

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-10-2-3 ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА\*

И. В. Протокилов, Д. А. Петров

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты исследований химического состава, структуры и механических свойств высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 в литом состоянии и после термомеханической обработки. Слитки получены путем переплава расходных электродов в электрошлаковой печи камерного типа с применением электромагнитного воздействия на металлургическую ванну. Литой металл подвергали термомеханической обработке с последующей закалкой и старением. Анализ структуры металла не выявил внутренних макро- и микродефектов. Размер зерен литого металла в среднем составлял 1...6, а деформированного и термообработанного — 0,2...0,6 мкм. В литом состоянии прочность сплава составляла 936...1012 МПа при пластичности 1,7...12,5 %, а в термообработанном 1190...1210 МПа и 11,7...14,0 % соответственно. Исследования поверхности разрушения образцов после испытаний на растяжение выявили преобладающий характер вязкого разрушения. Показано, что по структуре, химическому составу и механическим свойствам титановый сплав Ti-10-2-3 электрошлакового переплава соответствует техническим условиям на данный материал. Библиогр. 6, табл. 2, ил. 8.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; электромагнитное воздействие; титановый сплав Ti-10-2-3; слиток; термомеханическая обработка; структура; механические свойства

Высокопрочный титановый сплав Ti-10-2-3 имеет табличный состав, мас. %: Ti — основа; V — 9,0...11,0; Fe — 1,6...2,2; Al — 2,6...3,4 [1]. Сплав относится к группе псевдо  $\beta$ -сплавов, его молибденовый и алюминиевый эквиваленты равны 12,1 и 4,0 % соответственно, температура полиморфного превращения составляет 790...805 °C [2].

Сплав обладает значительным эффектом термического упрочнения и его механические свойства можно изменять в широких пределах методами термомеханической обработки. Минимальная гарантированная прочность  $\sigma_B$  в отожженном состоянии составляет 965, а после закалки и старения может достигать 1310 МПа [1–3].

Сплав хорошо прокаливается в сечениях до 125 мм, обладает высокой технологичностью при горячей обработке давлением и способностью к формообразованию. Широко используется в авиакосмической промышленности для работы при температурах до 315 °C.

При выплавке сплава Ti-10-2-3 традиционным методом многократного вакуумно-дугового переплава (ВДП) имеют место трудности, связанные с повышенной склонностью сплава к ликвации. Высокое содержание в сплаве железа приводит к

неоднородному распределению его в литой структуре металла слитка: пониженному содержанию по осям дендритов и повышенному — в межосевых объемах. В свою очередь это приводит к различной температуре полиморфного превращения разных зон, неоднородному их упрочнению и неоднородности механических свойств сплава [4].

В связи с этим актуальной задачей является изучение возможностей получения сплава Ti-10-2-3 альтернативными методами и исследование свойств полученного металла.

Один из эффективных методов выплавки сложнотитанированных титановых сплавов — процесс магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Отличительным признаком процесса МЭП является электромагнитное воздействие на металлургическую ванну, обеспечивающее интенсивное перемешивание жидкого металла, повышение химической и структурной однородности слитка [5, 6]. Указанные особенности определяют перспективность применения данного процесса для получения высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании структуры и механических свойств ти-

\*Металлофизические исследования проводили в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ.



Рис. 1. Внешний вид расходуемых электродов и выплавленных слитков сплава Ti-10-2-3 диаметром 215 мм

танового сплава Ti-10-2-3, полученного методом МЭП в литом состоянии и после термомеханической обработки.

Исходным материалом для плавки были электроды диаметром 165 мм сплава Ti-10-2-3, полученные методом ВДП прессованной заготовки. Электроды переплавляли методом МЭП в слитки диаметром 215 и длиной 600 мм (рис. 1). Использовали смешанный флюс на основе фторидов и хлоридов щелочноземельных металлов.

