

# ВПЛИВ ТИПУ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ПРИ 3D ПРИНТИНГУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V\*

О. О. Педаш, В. В. Клочихін, Т. А. Мітіна, В. Г. Шило

АТ «МОТОР СІЧ».

69068, м. Запоріжжя, просп. Моторобудівників, 15. E-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)

В статті вивчено склад, структуру та властивості зразків зі сплаву Ti-6Al-4V, що було отримано за технологіями селективного лазерного і електронно-променевого сплавлення стосовно виробництва деталей авіаційного призначення. Проведено порівняльне дослідження структури й властивостей зразків після термічної обробки, що є властивою для сплаву Ti-6Al-4V, до та після попереднього гарячого ізостатичного пресування. Встановлено, що поява в зламах та в мікроструктурі пор й несплавлених гранул зумовлює обов'язкове проведення гарячого ізостатичного пресування деталей відповідального призначення, коли відбувається усунення подібного виду дефектів й відповідно забезпечується кращий комплекс характеристик міцності й пластичності. Бібліогр. 6, табл. 2, іл. 5.

**Ключові слова:** титановий сплав; адитивні технології; селективне лазерне плавлення; електронно-променево плавлення; мікроструктура; механічні властивості

При виготовленні деталей з титанових сплавів все більш широке застосування знаходять адитивні технології (технології 3D принтингу), сутність котрих полягає в отриманні виробів шляхом пошарового нарощування матеріалу на основі комп'ютерної моделі майбутньої деталі на спеціальному обладнанні (3D принтерах) з використанням різних методів (SLM, EBM, DMLS, DMD та ін.).

На даний момент розроблено широку гаму технологій виготовлення деталей методом 3D принтингу у тому числі з титанових сплавів з використанням машин, в котрих у якості джерела підведення енергії до матеріалу побудови (дрібнодисперсного порошку), як правило, використовується лазер (один чи декілька) або електронний промінь. При використанні у якості підведення енергії лазера або електронного променя реалізуються як певні переваги, так і недоліки, що впливають на якість деталі, що виготовляється в цілому. В літературі відмічається [1–6], що технологія селективного лазерного сплавлення (SLM) забезпечує гарну якість поверхні, а установки, котрі використовують у якості джерела енергії електронний промінь (EBM) характеризуються підвищеною продуктивністю, меншою собівартістю готової продукції й підвищеною щільністю матеріалу.

Метою роботи було провести порівняльне дослідження технологій 3D принтингу, що вико-

ристовують у якості джерел підведення енергії лазери або електронний промінь та визначення раціональної технології при виготовленні деталей авіаційної техніки.

**Матеріали та методика експерименту.** У якості об'єкту для досліджень використовували зразки зі сплаву Ti-6Al-4V для випробування механічних властивостей та мікроструктури, що були отримані методами селективного лазерного сплавлення та сплавленням за допомогою електронного променя.

Фракції гранул, що використовувались при виготовленні зразків, складала 20...50 мкм при отриманні лазерним сплавленням та 45...105 мкм — електронно-променевим. Вказані порошки були отримані за технологією газоструменевого розпилення розплаву інертним газом. Зразки отримували як циліндричні діаметром 14 мм, так і прямокутного перерізу 16×16 мм. Довжина зразків складала 60 мм. Побудову зразків на 3D принтері здійснювали у напрямку Z.

Для усунення внутрішньої пористості і підвищеної щільності зразків після процесу друку виконували гаряче ізостатичне пресування (ГІП) на гарячому ізостатичному пресі фірми «QUINTUS» (Швеція). ГІП проводили по режиму: нагрів до температури  $920 \pm 10$  °C з тривалістю витримки

\*По матеріалам доклада, представленого на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

**Т а б л и ц я 1. Хімічний склад дослідних зразків, мас. %**

Варіант технології	Ti	Al	V	C
SLM	Основа	5,9	4,3	0,06
EBM	->-	5,8	4,0	0,07
Норми AMS 4928	->-	5,5...6,75	3,5...4,5	≤ 0,08

2 год.; тиск робочого газу у сосуді високого тиску — 100 МПа.

