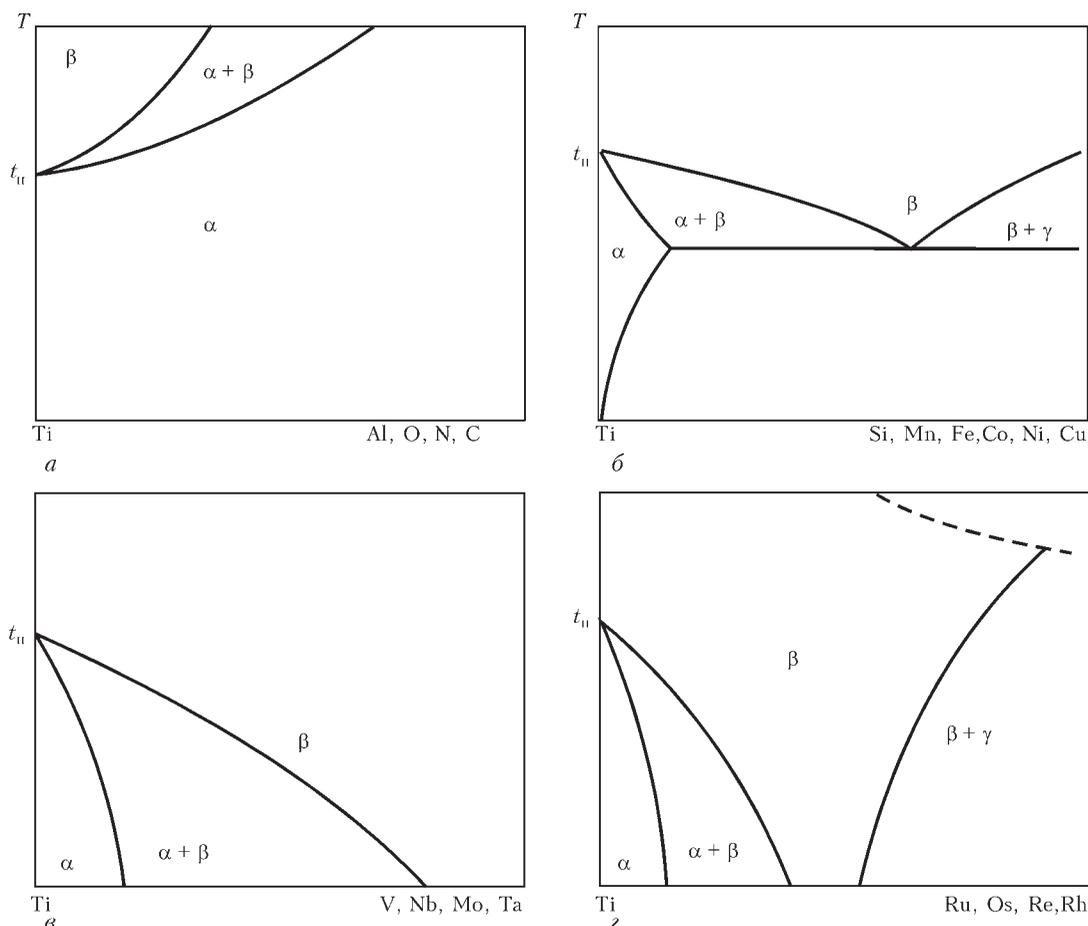


Рис. 1. Влияние легирующих элементов на температуру полиморфного превращения титана [2]

редь β -стабилизаторы — элементы, понижающие температуру $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения. К ним относятся молибден, хром, ванадий, ниобий, железо, медь и другие металлы (из примесей — водород). По структуре титановые сплавы условно делятся на три группы: сплавы с α -, $(\alpha + \beta)$ - и β -структурой и при этом в структуре каждой группы могут присутствовать интерметаллидные фазы.

Следует иметь в виду, что упрочнение титана путем легирования приводит к снижению его пластичности [1], а увеличение количества компонентов сплава затрудняет перераспределение легирующих элементов между фазами [2], что повышает вероятность перехода к бездиффузионному механизму фазового превращения и увеличивает дисперсность фазовых составляющих [3].