Полученные слитки разрезали и часть металла подвергли деформации и термообработке по схеме, рекомендованной разработчиком сплава компанией Timet [1]. Горячую деформацию проводили по следующей схеме: нагрев до 1150 °С, проковка слитка по образующей до сечения 120×120 мм, охлаждение на воздухе; нагрев до 790 °С, проковка до диаметра 100 мм, охлаждение на воздухе; рекристаллизационный отжиг при 900 °С 4 ч, проковка до диаметра 90 мм, охлаждение в воду; нагрев до 790 °С, проковка до диаметра 70 мм, охлаждение на воздухе; порезка на заготовки высотой 100 мм; нагрев до 840 °С, осадка со 100 до 50 мм, охлаждение в воду; нагрев до 760 °С, осадка с 50 до 32 мм, охлаждение на воздухе.



Рис. 2. Деформированные заготовки сплава Ti-10-2-3

В результате проведенной деформации получены заготовки диаметром приблизительно 125 и толщиной 32 мм (рис. 2), которые подвергли термообработке по следующему режиму: нагрев до 760 °С, выдержка 2 ч, охлаждение в воду; нагрев до 500 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе.

Результаты химического анализа образцов, отобранных из разных частей слитка, приведены в табл. 1. Полученные данные свидетельствуют, что по химическому составу сплав Ti-10-2-3 технологии МЭП соответствует требованиям стандарта. По основным компонентам состав слитка выдержан в пределах от 0,1 до 0,6 мас. %. По сечению слитка легирующие элементы распределены равномерно, без признаков зональной ликвации. По элементам внедрения, важным для механических свойств β-сплавов (прежде всего для их пластичности), материал слитка достаточно чистый (содержание [O], [N], [H] до 0,078; 0,016 и 0,0047 % соответственно).

На рис. 3 приведены зависимости твердости *HV* от температуры для металла в литом состоянии и после деформации и термообработки.

По сравнению с литым состоянием деформированный и термообработанный металл во всем интервале вплоть до рекристаллизации (600...650 °С) показывает более высокую твердость (рис. 3). При комнатной температуре уровень твердости деформированных и термообработанных образцов составляет 3400...3500 МПа, что превышает твердость литого сплава в среднем на 500 МПа.

На рис. 4 приведена макроструктура продольного сечения центральной части слитка. По результатам оптических исследований шлифов в различных плоскостях построена схема литой структуры сплава (рис. 5). Схема привязана к

Таблица 1. Химический состав сплава Ti-10-2-3 технологии МЭП, мас. %

Номер образца	Ti	V	Fe	Al	Si	O	H	N
1	84,8	9,8	1,79	3,40	0,03	0,066	0,0037	0,016
2	84,4	9,8	1,80	3,30	0,03	0,078	0,0047	0,015
3	84,2	10,1	1,82	3,37	0,08	0,072	0,0045	0,013
Среднее значение	84,47	9,9	1,80	3,38	0,05	0,072	0,0043	0,015
Требования стандарта	Основа	9,0...11,0	1,6...2,2	2,6...3,4	–	≤ 0,13	≤ 0,015	–

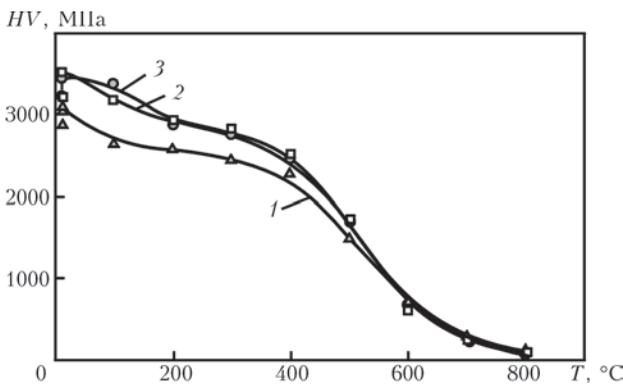


Рис. 3. Температурная зависимость твердости *HV* сплава Ti-10-2-3 в литом состоянии (1) и после термомеханической обработки (2, 3)

исходному слитку и наглядно иллюстрирует его объемную структуру. Графически показаны характерные зоны и величина зерна в отдельных местах слитка.

