

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НОВОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Т120, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ЭЛП ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

С. В. Ахонин<sup>1</sup>, В. Ю. Белоус<sup>1</sup>, А. Ю. Северин<sup>1</sup>,  
В. А. Березос<sup>1</sup>, А. Н. Пикулин<sup>1</sup>, А. Г. Ерохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

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

<sup>2</sup>ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины».

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

Определены технологические режимы проведения термомеханической обработки слитков электронно-лучевой плавки нового сплава Т120. Проведены работы по получению экспериментальной серии деформированных заготовок из слитков диаметром 150 мм нового высокопрочного сплава. После проведенной деформационной обработки исследована микроструктура сплава Т120. Определено, что структура титанового сплава Т120, полученного способом ЭЛП, после прокатки состоит из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен, а внутризеренная структура представлена  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, причем  $\alpha$ -фаза имеет пластинчатую морфологию. Установлено, что при проведении деформационной обработки на поверхности листов образуется окисный, а под ним приповерхностный альфированный слой толщиной до 0,5 мм. Исследовано влияние термической обработки деформированных полуфабрикатов на структуру и свойства металла и установлены режимы, которые обеспечивают оптимальное сочетание прочности и пластичности для сплава Т120. Для достижения максимальной пластичности заготовки сплава Т120 целесообразно подвергать отжигу при температуре 900 °С, в результате чего в металле формируется внутризеренная ( $\alpha + \beta$ )-структура с толщиной  $\alpha$ -пластин 1,0...1,5 мкм. При этом значение ударной вязкости составляет  $KCV = 12...14$  Дж/см<sup>2</sup> при относительном удлинении  $\delta_s = 12$  %. Библиогр. 9, табл. 2, ил. 5.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка; титановый сплав; деформационная обработка; термическая обработка; структура; свойства

Необходимость применения в различных областях техники высокопрочных материалов, которые обеспечивают полный комплекс механических и эксплуатационных свойств и при этом хорошо свариваются [1–3], привела к тому, что в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработан новый высокопрочный сложнотитановый ( $\alpha+\beta$ )-титановый сплав Т120 на основе 8-ми компонентной системы легирования Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr [4, 5].

Для измельчения исходной литой структуры за счет процессов рекристаллизации, улучшения химической однородности материала, а также для устранения дефектов, возникающих при металлургическом производстве литых слитков, используют традиционные методы обработки давлением — ковку, прокатку, экструзию [6]. Применение

прокатки позволяет получать листы, которые можно сваривать в различные элементы конструкций.

В качестве исходных заготовок использовали полученные способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП) слитки сплава Т120 диаметром 150 мм (рис. 1) [7]. Химический состав полученных слитков приведен в табл. 1.

Механически обработанные слитки подвергали горячей деформационной обработке на реверсивном прокатном ДУО-стане Skoda 355/500, основные технические характеристики которого следующие:

размеры валков:  
диаметр (\*нижний), мкм ..... 355(\*330)  
длина, мм ..... 500  
максимальное межвалковое расстояние  $h_{\text{макс}}$ , мм ..... 150

Таблица 1. Химический состав сплава Т120, мас. %

Сплав	Al	V	Mo	Nb	Cr	Fe	Zr	Ti
Т120 (патент)	4,5...5,5	1,5...2,5	2,5...3,5	3,5...4,5	0,7...1,5	0,7...1,2	2,3...3,0	Основа
Т120 (слиток)	5,4	1,9	2,8	3,9	0,8	0,85	2,5	Основа



Рис. 1. Исходные заготовки диаметром 145 мм сплава Т120 (а), процесс их деформации в поперечном (б) и продольном (в) направлениях

минимальное межвалковое расстояние $h_{\text{мин}}$ , мм	..... 5
скорость прокатки $V$ , м/с	..... 0,75
давление при прокатке $P_{\text{макс}}$ , т	..... 120
мощность главного двигателя $N$ , кВт	..... 160
максимальное число реверсирования, раз в час	..... 240

Стан предназначен для экспериментальной прокатки полос шириной до 400 мм, при этом минимальная толщина прокатанной заготовки может составлять 5 мм. Нагрев заготовок осуществляли в электропечах мощностью от 50 до 70 кВт.