Зразки після ГПІ піддавали термічній обробці у вакуумній печі за режимом: нагрівання  $750 \pm 10^\circ\text{C}$  з витримкою 1,5 год. в середовищі динамічного вакууму ( $1 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$  мбар), охолодження в поті інертного газу (аргону).

Для проведення порівняльних досліджень частину зразків не піддавали ГПІ, а проводили термічну обробку безпосередньо після друку.

Після обробки по вказаним варіантам заготовки проходили механічну обробку для забезпечення розмірів, що передбачені технічною документацією на виготовлення зразків для механічних випробувань.

Хімічний склад сплаву визначали методами спектрального й хімічного аналізів.

Механічні властивості ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) зразків випробовували на розривній машині ZDMY 30 на відповідність вимогам стандарту AMS4928 й галузевих стандартів ОСТ1 90002 і ОСТ1 90006 на вітчизняний титановий сплав ВТ-6, що застосовується традиційно для виготовлення відповідальних деталей та вузлів в авіаційній промисловості.

Ударну в'язкість (КСУ) визначали на зразках, що були випробувані на маятниковому копрі «Instron SI-1M».

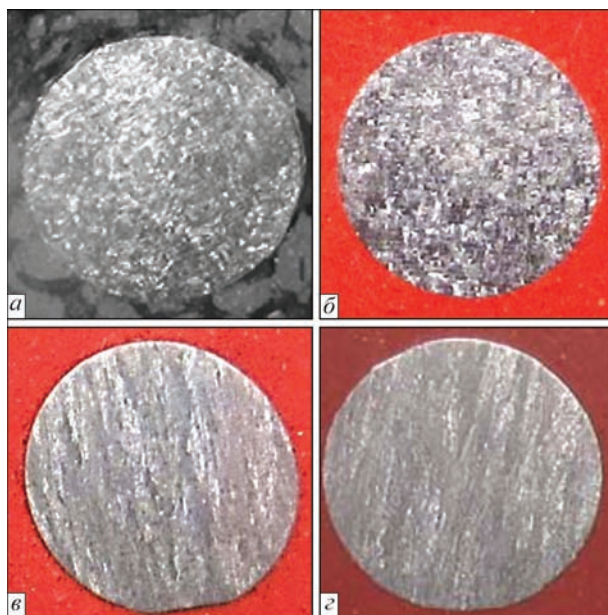


Рис. 1. Макроструктура зразків, отриманих за технологією SLM (а, б) та EBM (в, г) до ГПІ (а, в), після ГПІ (б, г),  $\times 3$

Фрактографічне дослідження зламів проводили на зруйнованих при механічних випробуваннях розривних та ударних зразках під бінокулярним мікроскопом «STEMI 2000-C».

Макроструктуру вивчали на шліфах, що були виготовлені із розривних та ударних зразків в поперечному та повздовжньому напрямках.

Дослідження мікроструктури проводили на травлених мікрошліфах у поперечному та повздовжньому перерізах на мікроскопі «Axio Observer. Dlm» при збільшенні  $\times 500$ .

**Результати досліджень.** За результатами випробувань встановлено, що хімічний склад обох варіантів виготовлення зразків за основними елементами задовільний, відповідає вимогам стандарту AMS 4928 для сплаву Ti-6Al-4V і знаходиться приблизно на одному рівні в усіх досліджуваних варіантах (табл. 1).

Візуальний огляд за допомогою бінокулярного мікроскопу показав, що макроструктура зразків досліджуваних технологій виготовлення як до, так і після ГПІ характеризується проявом макрозерна величиною 1...3 бала при оцінюванні за шкалою макроструктур, прийнятої для титанових сплавів в авіаційній промисловості (рис. 1).

Тріщин, розшарувань, неметалевих включень, що не допускаються, ділянок ліквідаційного походження, що видимі неозброєним оком, в макроструктурі досліджуваних зразків не виявлено.

