

УДК 621.762

А.А. Лукьянов, Ю.А. Соколов

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

A.A. Lukianov, Yu.A. Sokolov

MECHANICAL PROPERTIES OF THE COMPOSITE MATERIALS PRODUCED BY SIB TECHNOLOGY

Исследованы механические свойства композиционных сплавов титана, полученных методом электронно-лучевого синтеза. Изучена возможность повышения износостойкости таких сплавов путем нанесения поверхностных покрытий из молибдена. Рассмотрены различные технологии нанесения покрытий. Установлено, что технология синтеза электронным лучом обеспечивает получение однородного композиционного материала. Послойный синтез электронным лучом позволяет получать требуемые механические свойства материалов. Сравнение композиционных материалов с компактными (тех же составов) показало, что они не уступают по механическим свойствам. Показана перспективность промышленного использования рассматриваемой технологии для получения материалов различного назначения.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ; ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

Mechanical properties of the titan composite alloys produced by the method of electron beam synthesis are investigated. It is studied the possibility of an increase of wear resistance of such alloys by drawing superficial coverings from molybdenum. Various technologies of drawing coverings are considered. It is discovered that the synthesis technology by an electronic beam provides homogeneous composite material. Layer-by-layer synthesis by an electronic beam enables to produce the demanded mechanical properties of materials. Comparison of composite materials with the compact ones of the same composition showed that they are highly competitive with mechanical properties. It is shown industrial application prospectivity of the technology considered, for obtaining materials of different function.

POWDER METALLURGY; COMPOSITE MATERIALS; ELECTRON BEAM SYNTHESIS; MECHANICAL PROPERTIES; STRUCTURAL MATERIALS.

Одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения является порошковая металлургия. Разработаны, используются или проходят промышленное опробование различные методы изготовления и компактирования порошков, а также соответствующее оборудование [1–4]. Это позволило значительно увеличить долю использования в промышленности изделий порошковой металлургии.

Новые возможности по получению изделий из порошка различного химического состава с программируемой структурой открывает создание и отработка технологии синтеза изделий

электронным лучом (СИЭЛ) [5–7], а также формирования на поверхности таких деталей покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами [8, 9]. Важным вопросом является оценка однородности и уровня механических свойств материалов, полученных методом СИЭЛ.

Цель данной работы — исследование механических свойств композиционного титанового сплава ВТ6, полученного методом послойного электронно-лучевого синтеза, а также оценка возможности нанесения на изделия из него износостойких молибденовых покрытий.

Результаты экспериментальных исследований

Титановый сплав ВТ6 имеет следующий химический состав (по ГОСТ 19807–91):

Ti.....	осн.
Al	5,3–6,8
V	3,5–5,3
Fe	< 0,3
C	< 0,1
Si	< 0,15
Zr	< 0,3
N	< 0,05
O	< 0,2
H	< 0,015

Он применяется для изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций и отдельных изделий ответственного назначения. В связи с этим к материалу предъявляются высокие требования по механическим свойствам (табл. 1).

Однако детали, полученные по технологии синтеза с помощью электронного луча, могут иметь свойства, отличающиеся от свойств компактного материала. Последнее связано с тем, что любые композиционные материалы имеют пористую структуру, поэтому их свойства могут быть хуже по сравнению с компактным материалом. Для конкурентоспособности технологии СИЭЛ по отношению к традиционным методам получения изделий из компактного материала необходимо, чтобы свойства деталей, полученных по технологии СИЭЛ, удовлетворяли или превышали требования, предъявляемые к компактным материалам.

Для оценки механических свойств изделий [10], полученных методом электронно-лучевого синтеза, в работе исследовали композиционный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V). Заготовки для исследования размером 10×70×3 мм синтезировали из гранул сплава ВТ6 методом послойного электронно-лучевого синтеза по следующему режиму: скорость перемещения луча — 4530 мм/с; ток луча — 19 мА; ускоряющее напряжение — 60 кВ; давление в рабочей камере — 1,3·10⁻³ Па.