Деформационную обработку заготовок из сплава Т120 проводили по следующему технологическому режиму:

нагрев заготовок в печи до температуры 1050 °С без применения защитной атмосферы и защитных покрытий, выдержка 1 ч;

прокатка заготовок поперек оси слитков размерами со 145 до 200 мм (рис. 1, а). Деформация заготовок за один проход — 4...5 мм. Температура прокатки не менее 850 °С. При достижении размера примерно 200 мм заготовки поворачивали на 90° (рис. 1, б) и производили докатку с промежуточными подогревами до достижения степени деформации около 60 %;

нагрев заготовок в печи до температуры 960 °С, выдержка 0,5 ч;

«чистовая» докатка заготовок до толщин 8, 10, 13, 15 мм. Деформация заготовок за один проход — 2...3 мм;

рихтовка на гидравлическом прессе с целью устранения прогибов.

Остывание заготовок осуществляли на воздухе до температуры окружающей среды.

В ходе работы получена партия пластин из сплава титана Т120 (рис. 2, а). Порезку в готовый размер производили на строгальном станке. Выход готовых пластин после проведенной деформационной обработки составил около 70 % (рис. 2, б, в).

Металлографические исследования проводили с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ-30, оснащенного цифровой фотокамерой, на поперечных и продольных микрошлифах, вырезанных из деформированных заготовок. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JSM-840 определяли размер и состав структурных составляющих. Микротвердость измеряли на приборе М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 100 г.

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

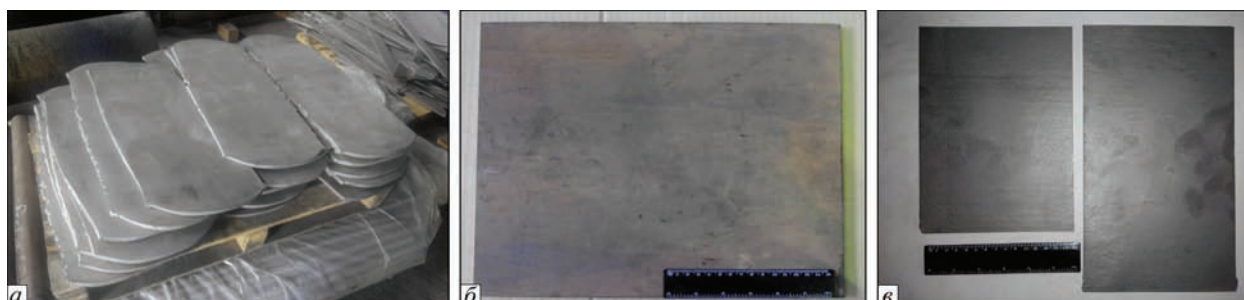


Рис. 2. Экспериментальная партия пластин из сплава Т120 (а), готовые пластины размерами, мм: 250×300×15 (б), 150×250×8 и 150×300×10 (в)

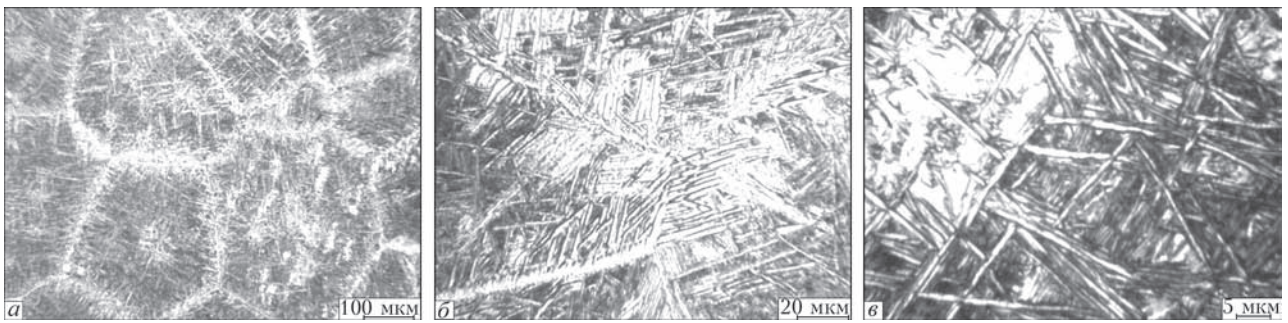


Рис. 3. Микроструктура сплава Т120 после горячей деформационной обработки: *а–в* (см. в тексте)

