

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Ti–6Al–4V, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ПОРОШКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ*

О. М. Ивасишин¹, П. Е. Марковский¹, Д. Г. Саввакин¹,
В. И. Бондарчук¹, А. А. Стасюк¹, С. В. Приходько²

¹Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины.

03142, г. Киев, бульв. Академика Вернадского, 36. E-mail: ivas@imp.kiev.ua

²Инженерно-материаловедческий факультет, Университет Калифорнии.
90095, Лос-Анджелес, США. E-mail: prikhodko.sergey@gmail.com

Получены 2–3-слойные структуры, состоящие из сплава Ti–6Al–4V и композитов на его основе с 5...10 % частиц TiB или TiC, методом холодного прессования и вакуумного спекания многокомпонентных порошковых смесей на основе наводороженного порошка титана. Изучены закономерности эволюции микроструктуры, пористости и усадки при спекании слоев порошковых смесей разного состава. Установлено, что добавление упрочняющих частиц карбида титана и борида титана в порошковые смеси влияет на их усадку, что создает риск разрушения многослойных структур из-за разницы в усадке прилегающих слоев разного состава. Оптимизацией параметров порошковой технологии получены слоистые материалы с заданной микроструктурой, обеспечивающей желаемое сочетание механических и эксплуатационных характеристик. Библиогр. 4, табл. 2, ил. 6.

Ключевые слова: многослойные структуры; порошковая смесь; композит; спекание; микроструктура

Материалы на основе титана благодаря сочетанию высокой удельной прочности, пластических характеристик и коррозионной стойкости находят широкое применение в авиации, машиностроении, химической промышленности, медицине, оборонной сфере [1, 2]. В то же время в ряде экстремальных условий эксплуатации (например, высокопрочные детали, работающие при повышенном износе, защитные броневые покрытия) однородные сплавы или металломатричные композиты на основе титана не обеспечивают требуемой комбинации высоких показателей прочности, твердости и износостойкости при достаточных характеристиках пластичности и трещиностойкости. Требуемого комплекса высоких характеристик в одном изделии можно достичь путем создания многослойных материалов, индивидуальные слои в которых отличаются по химическому составу и/или микроструктуре, и, соответственно, по своим механическим свойствам. Так, например, комбинация слоев металломатричных композитов, упрочненных твердыми высокомодульными частицами TiB или TiC, и слоя относительно пластичного сплава является перспективной для получения требуемого сочетания прочности, твердости и вязких характеристик. Требуемого уровня изно-

стойкости изделий в машиностроении и бронестойкости защитных титановых плит в оборонной промышленности можно достичь упрочняя поверхность сплава слоем (или несколькими слоями) металломатричных композитов. Учитывая, что технологии порошковой металлургии позволяют создавать слоистые структуры экономически эффективным путем, целью данного исследования было получение 2–3-слойных материалов, состоящих из сплава Ti–6Al–4V и композитов на его основе с 5...10 % частиц TiB или TiC, методом прессования или спекания многокомпонентных порошковых смесей.

Экспериментальная часть. В работе получены образцы, состоящие из слоев сплава Ti–6Al–4V (мас. %) и композитов на его основе с добавками 5...10 % (по объему) упрочняющих частиц TiB или TiC. Каждый слой получали из смесей на основе наводороженного порошка титана (гидрида титана TiH₂) с добавками порошковой лигатуры 60 % Al–40 % V. Для создания слоев композитов дополнительно добавляли порошки TiC или TiB₂, который формирует частицы TiB при высоких температурах вследствие реакции TiB₂ + Ti → 2TiB. Размеры порошковых частиц основы