К высокопрочным сложнoleгированным промышленным сплавам титана относятся сплавы с пределом прочности ≥ 1000 МПа. Большинство из них представляют собой двухфазные $(\alpha + \beta)$ -сплавы. Они состоят из α - и β -твердых растворов и содержат, кроме алюминия, некоторое количество β -стабилизаторов, которые можно разбить на три подгруппы. В сплавах титана с элементами первой подгруппы при достаточно низкой температуре происходит эвтектоидный распад

β -фазы ($\beta \rightarrow \alpha + \gamma$) (рис. 1, б). К числу таких элементов относятся кремний, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь и их называют эвтектоидообразующими β -стабилизаторами. В сплавах титана с элементами второй подгруппы при достаточно высокой их концентрации β -раствор сохраняется до комнатной температуры, не претерпевая эвтектоидного распада при закалке (рис. 1, в). К числу этих элементов принадлежат ванадий, молибден, ниобий, тантал, вольфрам. Поскольку они образуют непрерывные растворы с β -титаном, их называют β -изоморфными элементами. В сплавах третьей подгруппы равновесная β -фаза также стабилизируется при комнатной температуре, но непрерывных β -твердых растворов не образуется (рис. 1, з), так как не соблюдается принцип изоморфности взаимодействующих элементов. В эту подгруппу входят рений, рутений, родий, осмий, иридий. Их можно назвать квазиизоморфными β -стабилизаторами.

Основное преимущество $(\alpha + \beta)$ -сплавов заключается в том, что высокий уровень их служебных и эксплуатационных характеристик достигается за счет совместного влияния как легирования, так и термической обработки. Их упрочнение с помощью термической обработки заключается в фиксации

закалкой метастабильных фаз и последующего их распада при искусственном старении с выделением дисперсных α - и β -фаз. Эффективность упрочнения сплава зависит от типа, количества и состава метастабильных фаз и дисперсности образовавшихся после старения частиц α - и β -фаз.

В настоящее время во всем мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли высокопрочных титановых материалов, сварные соединения которых обладают комплексом высоких механических и эксплуатационных свойств. При этом отсутствуют титановые сплавы с прочностью ≥ 1200 МПа в отожженном состоянии, удовлетворительной пластичностью и хорошей свариваемостью. Создание нового высокопрочного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава с пределом прочности > 1200 МПа, удовлетворительными показателями пластичности и хорошей свариваемостью позволит значительно расширить номенклатуру деталей ответственного назначения в военной, авиационной, космической и других отраслях промышленности.

Наиболее перспективным направлением повышения конструкционной прочности при разработке высокопрочных сложнолегированных титановых сплавов является комплексное легирование, которое взято за основу при разработке новых сплавов [4]. При комплексном легировании упрочняют α - и β -твердые растворы таким образом, чтобы разница в их характеристиках прочности была минимальна. Это способствует снижению неравномерности деформации и более полной реализации прочности α - и β -фаз, а также уменьшению действий острых пластинчатых структурных элементов как концентраторов напряжения [5, 6].

Следует отметить, что коэффициент распределения в титане изоморфного β -стабилизирующего элемента — молибдена больше единицы, ванадия близок к единице, тогда как коэффициент распределения эвтектоидообразующих легирующих элементов — хрома и железа меньше единицы. Учитывая распределение легирующих элементов, а также условия предотвращения эвтектоидного распада, рекомендуется осуществлять легирование при соотношении количества изоморфных и эвтектоидообразующих легирующих элементов, выраженных в величинах, эквивалентных содержанию молибдена. По возрастающему влиянию на улучшение механических свойств сплавов и их сварных соединений β -стабилизирующие элементы можно расположить в следующей последовательности: Cr, Fe, Cr + Fe, Mn, V + Fe, Mo, Mo + Fe, Mo + V, Mo + Cr, Mo + V + Cr + Fe [7].

Для расчета прочности нового сплава использовали формулу [8]:

$$\sigma_B = 235 + 60[Al]_{\text{экв.}} + 50[Mo]_{\text{экв.}}, \quad (2)$$

где $[Al]_{\text{экв.}} = \% Al + \% Sn/2 + \% Zr/3 + 3,8$ — эквивалентная концентрация α -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей по отношению к алюминию; $[Mo]_{\text{экв.}} = \% Mo + \% V/1,7 + \% Cr/0,8 + \% Fe/0,7 + \% Nb/3,3$ — эквивалентная концентрация β -стабилизаторов по отношению к молибдену.

Данная формула дает значение близкое к реальной прочности большинства α - и ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов в отожженном состоянии.

Выбор системы легирующих элементов проводили с учетом следующих факторов.