сти существования  $\beta$ -фазы структура состоит из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен размером 200...360 мкм (рис. 3, *а*). Внутризеренная структура представлена  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, причем  $\alpha$ -фаза имеет пластинчатую морфологию с толщиной пластин около 0,5 мкм (рис. 3, *б*). Микроструктура деформированных заготовок титанового сплава Т120 имеет удовлетворительную однородность по сечению, однако в структуре встречаются участки с нераспавшейся  $\beta$ -фазой — т. н. « $\beta$ -пятна» (рис. 3, *в*). Твердость по сечению образца составляет от 4750 до 5170 МПа.

Проведенные исследования приповерхностной зоны деформированного материала показали, что на поверхности металла образуются окисный слой толщиной до 50 мкм. Этот слой появляется при нагреве до высоких температур металла в печи без применения защитной атмосферы. Окис-

ный слой достаточно «рыхлый», в нем наблюдаются трещины (рис. 4, *а*) и сколы (рис. 4, *б*). Он не препятствует насыщению приповерхностных слоев металла кислородом, вплоть до образования альфированного слоя в виде крупных пластин  $\alpha$ -фазы, растущих от поверхности вглубь металла. Приповерхностный слой толщиной до 500 мкм состоит из вытянутых в направлении проката  $\beta$ -зерен, между которыми расположены мелкие равноосные зерна размером около 300 мкм (рис. 4, *в*, *г*). Преобладание  $\alpha$ -фазы в металле приповерхностной области, очевидно, связано с повышенным содержанием кислорода, являющегося стабилизатором  $\alpha$ -фазы. О существовании газонасыщенного слоя свидетельствует и повышенная твердость металла приповерхностной области.

Таким образом, проведенные исследования структуры прокатанного металла сложнолеги-