Анализ структуры металла не выявил внутренних макро- и микродефектов. Наблюдаются незначительные отличия в макроструктуре отдельных частей слитка. В донной части и возле боковых стенок слитка зерна вытянуты в направлении теплоотвода, в центральной части — однородны по размеру. В среднем размер зерен литого металла составляет от 1 до 6 мм.

Оптическая микроскопия деформированного металла выявила однородную мелкозернистую структуру, обусловленную значительной степенью его деформации (рис. 6). Зерна имеют размер от 0,2...0,3 до 0,5...0,6 мм. Наблюдается небольшая вытянутость зерен, связанная со схемой деформации металла, но это не портит картину однородной дисперсной структуры.

Микроструктура литого и деформированного металла, выявленная при использовании трансмиссионной электронной микроскопии представлена на рис. 7.

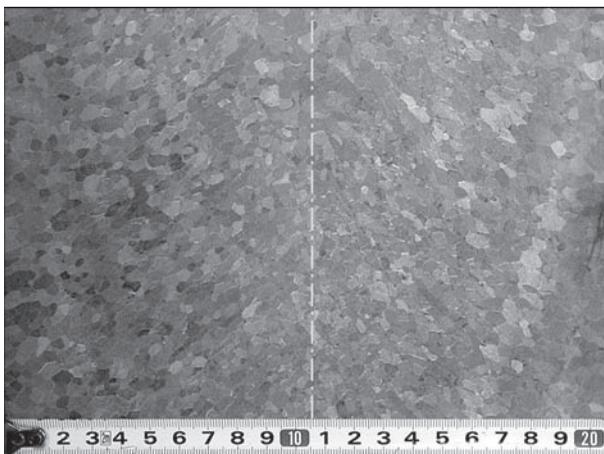


Рис. 4. Макроструктура продольного сечения слитка сплава Ti-10-2-3

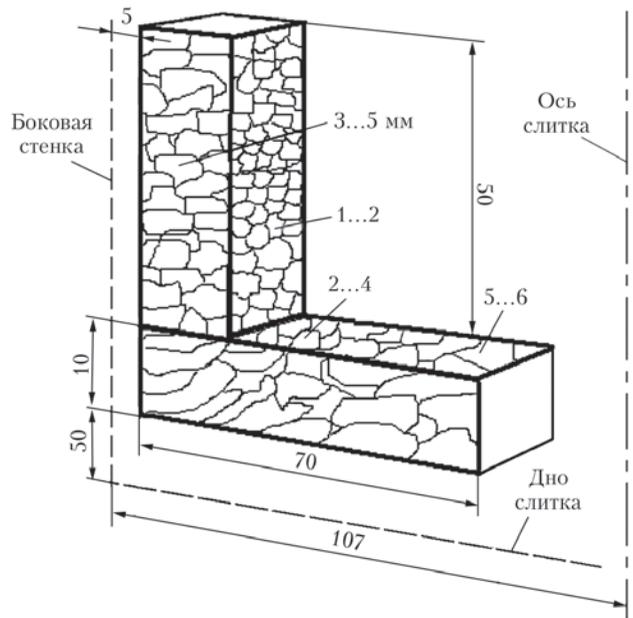


Рис. 5. Схема литой структуры слитка сплава Ti-10-2-3

В исходном состоянии литой сплав имеет двухфазную ( $\alpha + \beta$ )-пластинчатую структуру. Размер отдельных частиц  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз зависит от конкретного места в зерне и в слитке и колеблется в пределах от 0,2...0,5 до 1,2...1,8 мкм. В целом структура сплава неоднородна и образует как бы конгломераты из участков с различными типами структур: двухфазная полосчатая с набором кристаллов фаз различной величины, двухфазная мартенситная и однофазная  $\beta$ -структура с вкраплениями  $\alpha$ -фазы (рис. 7, а-в).