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

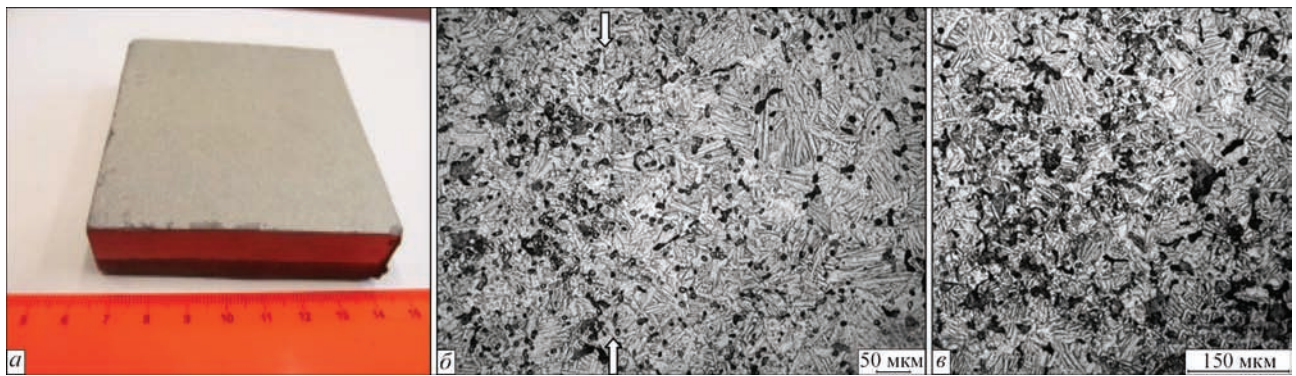


Рис. 1. Внешний вид спеченной двухслойной плиты (а) из сплава Ti–6Al–4V (верхний слой) и композита Ti–6Al–4V–10 % TiC (нижний слой); микроструктура границы раздела (показана стрелками) между слоями (б) и слоя композита Ti–6Al–4V–10 % TiC (в)

в различных экспериментах составляли от менее 40 до 100...150 мкм, размеры частиц лигатуры 60 % Al–40 % V — менее 63 мкм, а карбида титана и диборида титана — менее 30 мкм. Порошок гидрида титана использовали как основу смесей, учитывая его преимущество [3, 4] с точки зрения активации спекания порошков, очищения их от примесей водородом, и, в итоге, достижения лучшего комплекса механических свойств конечных материалов. В отдельных экспериментах вместо гидрида титана использовали титановый порошок тех же размеров для сравнения и изучения влияния водорода. Смесей, соответствующие каждому слою, готовили отдельно, после чего их последовательно засыпали в пресс-форму и одинаково прессовали при комнатной температуре при давлениях 150...650 МПа, получая 2–3-слойные образцы. Спрессованные призматические заготовки размерами 65×10×10 мм и плиты 90×90 и толщиной 12...20 мм спекали в вакуумной печи при 1250 °C в течение 4 ч для одновременного удаления водорода и формирования массивного микроструктурно однородного материала в каждом слое при достаточной адгезии между ними.

Микроструктуру спеченных слоистых материалов исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Механические свойства оценивали как для материала каждого индивидуального слоя (твердость по Виккерсу, свойства на растяжение на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4 мм, выточенных из соответствующего слоя), так и для двухслойных образцов методом трехточечного изгиба.

Результаты и обсуждение. Для достижения максимально высокого комплекса механических характеристик необходимо получение при спекании химически и микроструктурно однородного материала (сплав или композит) в каждом слое, включая однородное распределение упрочняю-

щих частиц в композитных слоях, при минимальной остаточной пористости, а также обеспечение достаточной прочности связей между слоями без трещин и повышенной пористости на границе раздела. Учитывая специфику подхода, а именно, использование наводороженного порошка титана, важным условием является практически полное удаление водорода в процессе вакуумного спекания (до концентрации менее 0,01 мас. %), чтобы избежать проявления водородной хрупкости. Удовлетворение этим критериям необходимо для достижения высокого комплекса характеристик многослойного материала в целом.