Фрактографічне дослідження показало, що злами ударних та розривних зразків характеризуються дрібнокристалевою будовою та мають світ-

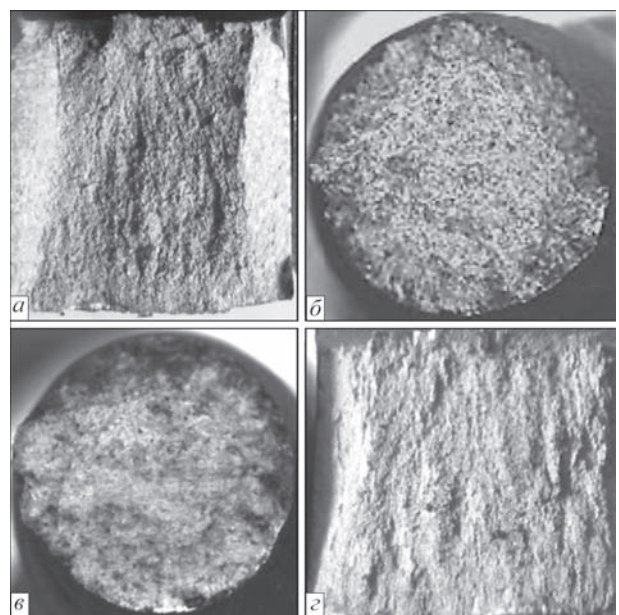


Рис. 2. Фрактографія зламів зразків, що отримані за технологіями SLM (а, б) та EBM (в, г) після механічних випробувань: а, б — до ГПІ; в, г — після ГПІ,  $\times 3$