Структура деформированного и термообработанного металла представляет собой смесь дисперсных  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, образованных при распаде мартенситной структуры закалки (рис. 7, г-е). Эти фазы имеют в поперечном сечении размер около 0,1 мкм, а в продольном в 10...20 раз больше. Иногда встречаются крупные частицы первичной  $\alpha$ -фазы размером до 1...2 мкм (рис. 7, д). Эти  $\alpha$ -частицы не растворились при нагреве под



Рис. 6. Макроструктура ( $\times 50$ ) сплава Ti-10-2-3 после термомеханической обработки

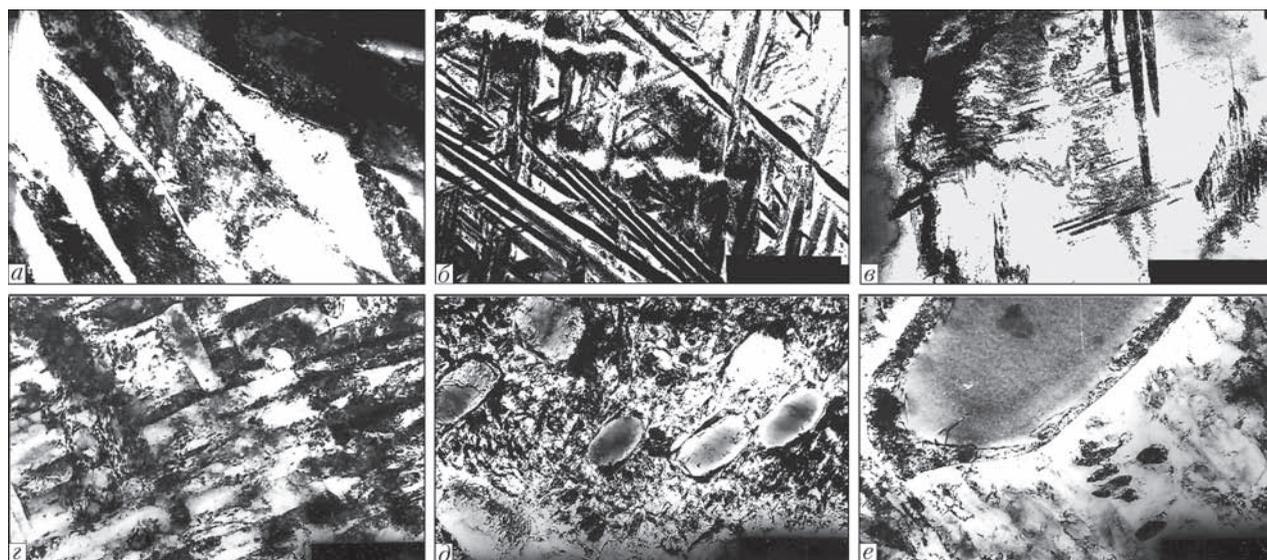


Рис. 7. Микроструктура сплава Ti-10-2-3 в литом состоянии: а —  $\times 29000$ ; б —  $\times 8000$ ; в —  $\times 15000$ ; после термомеханической обработки: г —  $\times 48000$ ; д —  $\times 10000$ ; е —  $\times 36000$

закалку, потому что закалка проводилась от температуры несколько ниже фазового превращения (т. е. в  $(\alpha + \beta)$ -области), иначе, могла возникнуть опасность пережога металла пока он находился в  $\beta$ -области.

На границах частиц первичной  $\alpha$ -фазы часто наблюдали как бы окантовку (рис. 7, е) из  $\alpha$ -фазы несколько измененного состава, которая образовалась при остывании от высоких температур или во время отпуска. В целом, объемная доля частиц  $\alpha$ -фазы не превышает 5 %.

Механические свойства сплава изучали при испытаниях на растяжение и ударную вязкость. Для испытаний на растяжение применяли круглые образцы с диаметром рабочей части 5 мм и с рабочей длиной 25...30 мм. Испытания на ударный изгиб проводили с использованием образцов

с U-образным надрезом. Образцы литого металла вырезали в направлении вдоль и поперек оси слитка, деформированного — поперек. Полученные результаты приведены в табл. 2.