Алюминий является основным легирующим элементом в титановых сплавах, который значительно упрочняет α -твердый раствор и также эффективно упрочняет β -твердый раствор. Легирование этим элементом придает титановым сплавам повышенное сопротивление ползучести. При этом добавка до 3 % алюминия практически не изменяет микроструктуру металла, а дальнейшее увеличение содержания его в сплаве приводит к образованию крупноигльчатой структуры и, соответственно, снижению пластичности. Показатели поперечного сужения и удлинения сплавов, содержащих до 7 % алюминия, остаются на довольно высоком уровне. Превышение этого содержания приводит к потере сплавом термической стабильности, а также негативно влияет на пластические свойства в результате образования интерметаллидных фаз. Алюминий также повышает модули упругости титана и вместе с нейтральными упрочнителями замедляет образование ω -фазы при закалке и старении, которая ухудшает пластические свойства.

Цирконий выполняет функцию микролегирующего элемента. Не изменяет механические свойства фазовых составляющих, но меняет их морфологию, особенно улучшается состояние металла, который подвергается влиянию термического цикла сварки. Свойства основного металла и сварных соединений, содержащих цирконий, близкие по значениям друг с другом. Как и алюминий, цирконий замедляет образование ω -фазы при закалке и старении. Кроме этого цирконий, как нейтральный упрочнитель, уменьшает негативное влияние газовых примесей (кислорода), а также способствует образованию более мелкозернистой структуры. Цирконий имеет коэффициент распределения между α - и β -фазами равный 0,81. Целесообразно вводить цирконий в сплав в количестве, не превышающем 3,0 мас. %.

Ванадий — упрочнитель, относящийся к β -стабилизирующим элементам, имеет узкий интервал кристаллизации и коэффициент распределения

Таблица 1. Химический состав высокопрочного титанового сплава системы легирования Ti-Al-Mo-V-Nb-Cr-Fe-Zr, мас. %

Ti	Al	Nb	Zr	Fe	Mo	V	Cr	σ_b , МПа
Основа	5	4	2,5	1	3	2	1	1278,5

Таблица 2. Химический состав опытных сплавов, мас. %

Номер слитка	Ti	Al	Nb	Zr	Fe	Mo	V	Cr	[Mo] _{экв.}	[Al] _{экв. проч.}	[Mo] _{экв. изом./ [Mo]_{экв. эвтек.}}	σ_b , МПа
1	Основа	4,1	3,2	2,0	0,5	2,0	1,0	0,5	5,7	8,4	1,2	1024
2	«	4,5	4,5	2,3	1,2	2,5	2,5	0,7	10	8,8	1,22	1263
3	«	5,0	4,0	2,6	1,0	3,5	2,0	1	10,3	9,4	1,34	1314
4	«	5,5	3,5	3,0	0,7	3,5	1,8	1,2	7,6	9,8	1,46	1203

равный 0,95. Ванадий один из немногих легирующих элементов, который повышает не только прочность, но и пластичность титана. При содержании в сплаве до 2,5 мас. % ванадий растворим в α -титане и увеличивает пластичность сварного соединения, а сверх 2,5 мас. % понижает пластичность сплава и его сварных соединений. Кроме этого, ванадий усложняет образование интерметаллидных фаз.

Ниобий является слабым β -стабилизирующим упрочнителем, имеет узкий интервал кристаллизации, коэффициент распределения — 1,18, атомный радиус практически одинаковый с титаном. При содержании его в сплаве до 4 мас. % растворимый в α -титане, а растворимость железа в α -титане повышает до 1 %. Легирование ниобием приводит к повышению ударной вязкости основного металла и сварных соединений как в отожженном, так и в упрочненном состояниях.

Молибден — сильный изоморфный β -стабилизирующий упрочнитель. Повышает стабильность сплавов, содержащих хром и железо. При содержании 3 мас. % молибдена не образуются соединения титана с хромом (до 1,8 % Cr) и железом (до 1,2 % Fe) даже при очень длинной выдержке при температуре эвтектоидного распада. Свыше 3 мас. % молибдена значительно увеличивается неоднородность распределения и приводит к образованию прослоек по границам зерен. Коэффициент распределения молибдена между α - и β -фазами составляет 1,67.

Железо — самый сильный β -стабилизирующий упрочнитель с коэффициентом распределения между α - и β -фазами равном 0,35. Относится к наиболее дешевым легирующим элементам в титане, поэтому его введение в сплав экономически оправдано. Пластические свойства сплава при содержании железа до 2,5 мас. % остаются высокими. При введении более 2,5 мас. % железа возмож-

но образование интерметаллидных соединений, а также ω -фазы, что приводит к снижению пластичности. Кроме этого, ухудшается технологическая пластичность при горячей обработке давлением.