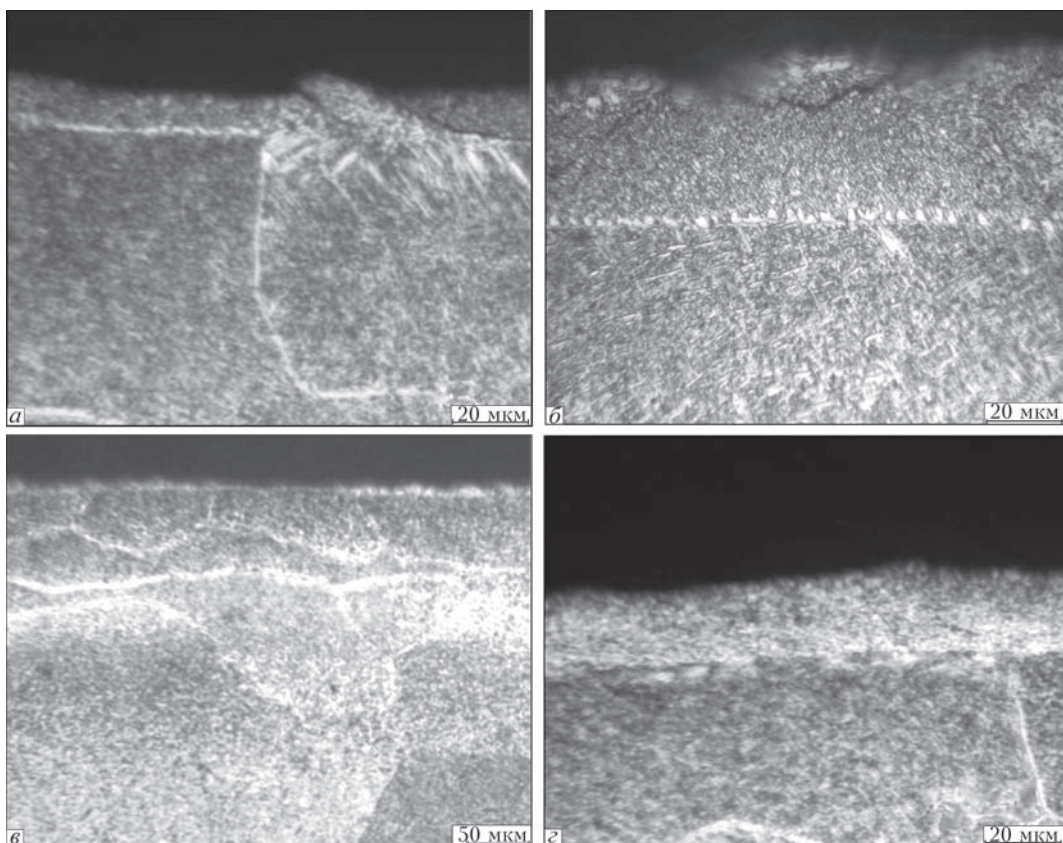


Рис. 4. Микроструктура приповерхностных слоев титанового сплава Т120 после прокатки: *а–г* (см. в тексте)

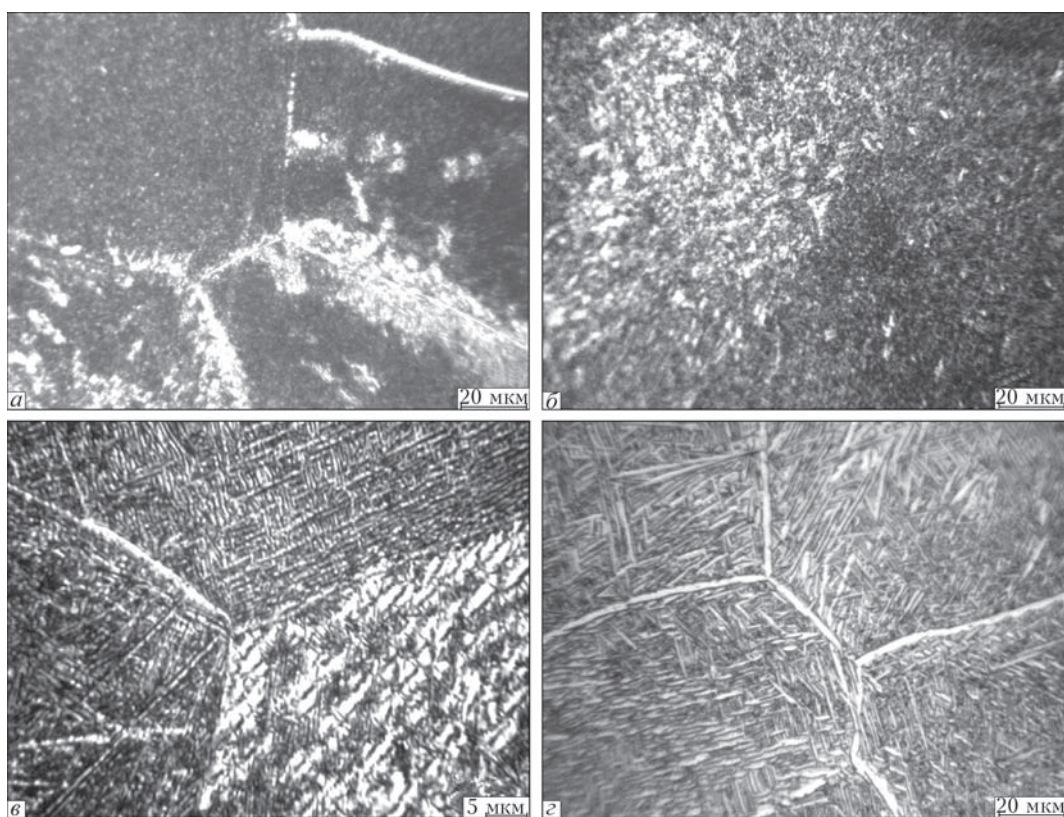


Рис. 5. Микроструктура сплава Т120 после отжига при температурах, °С: 800 (а), 850 (б, в) и 900 (г) в течение 1 ч