В литом состоянии образцы показали достаточно высокую прочность на уровне 936...1012 МПа и невысокую пластичность  $\delta = 1,7...12,5$  %. При этом имел место большой разброс механических свойств. Так, пределы прочности некоторых образцов отличались на 76 МПа. Это связано с тем, что образцы для испытаний на растяжение изготавливали с рабочим диаметром 5 мм, а размер зерна литого металла изменялся в отдельных местах слитка от 1 до 6 мм, что исключало усреднение механических свойств и приводило к разбросу данных при испытаниях.

Все образцы деформированного и термообработанного металла показали высокую прочность (1190...1210 МПа) и сравнительно высокую пластичность ( $\delta = 11,7...14,0$  %), при этом все разрушались с образованием шейки. Разброс значений предела прочности не превышал 20 МПа (1,7 %), что свидетельствует о хорошей однородности металла.

Исследование поверхности разрушения образцов после растяжения выполняли в широком интервале увеличений с применением оптической и электронной микроскопии. Полученные фрактogramмы приведены на рис. 8. В большинстве случаев как для литого, так и для термообработанного металла электронная микроскопия фиксирует на поверхности образцов вязкое ямочное разрушение (рис. 8, а-в, е). Часто наблюдается многоуровневая схема формирования ямок: самые мелкие ямки образуют при слиянии более крупные, а те, в свою очередь, еще более крупные и т. д. (рис. 8, б).

Таблица 2. Механические свойства сплава Ti-10-2-3 технологии МЭП в литом состоянии и после деформации и термообработки					
Номер образца	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
Литое состояние					
1	936	884,7	2,7	6,0	—
2	968	916	12,4	17,3	—
3	1012	916	1,7	15,5	—
4	988	956	1,7	7,9	—
Среднее значение	976	918,2	4,6	11,7	—
После деформации и термообработки					
1	1198,2	1123,6	11,7	29,2	5,5
2	1192,5	1113,0	13,6	41,2	4,5
3	1189,6	1116,0	14,0	39,2	5,0
4	1209,5	1132,2	13,0	35,5	5,1
Среднее значение	1197,5	1121,2	13,1	36,3	5,0