Хром — сильный эвтектоидообразующий β -стабилизирующий упрочнитель. Имеет коэффициент распределения между α - и β -фазами 0,58. Как и железо повышает прочность титанового сплава как в отожженном состоянии, так и после термического упрочнения. Основной недостаток эвтектоидообразующих легирующих элементов — эвтектоидный распад β -фазы при повышенных температурах, сопровождающийся выделением интерметаллидных соединений (в сплавах с хромом — это $TiCr_2$) или ω -фазы, которые приводят к потере пластичности. Содержание хрома в сплаве должно находиться до 1,2 мас. %, при котором эвтектоидное превращение происходит медленно и его влияние на физико-механические свойства незначительно [9–11].

С учетом коэффициентов распределения (для расчетов взяты 70 % от коэффициентов распределения двухфазных систем Ti-X), чтобы иметь однородное упрочнение как самого сплава, так и сварных швов и учитывая расчетную прочность σ_b не менее 1200 МПа, выбрана система легирования Ti-Al-Mo-V-Nb-Cr-Fe-Zr и определено содержание легирующих элементов экспериментально (табл. 1).

Таблица 3. Механические свойства опытных сплавов после отжига

Номер слитка	σ_b , МПа	σ_r , МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²
1	1010	910	15	18	21
2	1220	1170	8	13	15
3	1190	1140	10	16	16
4	1160	1110	12	23	18

Таблица 4. Химический состав титанового сплава марки Т120, мас. %

Легирование	Al	Mo	V	Nb	Cr	Fe	Zr	Ti
min	4,5	2,5	1,5	3,5	1,0	0,7	2,3	Основа
max	5,5	3,0	2,5	4,5	1,5	1,2	3,0	

Для экспериментальной проверки заявленных характеристик титанового сплава в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью выплавлены 4 слитка диаметром 80 мм, химический состав которых приведен в табл. 2.

Из слитков прокатаны пластины толщиной 8 мм, которые подвергли стандартному промышленному отжигу. Механические свойства этих пластин приведены в табл. 3.

При одном и том же уровне эквивалента по молибдену прочностные свойства сплавов выше при большем $[Al]_{экр.}$ [12], а пластичность и технологичность несколько ниже, но остаются на удовлетворительном уровне при $[Al]_{экр. прочн.} < 10\%$ [13]. Исходя из проведенных расчетов для выбранной системы легирования с целью получения оптимального соотношения прочности и пластичности необходимо соблюдать следующие условия: $[Mo]_{экр.}$ находится в пределах 7,5...11,8 мас. %; $[Al]_{экр.}$ — 8,9...9,8 мас. %; $[Mo]_{экр. изом. \beta-стаб.} / [Mo]_{экр. \text{эвтект.} \beta-стаб.}$ — 1,2...2,1 мас. %, где $[Mo]_{экр. изом. \beta-стаб.}$ и $[Mo]_{экр. \text{эвтект.} \beta-стаб.}$ — эквивалентные концентрации изоморфных и эвтектоидообразующих β -стабилизаторов по отношению к молибдену соответственно.

При неисполнении приведенных условий по $[Mo]_{экр.}$, $[Al]_{экр.}$, а также соотношения изоморфных β -стабилизаторов к эвтектоидообразующим, приведенных в эквивалентных единицах, сплавам присуща высокая пластичность при низкой прочности или высокая прочность при низкой пластичности, что подтверждается экспериментальными данными (табл. 2, 3).

Анализ влияния каждого легирующего элемента на прочностные и пластические характеристики сплава позволил определить минимальное и максимальное содержание каждого легирующего элемента, обеспечивающее предел прочности не менее 1200 МПа в условиях приемлемого уровня пластических характеристик ($\delta \geq 12\%$). При этом ликвация элементов не ухудшает характеристику прочности сплава, что положительно влияет на сварные соединения.

Таким образом, базируясь на результатах расчетов и проведенных экспериментов по определению механических характеристик, разработан новый высокопрочный сложнолегированный ($\alpha + \beta$)-титановый сплав Т120 на основе восьмикомпонентной системы легирования Ti–Al–

Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr с пределом прочности не менее 1200 МПа (табл. 4).

На новый высокопрочный сложнолегированный ($\alpha + \beta$)-титановый сплав Т120 получен патент Украины [14].

Выводы

1. На основе метода комплексного легирования разработан новый высокопрочный сложнолегированный ($\alpha + \beta$)-титановый сплав Т120 на основе восьмикомпонентной системы легирования Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr с пределом прочности не менее 1200 МПа, на который выдан патент Украины.