Метод СИЭЛ осуществляет послойный синтез материала из сплава в виде порошка (гранул). В связи с этим можно ожидать значительную неравномерность свойств «по слоям» полученного образца. Выявить неоднородность свойств можно методом послойного измерения твердости.

Твердость синтезированного композиционного образца сплава ВТ6 в различных сечениях измеряли по шкале Виккерса на универсальном твердомере Zwick//Roell ZHU (рис. 1). Схема измерения твердости представлена на рис. 2. Результаты измерения получились следующие:

Номер точки (по рис. 2)	HV10, кгс/мм ²
<i>По горизонтальной оси</i>	
1	348
2	335
3	328
4	351
5	331
6	343

Таблица 1

Требования к механическим свойствам компактного сплава ВТ6

Вид изделия	ГОСТ	Предел прочности σ_B , МПа	Удлинение δ , %	Сужение в шейке ψ , %	KCU, Дж/см ²
Лист отожженный	22178–76	885	8	—	—
Пруток отожженный повышенного качества	26492–85	835–1050	6–10	20–30	30–40
Пруток после закалки и старения	26492–85	1080	4	12	20
Пруток отожженный	26492–85	835–885	6–8	15–20	25
Пруток после закалки и старения повышенного качества	26492–85	1080	6	20	25–30
Плита отожженная	23755–79	835–1080	6	12–16	30
Твердость, HV10					
Пруток после закалки и отпуска			310–382		
Штамповка после отжига			266–363		

7	354
8	348
9	327
10	344
11	348
12	346

По вертикальной оси

1	332
2	333
3	326
4	329
5	335
6	355
7	337

Из полученных результатов следует, что твердость по всем слоям исследованных образцов как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях имеет незначительные разбросы и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к компактному титановому сплаву ВТ6.

Механические свойства композиционного материала ВТ6 определяли согласно ГОСТ 1497–84 с использованием универсальной испытательной машины Zwick//Roell Z100 с максимальным усилием 10 тс (рис. 3). Для испытания из заготовки композиционного сплава ВТ6 изготавливали пятикратные плоские образцы: тип II, № 22 по ГОСТ 1497–84. Определяли следующие характеристики: условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$); предел прочности (σ_B); относительное удлинение после разрыва (δ). Относительное остаточное сужение в шейке после разрыва согласно ГОСТ 1497–84 на плоских образцах не определяется. Полученные при испытаниях диаграммы растяжения представлены на рис. 4, а механические свойства сплава — в табл. 2.

Испытания на ударную вязкость проводили согласно ГОСТ 9454–78 с использованием маят-

никового копра Zwick//Roell RKP 450 с максимальной запасенной энергией 450 Дж (рис. 5). Для испытания из заготовок композиционного сплава ВТ-6 изготавливали образцы: тип I по ГОСТ 9454–78. Результаты испытания представлены в табл. 5.



Рис. 1. Универсальный твердомер Zwick//Roell ZHU

При испытаниях на ударный изгиб получены следующие значения ударной вязкости композиционного сплава ВТ6:

KU , Дж	KCU , Дж/см ²
34,2	42,5
34,6	43,5

Таким образом, результаты испытаний показывают, что композиционный материал, полученный методом послойного электронно-луче-

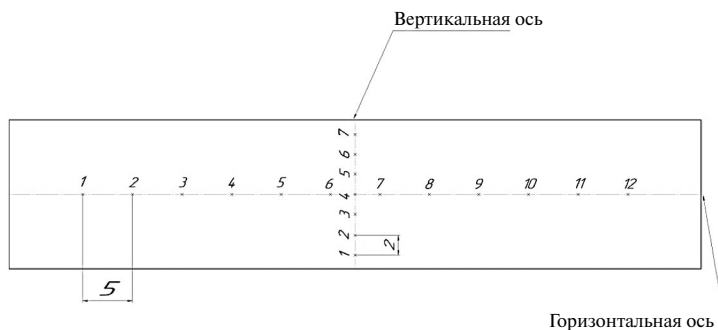


Рис. 2. Схема измерения твердости HV_{10} образца композиционного сплава ВТ6 (расстояние между замерами — в мм)