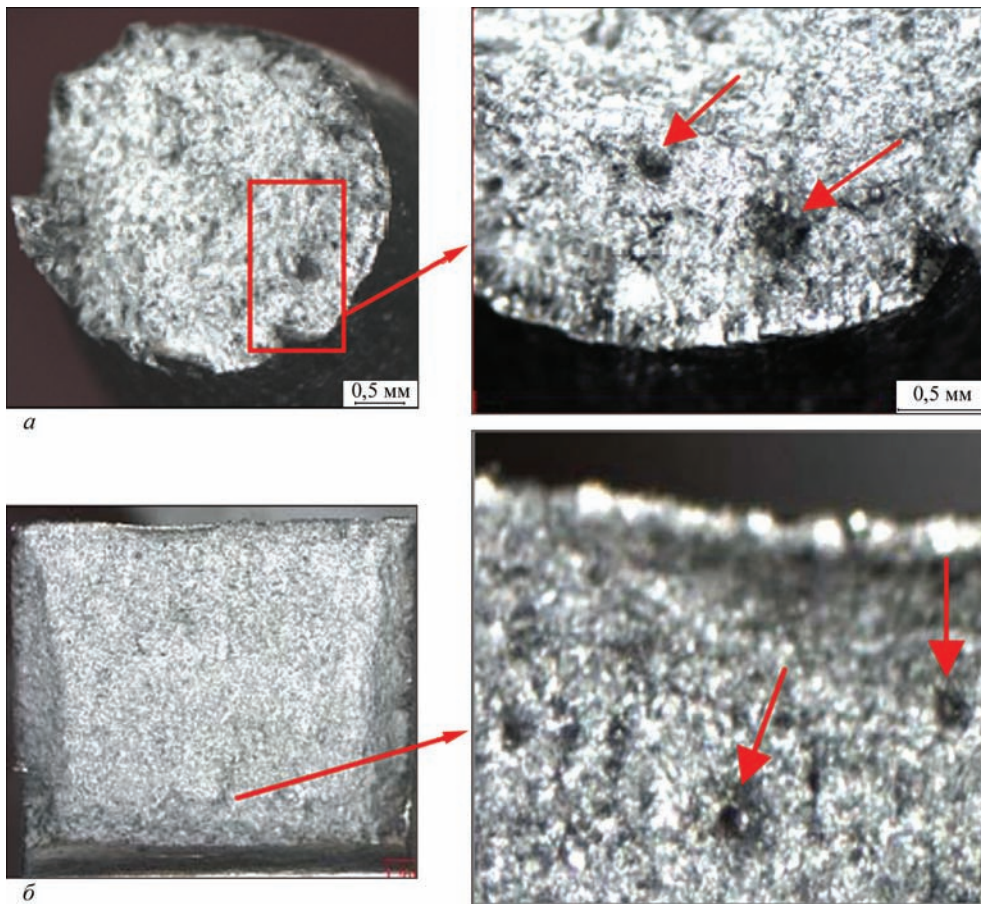


Рис. 3. Пори й включення в зламах зразків, що отримані за технологією SLM (а) та EBM (б) до ГПП лий відтінок (рис. 2). В декотрих зразках до ГПП виявлені поодинокі пори й округлі частинки, що виступають, котрі уявляють собою, ймовірно, несплавлені частинки вихідного порошку (рис. 3). Подібне характерно для зразків, що отримані за обома досліджуваними технологіями сплавлен-

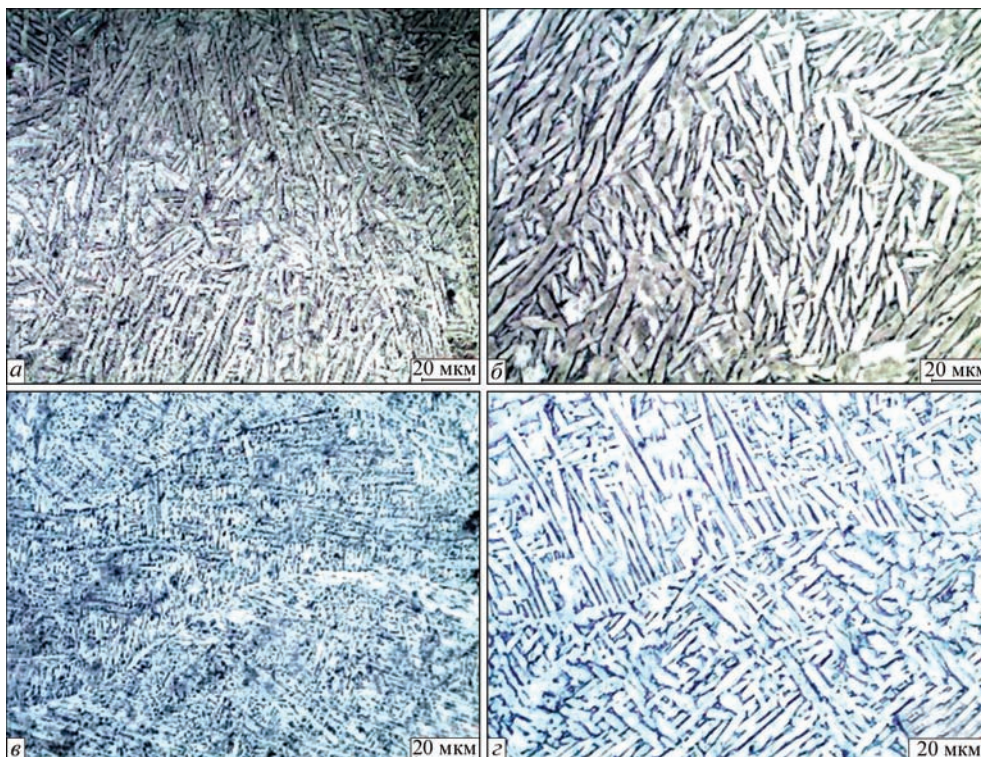


Рис. 4. Мікроструктура зразків, що отримані за технологіями SLM (а, б) та EBM (в, з) до ГПП (а, в), після ГПП (б, з)