2. Комплекс проведенных исследований показал, что при одном и том же уровне эквивалента по молибдену прочностные свойства сплавов выше при большем эквиваленте по алюминию, а пластичность и технологичность несколько ниже, но остаются на удовлетворительном уровне при $[Al]_{экр. прочн.} < 10\%$.

3. Установлено, что ликвация элементов в новом высокопрочном титановом сплаве Т120 не ухудшает характеристику прочности сплава, что положительно влияет на его свариваемость.

1. Froes F. H. The Beta Titanium Alloys / F. H. Froes, H. V. Bomberger // J. Metals. — 1985. — July. — P. 28–32.
2. Титановые сплавы в сварных конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической технике / Б. А. Колачев, Ю. С. Елисеев, А. Г. Братухин [и др.]. — М.: Издательство МАИ, 2001. — 416 с.
3. TITANIUM 2008: development of international titanium industry, preparation technology and applications / B. Liu, Y. B. Liu, X. Yang, Y. Liu // Mater. Sci. Eng. Pow. Metall. — 2008. — 14(2). — P. 67–73.
4. Хорев А. И. Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha + \beta$)- и β -титановых сплавов / А. И. Хорев // Технология машиностроения. — 2007. — № 2. — С. 29–34.
5. Хорев А. И. Разработка титанового сплава методом комплексного легирования / А. И. Хорев // Физико-химическая механика материалов. — 2006. — 42, № 5. — С. 45–50.
6. Хорев А. И. Создание теории комплексного легирования и разработка титанового сплава VT23 универсального применения / А. И. Хорев // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 40–46.
7. Leyens C. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications / C. Leyens, M. Peters. — Wiley-VCH, Germany, 2003. — 513 p.
8. Хорев А. И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития / А. И. Хорев // Технология машиностроения. — 2014. — № 11. — С. 5–10.

9. Хорев А. И. Создание теории термической обработки и текстурного упрочнения перспективных титановых сплавов / А. И. Хорев // *Материаловедение*. — 2009. — № 4. — С. 28–36.
10. Хорев А. И. Основные научные и практические направления повышения стабильности механических свойств ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности / А. И. Хорев // *Труды Межд. конф. «Ti-2010 в СНГ»*, Екатеринбург, 2010. — С. 227–235.
11. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов / В. В. Антипов // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 5. — С. 157–167.
12. Патент 40087 Україна, UA C22 C14/00. Високоміцний титановий сплав / В. М. Замков, В. П. Топольский, М. П. Тригуб [и др.]; власник Інститут електроварування ім. Є. О. Патона Національної академії наук України. — Оуб. 16.073.2001. Бюл. № 6.
13. *Сплавы титана с железом* / Б. А. Колачев, В. А. Володин, И. А. Воробьев [и др.] // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. — 1996. — № 6. — С. 38–44.
14. Патент 111002 Україна, МПК C22C 14/00 C22B 34/12. Високоміцний титановий сплав / С. В. Ахонін, В. О. Березос, В. Ю. Білоус [та ін.]; власник Інститут електроварування ім. Є. О. Патона Національної академії наук України. — № 201406878, заявл. 19.06.2014, опубл. 10.03.2016. Бюл. № 5.

At present in the whole world the stable tendency in increase of a share of high-strength titanium materials, the welded joints of which provide the high complex of mechanical and service properties, is observed. Here the titanium alloys with the strength ≥ 1200 MPa, having a good ductility and weldability in as-annealed state are absent. The development of the new high-strength ($\alpha + \beta$) titanium alloy with these characteristics will wide greatly the assortment of critical parts for military, aviation, space and other branches of industry. The complex alloying is the most promising direction in improvement of structural strength in the development of high-strength complexly-alloyed titanium alloys. In the course of work a new high-strength complexly-alloyed ($\alpha + \beta$) titanium alloy T120 on the base of 8-component system of alloying Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr with a tensile strength of not less than 1200 MPa was developed, basing on the results of calculations and carried out experiments on determination of mechanical characteristics. The new high-strength complexly-alloyed ($\alpha + \beta$) titanium alloy T120 is protected by the patent of Ukraine. Ref. 14, Tables 4, Figure 1.

Keywords: titanium alloy, alloying elements, tensile strength, structure, electron beam melting, chemical composition, mechanical properties

Поступила 11.10.2016

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОВАРУВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



**Міжнародна конференція
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ

Голова:
академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com