Рис. 3. Универсальная испытательная машина Zwick//Roell Z100

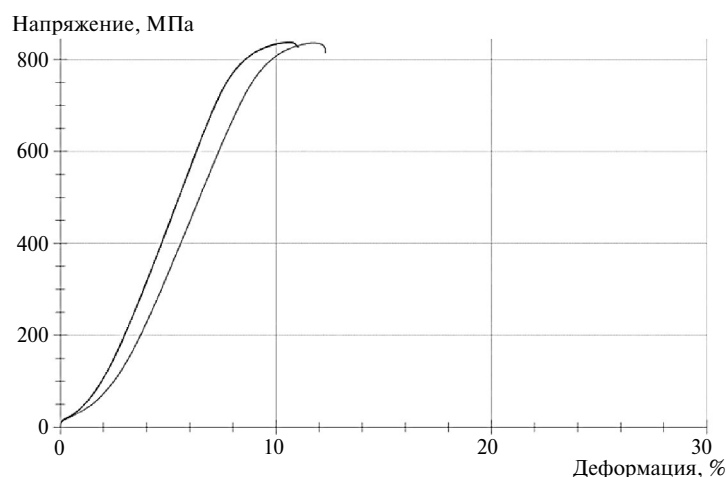


Рис. 4. Диаграммы растяжения образцов, полученных методом послойного электронно-лучевого синтеза из гранул титанового сплава VT-6

Таблица 2

Механические свойства композиционного сплава VT6 при испытаниях на статическое растяжение

№ образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	σ_p , МПа	δ , %
1	750	838	827	1,8
2	750	836	814	2,7
3	760	838	830	2,5

вого синтеза из гранул титанового сплава VT-6, является однородным и по уровню механических свойств удовлетворяет требованиям, предъявляемым к компактным изделиям из отожженного титанового сплава VT6. Это свидетельствует о перспективности применения технологии СИЭЛ для изготовления деталей ответственного назначения из конструкционных композиционных металлических материалов.

Технология электронно-лучевого синтеза позволяет послойно наносить гранулы различных металлов на поверхность изделия из другого металла и получать защитный слой заданной толщины с требуемыми свойствами.

Технологическая схема, представленная на рис. 6, показывает последовательность получе-

ния образцов методом послойного электронно-лучевого синтеза и плазменного нанесения на них порошковых покрытий. На первом этапе методом послойного электронно-лучевого синтеза изготавливали образец из гранул титанового сплава VT-6. На втором этапе на образец наносили слой из гранул молибдена методом газо-плазменного напыления.

Последовательность технологических операций получения готового изделия в этом случае включала:

1) синтез образца из гранул титанового сплава VT-6 размером $10 \times 10 \times 15$ мм. Режим обработки: скорость перемещения луча — 4530 мм/с, ток луча — 17 мА, ускоряющее напряжение — 60 кВ, давление в рабочей камере — $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па;