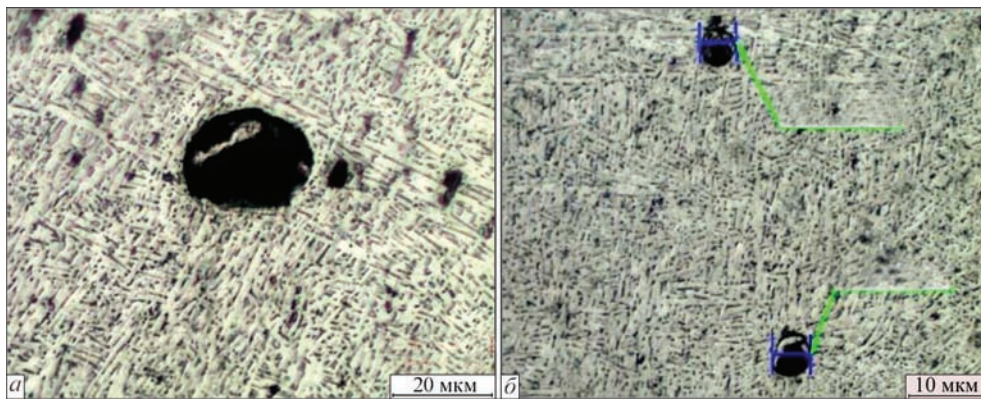


Рис. 5. Мікроструктура зразків, що отримані за технологією SLM (а) та EBM (б) до ГПП

**Т а б л и ц я 2. Механічні властивості дослідних зразків досліджуваних варіантів технології при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Варіант технології	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
SLM	961	922	15,6	39,0	33,1
EBM	1006	959	15,2	42,7	47,9
SLM	942	920	13,4	45,1	63,2
EBM	960	914	14,6	41,2	44,7
AMS 4928	$\geq 896$	$\geq 827$	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	–
ОСТ1 90002 (середньогабаритні штамповані зі сплаву ВТ6 після ТМО та старіння)	930...1180	–	$\geq 9$	$\geq 25$	$\geq 35$
ОСТ1 90006 (гарячекатаний пруток зі сплаву ВТ6)	930...1130	–	$\geq 10$	$\geq 35$	$\geq 35$

ня. В зламах зразків після ГПП пор та часток, що виступають не виявлено.

Мікроструктура зразків, що отримані за досліджуваними технологіями виготовлення, характеризується наявністю видовженої пластинчастої  $\alpha$ -фази у перетвореній епітаксально зрощеній  $\beta$ -матриці і є характерною для сплаву Ti–6Al–4V після термічної обробки (рис. 4). Пластинчата  $\alpha$ -фаза в структурі зразків, що пройшли ГПП, відрізняється більш широкими розмірами у порівнянні зі зразками до ГПП. Слід відмітити відсутність безперервного ланцюжка  $\alpha$ -фази на міжзеренних межах перетвореної  $\beta$ -фази. При металографічному дослідженні суттєвої різниці у мікроструктурі зразків у повздовжньому та поперечному перерізах не виявлено.

В зразках до ГПП при мікроаналізі виявлено одиничні дефекти у вигляді несплавлень й мікропор діаметром 4...32 мкм (рис. 5). Після проведення ГПП структура характеризується практично повною відсутністю подібного виду дефектів.

Механічні властивості зразків, що отримані з використанням обох технологій як до, так і після проведення ГПП, відповідають вимогам стандарту AMS 4928 і вітчизняних стандартів ОСТ1 90002 й ОСТ1 90006, що застосовуються при виготовленні відповідальних деталей авіаційного призначення і знаходяться приблизно на одному рівні (табл. 2).

Із результатів випробувань видно, що показники міцності зразків, що пройшли ГПП, дещо нижчі за показники міцності зразків, що не піддавалися ГПП, при цьому для значень характеристик пластичності й ударної в'язкості спостерігається зворотна залежність. Помітно вищі значення ударної в'язкості у зразках, що отримані за технологією SLM після ГПП, ймовірно пов'язані з утворенням більш брилистої й пластинчастої  $\alpha$ -фази і видовженими  $\beta$ -зернами, що формують колонії з більш постійним рівномірним розміром.

### Висновки

1. Таким чином, виготовлення деталей та заготовок за 3D технологіями з використанням у якості джерела енергії лазера або електронного променю забезпечує рівень механічних властивостей сплаву Ti–6Al–4V у відповідності до нормативної документації на продукцію авіаційного призначення.