рованного титанового сплава Т120, полученного методом ЭЛП, показывают, что величина зерна в средних слоях прокатанной заготовки составляет 200...350 мкм. Установлено, что для уменьшения толщины окисленного слоя деформированных заготовок титанового сплава Т120 необходимо минимизировать время нахождения их в печи при промежуточных подогревах и по возможности использовать специальные защитные обмазки, а при подготовке деформированных полуфабрикатов для последующих технологических операций, например под сварку, удалять поверхностный слой на глубину не менее 0,5 мм.

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

Микроструктура деформированного сплава Т120 после вакуумного отжига при температуре 800 °С в течение 1 ч показана на рис. 5, а. После такого отжига большинство границ первичных  $\beta$ -зерен имеют  $\alpha$ -оторочку и структура является неоднородной в пределах одного зерна из-за наличия « $\beta$ -пятен». Структура при такой температуре отжига остается достаточно дисперсной. После отжига при температуре 850 °С пластины  $\alpha$ -фазы имеют толщину 0,5...0,6 мкм (рис. 5, б). На некоторых границах зерен наблюдается  $\alpha$ -оторочка, структура также неоднородна из-за неодинаковой

степени распада  $\beta$ -фазы в разных зернах (рис. 5, в). Микроструктура сплава Т120 после отжига при температуре 900 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе показана на рис. 5, г. После применения такого отжига размер первичных  $\beta$ -зерен остается таким же, как и до отжига (около 200 мкм). На границах образуется утолщенная  $\alpha$ -оторочка шириной 2...4 мкм, « $\beta$ -пятна» не обнаружены. Отличием структуры сплава Т120 после отжига при температуре 900 °С от структуры сплава после отжига при более низкой температуре является существенное увеличение размера внутризеренной структуры. Так, в результате коагуляции толщина пластин  $\alpha$ -фазы достигла величины 1,0...1,5 мкм. Такие структурные изменения оказывают положительное влияние на некоторые механические свойства сплава [8, 9].

Основными показателями механических свойств, которые характеризуют титановые сплавы являются: предел прочности ( $\sigma_b$ , МПа), предел текучести ( $\sigma_T$ , МПа), относительное удлинение ( $\delta$ , %), относительное сужение ( $\psi$ , %) и ударная вязкость ( $KCV$ , Дж/см<sup>2</sup>). Механические свойства определяли при комнатной температуре на образцах, которые вырезали из металла как после деформационной обработки, так и после соответствующей термической обработки. Механические свойства сложнoleгированного титанового сплава Т120 после проведенных обработок приведены в табл. 2.

**Т а б л и ц а 2. Механические свойства деформированного титанового сплава Т120**

Вид термообработки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\delta_s$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Прокатка	1285	1198	1,7	11,8	5,0
Отжиг					
800 °С, 1 ч	1318	1262	2,7	12,9	6,7
850 °С, 1 ч	1215	1089	10,0	18,5	9,0
900 °С, 1 ч	1186	1124	13,3	19,0	13,5

Анализ полученных данных показывает, что заданный уровень прочности ( $\sigma_b \geq 1200$  МПа) пластин деформированного титанового сплава Т120 обеспечивает отжиг при температуре 850 °С в течение 1 ч при удовлетворительных показателях пластичности и ударной вязкости. Для увеличения ударной вязкости и повышения пластических свойств деформированных пластин сплава Т120 можно рекомендовать их отжиг при температуре 900 °С.

### Выводы

1. Установлено, что при проведении деформационной обработки слитков высокопрочного сложного легированного ( $\alpha + \beta$ )-титанового сплава Т120 на поверхности листов образуется окисный слой толщиной до 50 мкм, а под ним — приповерхностный альфированный слой толщиной до 500 мкм. Для уменьшения толщины этих слоев рекомендуется применение специальных обмазок и снижение времени нахождения заготовки в печи при промежуточных нагревах.

2. Определено, что структура ( $\alpha + \beta$ )-титанового сплава Т120, полученного способом ЭЛП, после прокатки состоит из равноосных полиэдрических первичных  $\beta$ -зерен размером 200...350 мкм, а внутризеренная структура представлена  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, причем  $\alpha$ -фаза имеет пластинчатую морфологию с толщиной пластин около 0,5 мкм.

3. Установлено, что лучшее сочетание свойств для деформированного сплава Т120 обеспечивает последующий отжиг при температуре 900 °С в течение 1 ч. Применение этого режима обеспечивает равномерную структуру с толщиной пластин  $\alpha$ -фазы в структуре металла в пределах 1,0...1,5 мкм и оптимальное соотношение значений прочности, пластичности и ударной вязкости.

### Список литературы

- Хорев А. И. (2014) Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития. *Технология машиностроения*, **11**, 5–10.

- Колачев Б. А., Елисеев Ю. С., Братухин А. Г. и др. (2001) *Титановые сплавы в сварных конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники*. Москва, Издательство МАИ.
- Liu B., Liu Y. B., Yang X., Liu Y. (2008) TITANIUM 2008: development of international titanium industry, preparation technology and applications. *Mater. Sci. Eng. Pow. Metall.*, **14(2)**, p.p. 67–73.
- Ахонин С. В., Селин Р. В., Березос В. А. и др. (2016) Разработка нового высокопрочного титанового сплава. *Современная электрометаллургия*, **4**, 22–27.
- Ахонін С. В., Березос В. О., Білоус В. Ю. та ін. (2014) Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, *Високоміцний титановий сплав*, Україна, Пат. 111002, МПК С22С 14/00 С22В 34/12, № 201406878.
- Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС, МАТИ.
- Ахонин С. В., Пикулин А. Н., Березос В. А. и др. (2017) Электронно-лучевая плавка нового высокопрочного титанового сплава Т120. *Современная электрометаллургия*, **1**, 15–21.
- Хорев А. И. (2010) Основные научные и практические направления повышения стабильности механических свойств ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности. *Сб. тр. Междунар. конф. «Ti-2010 в СНГ»*, Екатеринбург. сс. 227–235.
- ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*.

### References

- Khorev A. I. (2014) Fundamentalnye i prikladnye raboty po konstruksionnym titanovym splavam i perspektivnye napravleniya ikh razvitiya. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, **11**, 5–10. [in Russian].
- Kolachev B. A., Yeliseyev Yu. S., Bratukhin A. G. i dr. (2001) *Titanovye splavy v svarnykh konstruksiyakh i proizvodstve aviadvigatelay i aviatsionno-kosmicheskoy tekhnike*. Moskva, Izdatelstvo MAI. [in Russian].
- Liu B., Liu Y. B., Yang X., Liu Y. (2008) TITANIUM 2008: development of international titanium industry, preparation technology and applications. *Mater. Sci. Eng. Pow. Metall.*, **14(2)**, p.p. 67–73.
- Akhonin S. V., Selin R. V., Berezos V. A. et al. (2016) Development of new high-strength titanium alloy. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, **4**, 22–27. [in Russian].
- Akhonin S. V., Berezos V. O., Bilous V. Yu. ta in. (2014) Instytut elektrozvarivannia im. E. O. Patona NANU, *Vysokomitsnyi tytanovyi spлав*, Ukraina, Pat. 111002, МПК S22S 14/00 S22V 34/12, № 201406878. [in Ukrainian].
- Ilyin A. A., Kolachev B. A., Polkin I. S. (2009) *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva*. Moskva, VILS, MATI. [in Russian].
- Akhonin S. V., Pikulin A. N. Berezos V. A. et al. (2017) Electron beam melting of new high-strength titanium alloy T120. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, **1**, 15–21. [in Russian].
- Khorev A. I. (2010) Osnovnye nauchnye i prakticheskiye napravleniya povysheniya stabilnosti mekhanicheskikh svoystv ( $\alpha + \beta$ )-titanovykh splavov vysokoy i sverkhvysokoy prochnosti. *Sb. tr. Mezhdunar. konf. «Ti-2010 v SNG»*, Yekaterinburg. ss. 227–235. [in Russian].
- ГОСТ 1497–84. *Metally. Metody ispytany na rastyazheniye*. [in Russian].

**СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ НОВОГО ВИСОКОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ T120, ОТРИМАНОВО СПОСОБОМ ЕЛП ПІСЛЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ**

**С. В. Ахонін<sup>1</sup>, В. Ю. Белоус<sup>1</sup>, А. Ю. Северин<sup>1</sup>, В. О. Березос<sup>1</sup>, О. Н. Пікулін<sup>1</sup>, О. Г. Єрохін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДП «НПЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Визначено технологічні режими проведення термодформаційної обробки злитків електронно-променевої плавки нового сплаву T120. Проведено роботи по отриманню експериментальної серії деформованих заготовок із злитків діаметром 150 мм нового високоміцного сплаву. Після проведеної деформаційної обробки досліджено мікроструктуру сплаву T120. Визначено, що структура титанового сплаву T120, отриманого способом ЕЛП, після прокатки складається з рівноосних полідріческих первинних β-зерен, а внутрішньозеренна структура представлена α- і β-фазами, причому α-фаза має пластинчасту морфологію. Встановлено, що при проведенні деформаційної обробки на поверхні листів утворюється окисний, а під ним приповерхневий альфований шар товщиною до 0,5 мм. Досліджено вплив термічної обробки деформованих напівфабрикатів на структуру і властивості металу і встановлено режими, які забезпечують оптимальне поєднання міцності і пластичності для сплаву T120. Для досягнення максимальної пластичності заготовки сплаву T120 доцільно піддавати відпалу при температурі 900 °С, в результаті чого в металі формується внутрішньозеренна (α + β)-структура з товщиною α-пластин 1,0...1,5 мкм. При цьому значення ударної в'язкості становить KCV = 12...14 Дж / см<sup>2</sup> при відносному подовженні δ<sub>s</sub> = 12 %. Бібліогр. 9, табл. 2, іл. 5.

**Ключові слова:** електронно-променева плавка; титановий сплав; деформаційна обробка; термічна обробка; структура; властивості

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF NEW HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY T120, PRODUCED BY THE METHOD OF EBM AFTER DEFORMATIONAL AND HEAT TREATMENT**

**S.V. Akhonin<sup>1</sup>, V.Yu. Belous<sup>1</sup>, A.Yu. Severin<sup>1</sup>, V.A. Berezos<sup>1</sup>, A.N. Pikulin<sup>1</sup>, A.G. Erokhin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.

11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>SE «RPC «Titan» of the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine».

26, Raketnaya str., Kiev, 03028. E-mail: titan.paton@gmail.com

Technological conditions of thermodeformational treatment of ingots of electron beam melting of the new alloy T120 were determined. The works were carried out for producing experimental series of deformed billets of 150 mm diameter ingots of the new high-strength alloy. After deformational treatment the microstructure of T120 alloy was examined. It was determined that the structure of titanium alloy T120, produced by the EBM, consists of equiaxial polyhedral primary β-grains after rolling, and the intergranular structure is presented by α and β-phases, moreover, the α-phase has a laminar morphology. It was found that during deformational treatment an oxide and near-surface alphasized layer of up to 0.5 mm thickness under it are formed on the surface of sheets. The effect of heat treatment of deformed semi-products on structure and properties of metal was investigated and conditions, which provide optimum combination of strength and ductility for alloy T120 were established. To attain the maximum ductility, it is rational to subject the T120 alloy billets to annealing at 900 °C, as a result of which the intergranular (α + β)-structure with thickness of α-lamella of 1.0...1.5 μm is formed. In this case the value of impact strength is KCV = 12...14 J/cm<sup>2</sup> at elongation δ<sub>s</sub> = 12 %. Ref. 9, Tables 2, Figures 5.

**Key words:** electron beam melting; titanium alloy; deformational treatment; heat treatment; structure; properties

Поступила 28.03.2017

**XVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2017**

**21–24 НОЯБРЯ**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР**

Украина, Киев, Броварской пр-т, 15

www://tech-expo.com.ua