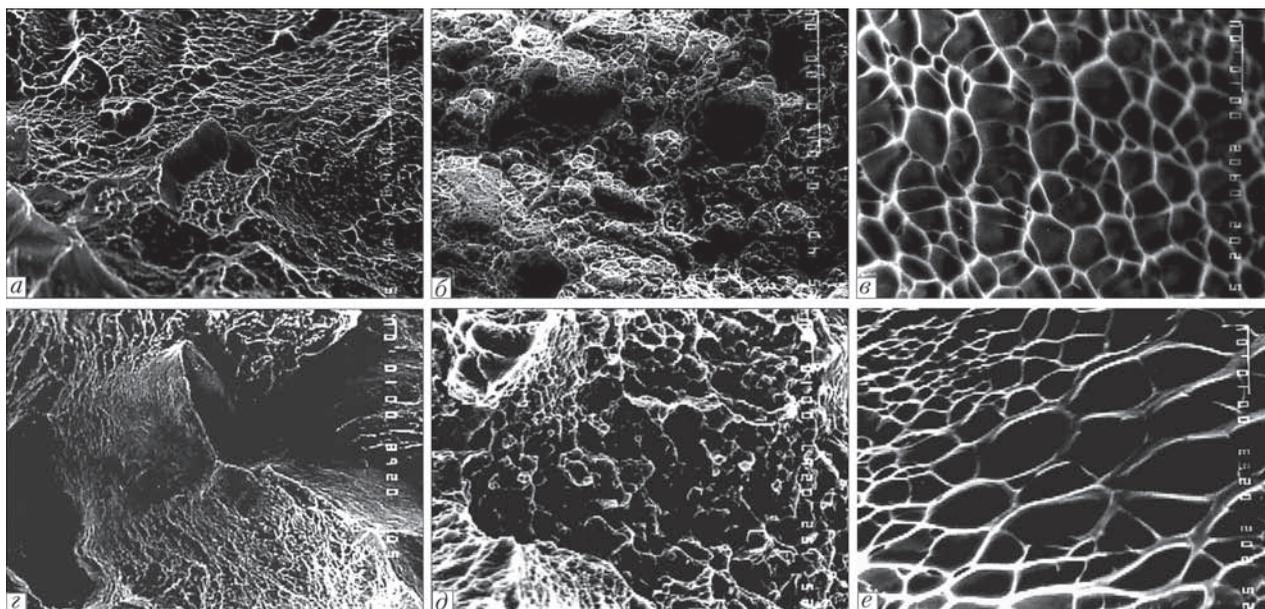


Рис. 8. Фрактограммы разрывных образцов сплава Ti-10-2-3 в литом состоянии: а —  $\times 200$ ; б —  $\times 400$ ; в —  $\times 2000$ ; после деформации и термообработки: г —  $\times 500$ ; д —  $\times 1500$ ; е —  $\times 5000$

Глубина ямок небольшая, т. е. вязкое межзеренное разрушение происходит в минимально узком слое металла, прилегающем к границе (рис. 8, в). Иногда встречаются участки хрупкого разрушения, но в целом преобладает вязкий характер разрушения, когда даже скол плавно переходит в ямочное разрушение (рис. 8, г). На всех образцах микропор или твердых включений, которые были бы причиной возникновения разрушения, не обнаружено.

Таким образом, проведенные исследования показали, что по химическому составу, структуре и механическим свойствам титановый сплав Ti-10-2-3 электрошлакового переплава соответствует техническим условиям и табличным данным, характерным для этого материала. Полученные результаты свидетельствуют о возможности изготовления качественных слитков высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 методом МЭП.

### Выводы

1. Отработаны режимы магнитоуправляемой электрошлаковой плавки и последующей термомеханической обработки слитков высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3.

2. Установлено, что по химическому составу сплав Ti-10-2-3, полученный с применением МЭП, соответствует требованиям стандарта.

3. Анализ структуры литого и деформированного металла не выявил внутренних макро- и микродефектов. Размер зерен литого металла в среднем составил 1...6 мм, а деформированного и термообработанного — 0,2...0,6 мм.

4. Прочность сплава в литом состоянии равна 936...1012 МПа при пластичности 1,7...12,5 %, а

термообработанного металла — 1190...1210 МПа и 11,7...14,0 % соответственно.

5. Исследования поверхности образцов после испытаний на растяжение выявили преобладающий характер вязкого ямочного разрушения.

### Список литературы

1. *TIMETAL 10-2-3*. Электронный ресурс. Режим доступа [http://www.timet.com/images/document/ingot/TIMETAL\\_10-2-3.pdf](http://www.timet.com/images/document/ingot/TIMETAL_10-2-3.pdf)
2. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
3. Ишункина Т. В. Бета-титановые сплавы // Технология легких сплавов. — 1990. — № 10. — С. 56–70.
4. Хорев А. И. Теория и практика создания современных титановых сплавов для перспективных конструкций // Технология машиностроения. — 2007. — № 12 (66). — С. 5–12.
5. Компан Я. Ю., Протокилов И. В., Назарчук А. Т. Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов // Теория и практика металлургии. — 2008. — № 2. — С. 35–40.
6. Протокилов И. В., Петров Д. А., Порохонько В. Б. Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо  $\beta$ -сплава TC6 // Современная электрометаллургия. — 2016. — № 3. — С. 16–20.

### References

1. *TIMETAL 10-2-3*. Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa [http://www.timet.com/images/document/ingot/TIMETAL\\_10-2-3.pdf](http://www.timet.com/images/document/ingot/TIMETAL_10-2-3.pdf)
2. Ilyin A. A., Kolachev B. A., Polkin I. S. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik. — M.: VILS-MATI, 2009. — 520 s.
3. Ishunkina T. V. Beta-titanovye splavy // Tekhnologiya legkikh splavov. — 1990. — № 10. — S. 56–70.
4. Khorov A. I. Teoriya i ppaktika sozdaniya sovpemennykh titanovykh splavov dlya perspektivnykh konstpuktsy // Tekhnologiya mashinostroyeniya. — 2007. — № 12 (66). — S. 5–12.