2. Виявлення в зламах та в мікроструктурі пор і несплавлень гранул обумовлює обов'язкове проведення ГПП деталям відповідального призначення, що отримані методом 3D принтингу для суттєвого покращення структурного стану.

3. В рамках перспективних робіт при виготовленні деталей авіаційної техніки за досліджуваними технологіями автори планують проведення серії робіт по випробуванню виготовлення зразків та реальних деталей з гранул титанового сплаву

Ti–6Al–4V, що отримані плазмовим відцентровим розпиленням і характеризуються кращою сферичністю форми й відсутністю спадкових гранул.

#### Список літератури/References

1. Dovbysh, V.M., Zabednov, P.V., Zlenko, M.A. (2015) *Additive technologies and products from metal*. Moscow, GNTs RF FGUP NAMI [in Russian].
2. Edwards, P., O’Conner, A., Ramulu, M. (2013) Electron beam additive manufacturing of titanium components: Properties and performance. *J. of Manufacturing Sci. and Engin., Transact. of the ASME*, 135(6).
3. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T. et al. (2010) A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312.
4. Mohammadhosseini, A., Fraser, D., Masood, S., Jahedi, M. (2013) Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*, 17, 106–112.
5. Froes, F.H. (2013) Titanium powder metallurgy: Developments and opportunities in a sector poised for growth. *Powder Metallurgy Review*, 2(4), 29–43.
6. Burghardt Kloden. *Additive manufacturing — selective electron beam melting*. [http://ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/infoblatter/additive\\_manufacturing-electron\\_beam\\_melting\\_fraunhofer\\_ifam\\_dresden.pdf/](http://ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/infoblatter/additive_manufacturing-electron_beam_melting_fraunhofer_ifam_dresden.pdf/)

### ВЛИЯНИЕ ТИПА ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПРИ 3D ПРИНТИНГЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА Ti–6Al–4V

А. А. Педаш, В. В. Клочихин, Т. А. Митина, В. Г. Шило  
АО «МОТОР СИЧ».

69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В статье изучены состав, структура и свойства образцов из сплава Ti–6Al–4V, полученных по технологиям селективного лазерного и электронно-лучевого сплавления относительно производства деталей авиационного назначения. Проведено сравнительное исследование структуры и свойств образцов после термической обработки, присущей для сплава Ti–6Al–4V, до и после предварительного горячего изостатического прессования. Установлено, что появление в изломах и в микроструктуре пор и несплавлений гранул требует обязательно проведения горячего изостатического прессования деталей ответственного назначения, когда происходит устранение подобного вида дефектов и соответственно обеспечивается лучший комплекс характеристик прочности и пластичности. Библиогр. 6, табл. 2, ил. 5.

**Ключевые слова:** титановый сплав; аддитивные технологии; селективное лазерное плавление; электронно-лучевое плавление; микроструктура; механические свойства

### EFFECT OF TYPE OF POWER SOURCE AT 3D PRINTING ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ti–6Al–4V ALLOY COMPONENTS

A.A. Pedash, V.V. Klochikhin, T.A. Mitina, V.G. Shilo  
JSC «MOTOR SICH».

15 Motorostroiteley Ave., 69068, Zaporozhye. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

In the paper the composition, structure and properties of specimens of Ti–6Al–4V alloy, produced by technologies of a selective laser and electron beam melting are studied as-applied to manufacture of aircraft-purpose components. Comparative investigation of structure and properties of specimens after heat treatment, typical for alloy Ti–6Al–4V, before and after preliminary hot isostatic pressing, was carried out. It was found that the appearance of pores and lacks of fusion of granules in fractures and in microstructure requires the obligatory hot isostatic pressing of critical components to eliminate the above defects and to provide the better complex of characteristics of strength and ductility. 6 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

**Key words:** titanium alloy; additive technologies; selective laser melting; electron beam melting; microstructure; mechanical properties

Поступила 11.07.2018