При создании 2- и 3-слойных материалов, включающих слои металломатричных композитов с 5 и 10 % TiC, спеченные образцы отвечали всем вышеприведенным критериям (рис. 1). Достаточно однородная микроструктура при наличии 3,5...4,0 % остаточных пор была получена в каждом слое без трещин и избыточной пористости на поверхности раздела слоев сплава Ti–6Al–4V и композитов Ti–6Al–4V–(5...10 %)TiC. Линейная усадка при спекании каждого слоя была в пределах 15,1...15,7 % . Такая значительная величина усадки образцов объясняется уменьшением объема каждой частички гидрида титана в процессе удаления водорода и собственно спеканием порошковых смесей. Важно отметить, что добавление в смеси 5...10 % частиц карбида титана, которые практически инертны по отношению к матрице сплава Ti–6Al–4V при спекании, крайне незначительно влияет на усадку порошковых прессовок и конечную пористость соответствующих слоев. Таким образом, были успешно получены образцы со слоистой структурой, упрочненные частицами TiC, при хорошей интеграции слоев сплава и композитов (рис. 1).

При спекании слоистых образцов, которые содержали композиты, упрочненные частицами борида титана, ситуация была принципиально иной.



Рис. 2. Внешний вид спеченных двухслойных образцов: 1 — Ti-6Al-4V; 2 — Ti-6Al-4V-10TiB

Данные образцы деформировались при спекании с появлением трещин между слоями различного состава (рис. 2). Дилатометрические исследования при нагреве монослойных порошковых прессовок различного состава показали, что если величина усадки гидроксида титана и смесей на его основе, соответствующих сплаву Ti-6Al-4V и композиту Ti-6Al-4V-10 % TiC достаточно близки, то смеси, содержащие бориды, характеризуются значительно меньшей усадкой (рис. 3). При температурах выше 900 °C, когда десорбция водорода уже завершилась, развивается реакция $TiB_2 + Ti \rightarrow 2TiB$, что сопровождается значительным увеличением пористости (рис. 4), и, как следствие, в этом температурном интервале вместо усадки наблюдается увеличение линейных размеров (и объема) смесей, состав которых соответствует композитам Ti-6Al-4V-x % TiB (рис. 3). Более того, эффект «распухания» возрастает с увеличением содержа-

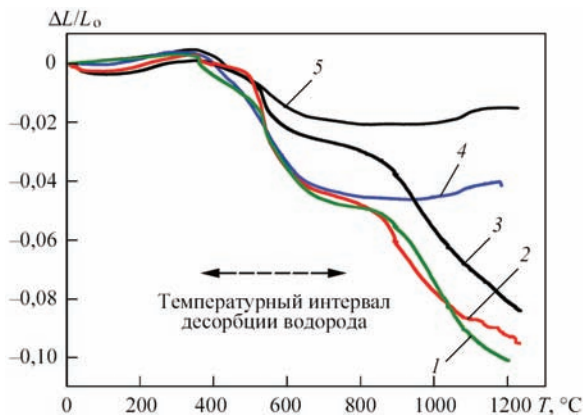


Рис. 3. Изменение линейных размеров при нагреве порошковых прессовок различного состава на основе гидроксида титана: 1 — Ti-6Al-4V; 2 — TiH_2 ; 3 — Ti-6Al-4V-10 % TiC; 4 — Ti-6Al-4V-10 % TiB; 5 — Ti-6Al-4V-20 % TiB (композит с 20 % TiB является модельным материалом, использованным для изучения влияния содержания боридов на усадку)

ния боридных частиц. При нагреве многослойных структур существенные различия в величинах линейной усадки прилегающих слоев (15...17 % для сплава и 8...11 % для композитов с частицами TiB) приводят к возникновению напряжений при спекании, нарушающих связь между слоями.

Из полученных результатов сделан вывод о необходимости контролируемо регулировать усадку при спекании прилегающих слоев сплава и композита с частицами борида титана для обеспечения близких величин их усадки. Известно, что влиять на усадку при спекании порошковых прессовок можно, используя в качестве основы смесей вместо гидроксида титана титановый порошок, спекание которого характеризуется существенно меньшими объемными эффектами, а также изменяя давление прессования смесей (рис. 5, а) и размеры порошковых частиц (рис. 5, б). На рис. 5, а на примере двухслойных образцов (сплав/композит с 10 % TiB) показано влияние давления прессования порошков и наличия в них водорода на изменение величины усадки прилегающих слоев. Из данных результатов следует, что, в принципе, комбинируя эти два параметра, можно достичь достаточно близкой величины усадки слоев сплава и композита с 10 % TiB, однако при достаточно высоких давлениях прессования, что не всегда достижимо при изготовлении образцов больших размеров. Поэтому с нашей точки зрения наиболее перспективным методом воздействия на величину усадки отдельных слоев (рис. 5, б) является использование в каждом слое разных строго определенных размеров порошка основы (гидрида титана или титанового). Так, чтобы уравнивать усадку прилегающих слоев разного состава рекомендо-

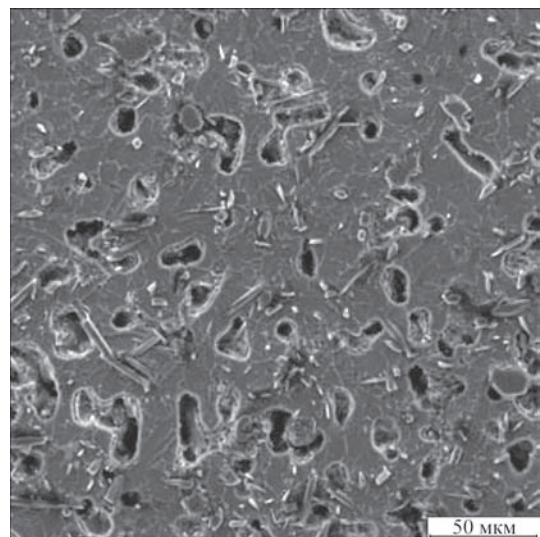


Рис. 4. Микроструктура спеченного композита Ti-6Al-4V-10 % TiB

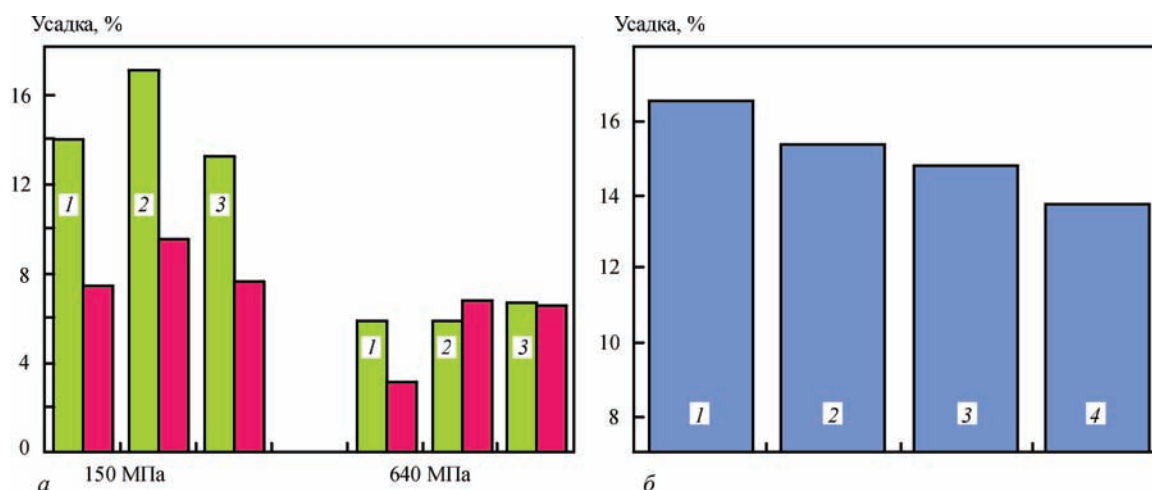


Рис. 5. Величина усадки двухслойных образцов (светлый — слой сплава, темный — композита с 10 % TiB) на основе порошка титана (1), гидрида титана (2), титана для изготовления сплава и гидрида для слоя композита (3) при разных давлениях прессования (а) и монослоев на основе гидрида титана различной дисперсности (б): 1 — < 40; 2 — < 100; 3 — 80...100; 4 — 100...125 мкм

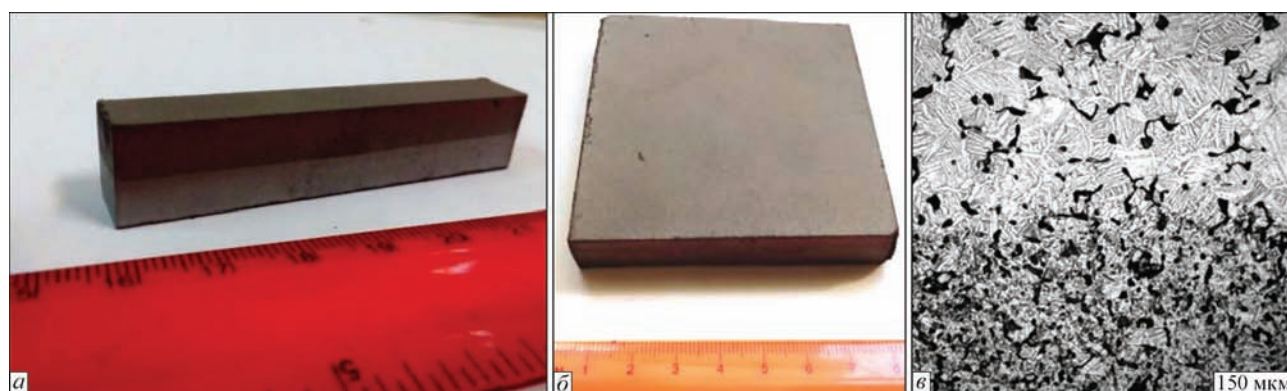


Рис. 6. Двухслойные образцы Ti-6Al-4V/Ti-6Al-4V-10 % TiB после оптимизации технологических параметров (а, б) и оптимизированная микроструктура переходного слоя (в)

вано использовать дисперсный порошок основы для увеличения усадки смесей с боридами. В то же время, относительно крупный порошок основы используется для снижения величины усадки слоя, соответствующего сплаву Ti-6Al-4V.

Оптимизацией указанных технологических параметров получены двухслойные материалы Ti-6Al-4V/Ti-6Al-4V + (5...10 %)TiB с близкой усадкой прилегающих слоев, что обеспечило отсутствие искажения формы и растрескивания между слоями при спекании (рис. 6).

По оптимальным технологическим параметрам для каждого слоя в зависимости от его состава получены монослойные образцы для предварительной оценки механических свойств (табл. 1). В данной таблице показаны свойства материала Ti-6Al-4V (образец 1), полученного по данной гидридной технологии [4]. В настоящей работе при подборе оптимальных параметров изготовления слоистых структур использовали достаточно крупные порошки гидрида титана и низкое (150 МПа) давление при прессовании порошковых смесей,

Таблица 1. Механические свойства спеченных монослойных материалов

Номер образца	Материал	Пористость, %	Твердость, HV	σ_b , МПа	ϵ , %
1	Ti-6Al-4V (результаты [4])	1,5...1,0	320...340	940...1000	10...14
2	Ti-6Al-4V	3,6	299	969	8,3
3	Ti-6Al-4V	1,8	345	1034	7,2
4	Ti-6Al-4V-5TiC	3,8	333	708	<1
5	Ti-6Al-4V-10TiC	3,6	373	618	0
6	Ti-6Al-4V-5TiB	4,5	327	847	0
7	Ti-6Al-4V-10TiB	8	324	512	0

Таблиця 2. Результаты испытаний на трехточечный изгиб двухслойных образцов

Номер образца	Слой композита	$\sigma_{изг}$, МПа	ϵ , %
1	Ti-6Al-4V-5TiC	2140	18,5
2	Ti-6Al-4V-10TiC	2158	14,0
3	Ti-6Al-4V-5TiB	1710	10,3
4	Ti-6Al-4V-10TiB	1660	9,0

вследствие чего полученный сплав Ti-6Al-4V (образцы 2, 3) характеризовался повышенной остаточной пористостью (1,8...3,6 %). Такое повышение пористости привело к некоторому снижению механических свойств сплава Ti-6Al-4V при испытаниях на растяжение. Добавки частиц TiC или TiB при изготовлении композитов (образцы 4-7) должны повышать твердость и прочность, однако этот позитивный эффект, как правило, подавляется повышенной пористостью, имеющей особенно негативное влияние на композиты с боридными частицами.

В то же время комбинация двух слоев (сплав Ti-6Al-4V и композиты на его основе) позволяет достичь обнадеживающих результатов при испытаниях на трехточечный изгиб (табл. 2), что особенно заметно для композитов с частицами TiC. Твердый слой композита и пластичный слой сплава совместно создают достаточный баланс прочностных и пластических характеристик.

По разработанной технологии успешно изготовлены двух- и трехслойные плиты (рис. 1, а, б, в) для баллистических испытаний. Проведенные испытания показали, что спеченные плиты со слоистой структурой способны выдерживать баллистический удар, при этом их защитные характе-

ристики лучше, чем у однородных плит такой же толщины, изготовленных из литого или горячедеформированного сплава Ti-6Al-4V.

Выводы

1. Материалы, имеющие слоистую структуру, на основе сплава Ti-6Al-4V и композитов с частицами TiB и TiC успешно получены методом холодного прессования и вакуумного спекания порошковых смесей.

2. Установлены оптимальные технологические параметры (размер частиц, условия прессования смесей и их спекания), которые позволяют получить однородную микроструктуру и желаемые механические свойства в пределах каждого слоя при требуемой адгезии между слоями разного химического состава.

3. Проведены баллистические испытания, которые подтвердили преимущество полученных слоистых структур по сравнению с однородным литым/горячедеформированным сплавом Ti-6Al-4V.

Работа выполнена в рамках гранта НАТО G5030 (2016-2018) программы «НАТО за мир и безопасность».

Список литературы/ References

- Lutjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium*. Berlin Heidelberg: Springer, Second edition.
- Montgomery, J.S., Wells, M.G.H. (2007) Titanium armor applications in combat vehicles. *JOM*, 53(4), 29-32.
- Ivasichin, O.M., Shpak, A.P., Savvakina, D.G. (2006) Economy technology of production of titanium parts by powder metallurgy method. *Titan*, 1, 31-39 [in Russian].
- Ivasishin, O.M., Savvakina, D.G., Moxson, V.S. (2007) Production of titanium components from hydrogenated titanium powder: Optimization of parameters. *Ti-2007 Science and Technology*. In: Proc. of 11th World Conf. on Titanium (Kyoto, Japan). *Japan Institute of Metals*, 1, 757-760.

МІКРОСТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V, ОТРИМАНИХ ЗА ПОРОШКОВОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

О. М. Івасишин¹, П. Є. Марковський¹, Д. Г. Саввакін¹, В. І. Бондарчук¹, О. О. Стасюк¹, С. В. Приходько²

¹Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 36. E-mail: ivas@imp.kiev.ua

²Інженерно-матеріалознавчий факультет, Університет Каліфорнії.

90095, Лос-Анджелес, США. E-mail: prikhodko.sergey@gmail.com

Отримані 2-3 шарові структури, що складаються з сплаву Ti-6Al-4V і композитів на його основі з 5...10 % частинок TiB або TiC, методом холодного пресування та вакуумного спікання багатоконпонентних порошкових сумішей на основі наводненого порошку титану. Досліджено закономірності еволюції микроструктури, пористості та усадки при спіканні шарів порошкових сумішей, які відповідають сплаву та композитам. Встановлено, що додавання частинок карбіду титану та бориду титану до порошкових сумішей впливає на їх усадку, що створює ризик руйнування багатощарових структур внаслідок різниці в усадці прилягаючих шарів різного складу. Оптимізацією параметрів порошкової технології отримано шарові матеріали із заданою микроструктурою, що забезпечує бажаний комплекс механічних та експлуатаційних характеристик. Бібліогр. 4, табл. 2, іл. 6.

Ключові слова: багатощарові структури; порошкова суміш; композит; спікання; микроструктура

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTILAYER MATERIALS ON Ti-6Al-4V ALLOY BASE, PRODUCED BY POWDER TECHNOLOGY

O.M. Ivasishin¹, P.E. Markovsky¹, D.G. Savvakina¹, V.I. Bondarchuk¹, A.A. Stasyuk¹, S.V. Prikhodko²

¹G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine.

36 Academician Vernadsky Blvd., 03142, Kyiv. E-mail: ivas@imp.kiev.ua

²Engineering-Materials Science Faculty, Californian University

90095, Los-Angeles, USA. E-mail: prikhodko.sergey@gmail.com

The 2–3-layer structures, consisting of Ti-6Al-4V alloy and composites on its base with 5...10 % particles of TiB or TiC, were produced by the method of cold pressing and vacuum sintering of multi-component powder mixtures on the base of hydrogenized titanium powder. Laws of evolution of microstructure, porosity and shrinkage in sintering of layers of powder mixtures of different composition were studied. It was found that adding of hardening particles of titanium carbide and titanium boride into powder mixtures has an effect on their shrinkage, that causes the risk of fracture of multilayer structures due to difference in shrinkage of adjacent layers of different composition. By optimizing the parameters of powder technology, the laminar materials were produced with a preset microstructure, providing the desired complex of mechanical and service characteristics. 4 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Key words: multilayer structures; powder mixture; composite; sintering; microstructure

Поступила 12.07.2018

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Государственное хозрасчетное предприятие «Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины» (МЦ ЭЛТ) существует с 1994 г. и ведет систематические научные исследования и разработки новых материалов и защитных покрытий, получаемых с использованием электронно-лучевых технологий. Разработаны научные основы получения аморфных, нанокристаллических, дисперсноупрочненных, микрослойных, пористых и градиентных материалов и покрытий.

Технологии для нанесения градиентных защитных покрытий обеспечивают более высокую степень повторяемости состава, структуры и долговечности по сравнению с покрытиями, получаемыми по традиционной технологии.



В центре разработана технология многослойного демпфирующего и эрозионностойкого градиентного наноструктурного покрытия для защиты лопаток из титановых сплавов.

В настоящее время 16 сконструированных и изготовленных в МЦ ЭЛТ электронно-лучевых установок успешно эксплуатируются в США, Канаде, Китае и Индии. За последние годы вместе с электронно-лучевыми установками продано четыре лицензии на право промышленного использования патентов для осаждения градиентных термобарьерных покрытий с техническим сопровождением и обучением.

В МЦ ЭЛТ ведутся разработки гибридных электронно-лучевых технологий, объединяющих физические и химические процессы осаждения неорганических веществ в вакууме, которые являются реальной основой для дальнейшего научно-технического и экономического прогресса для получения защитных покрытий в различных областях современного машиностроения.

В последнее время в МЦ ЭЛТ получило развитие новое направление — электронно-лучевая технология простых и композиционных нанопорошков и наножидкостей (коллоидов), а также наноструктурных композиций растительных экстрактов с наночастицами металлов для медицины и сельского хозяйства.