5. Kompan Ya. Yu., Protokovilov I. V., Nazarchuk A. T. Melkozernistyye slitki mnogokomponentnykh titanovykh spлавov // Teoriya i praktika metallurgii. — 2008. — № 2. — S. 35–40.
6. Protokovilov I. V., Petrov D. A., Porokhonko V. B. Elektroshtakovaya vyplavka i termomekhanicheskaya obrabotka vysokoprochnogo titanovogo psevdо  $\beta$ -сплава TS6 // Sovremennaya elektrometallurgiya. — 2016. — № 3. — S. 16–20.

**СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-10-2-3  
ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ**

**І. В. Протоковілов, Д. А. Петров**

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Наведені результати досліджень хімічного складу, структури і механічних властивостей високоміцного титанового сплаву Ti-10-2-3 в литому стані та після термомеханічної обробки. Зливки отримані шляхом переплаву витратних електродів в електрошлаковій печі камерного типу із застосуванням електромагнітного впливу на металургійну ванну. Литий метал піддавали термодформаційній обробці з подальшим гартуванням і старінням. Аналіз структури металу не виявив внутрішніх макро- і мікродефектів. Розмір зерен литого металу в середньому становив 1...6, а деформованого і термообробленого — 0,2...0,6 мм. В литому стані міцність сплаву становила 936...1012 МПа при пластичності 1,7...12,5 %, а в термообробленому — 1190...1210 МПа та 11,7...14,0 % відповідно. Дослідження поверхні руйнування зразків після випробувань на розтягування виявили переважаючий характер в'язкого руйнування. Показано, що за структурою, хімічним складом та механічними властивостями титановий сплав Ti-10-2-3 електрошлакового переплаву відповідає технічним умовам на даний матеріал. Бібліогр. 6, табл. 2, іл. 8.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав; електромагнітний вплив; титановий сплав Ti-10-2-3; зливка; термомеханічна обробка; структура; механічні властивості

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY TI-10-2-3  
OF ELECTROSLAG REMELTING**

**I.V. Protokovilov, D.A. Petrov**

E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.  
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Results of investigations of chemical composition, structure and mechanical properties of high-strength titanium alloy Ti-10-2-3 in as-cast state and after thermomechanical treatment are given. Ingots were produced by remelting of consumable electrodes in a chamber-type electroslag furnace using the electromagnetic effect on the metallurgical pool. The cast metal was subjected to the thermal deformational treatment with a subsequent hardening and ageing. Analysis of metal structure did not reveal internal macro-and microdefects. Grain size of cast metal was on average 1...6, while that of deformed and heat-treated ones was 0.2...0.5 mm. In cast state the alloy strength was 936...1012 MPa at ductility of 1.7...12.5 %, while in heat-treated state it was 1190...1210 MPa and 11.7...14.9 %, respectively. The investigations of fracture surface of specimens after tensile tests revealed the dominating nature of a tough fracture. It is shown that as to the structure, chemical composition and mechanical properties the titanium alloy Ti-10-2-3 of the electroslag remelting meets the technical specifications for the given material. Ref. 6, Tables 2, Figures 8.

**Key words:** electroslag remelting; electromagnetic effect; titanium alloy Ti-10-2-3; ingot; thermomechanical treatment; structure; mechanical properties

Поступила 25.01.2017



**XV Всеукраїнська науково-практична конференція  
«СПЕЦІАЛЬНА МЕТАЛУРГІЯ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА»**

Посвящена 100-літтю со дня рождження чл.-кор. НАНУ, д. т. н., професора Г. Г. Ефименко і 90-літтю со дня рождження чл.-кор. НАНУ, д. т. н., професора Д. Ф. Чернеги

**Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сикорського», 11 квітня 2017 г.**

Тел.: (093) 478-19-61, (067) 918-64-76

E-mail: admin@fhotm.kpi.ua