Рис. 5. Маятниковый копер Zwick//Roell RKP-450

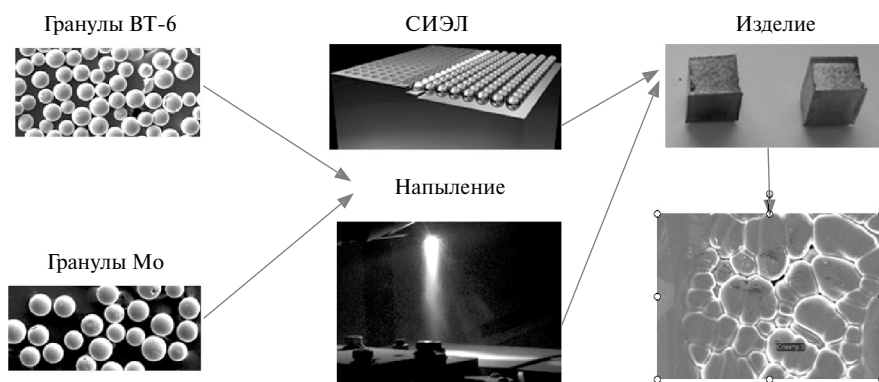


Рис. 6. Технологическая схема получения образцов из гранул титанового сплава VT6 на базе методов послойного синтеза и пайки

2) плазменное напыление слоя гранул из молибдена (100 % объемн.) на переднюю поверхность образца. Режим обработки: ток напыления — 550 А, среда — аргон.

При помощи гранул тугоплавких металлов можно получать особостойкие покрытия на основе оксидов, карбидов, нитридов, а также создание композиционных матриц и получение материалов с заранее заданными характеристиками.

Метод послойного электронно-лучевого синтеза позволяет получать композиционные материалы с однородными по сечению изделия структурой и свойствами, а также формировать

на их поверхности функциональные покрытия заданной толщины.

Экспериментально установлено, что механические свойства титанового сплава VT6, полученного методом синтеза электронным лучом, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к компактным изделиям из этого материала.

Технология синтеза электронным лучом перспективна для получения композиционных материалов из различных, в том числе тугоплавких, металлов и нанесения на них покрытий, а также для комбинированных технологий, сочетающих разные методы изготовления и обработки готовых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2-х томах. Т.1. Производство металлических порошков. М.: Изд-во МИСИС, 2001. 368 с.
2. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2-х томах. Т.2. Формование и спекание. М.: Изд-во МИСИС, 2002. 320 с.
3. **Герман Рендалл М.** Порошковая металлургия от А до Я: Учебно-справочное руководство / Пер. с англ. О.В. Падалко и Г.А. Либенсон. М.: ИД Интеллект, 2009. 336 с.
4. **Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжев Е.М., Кондратьев С.Ю.** Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 6. С. 12–16.
6. **Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В.** Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
7. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А.** Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148–155.
8. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632.
9. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
10. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политех. унта, 2011. 128 с.

REFERENCES

1. **Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V.** Protsessy poroshkovoy metallurgii. V 2-kh tomakh. T.1. Proizvodstvo metallicheskih poroshkov. M.: Izd-vo MISIS, 2001. 368 s. (rus.)
2. **Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V.** Protsessy poroshkovoy metallurgii. V 2-kh tomakh. T.2. Formovaniye i spekaniye. M.: Izd-vo MISIS, 2002. 320 s. (rus.)
3. **German Rendall M.** Poroshkovaya metallurgiya ot A do Ya. Uchebno-spravochnoye rukovodstvo / Per. s angl. O.V. Padalko i G.A. Libenson. M.: ID Intellekt, 2009. 336 s. (rus.)
4. **Kokorin V.N., Rudskoi A.I., Filimonov V.I., Bulyzhev Ye.M., Kondratiev S.Yu.** Teoriya i praktika protsessa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)
5. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskih smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)
6. **Rudskoi A.I., Kokorin V.N., Kondratiev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoymkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)
7. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)
8. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632.
9. **Kondratiev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)
10. **Kondratiev S.Yu.** Mekhanicheskiye svoystva metallov: uchebnoye posobiye. SPb.: Izd-vo Politekh. unta, 2011. 128 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛУКЬЯНОВ Алексей Александрович — кандидат технических наук ассистент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: lookianov0@gmail.com

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

AUTHORS

LUKIANOV Aleksei A. — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: lookianov0@gmail.com

SOKOLOV Yurii A. — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru