

ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСАЦИОННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ВТ6*

К.Ю. Яковчук¹, А.В. Микитчик¹, Ю.Э. Рудой¹, Ю.Ф. Луговской²

¹Государственное предприятие «Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины».

03150, г. Киев, ул. Горького (Антоновича), 68. E-mail: mykytchyk@paton-icebt.kiev.ua

²Институт проблем материаловедения НАН Украины.

03680, г. Киев, ул. Академика Кржижановского, 3. E-mail: lugovskoi_u@ukr.net

Рассмотрено влияние многослойных функциональных (демпфирующих и эрозионностойких) покрытий толщиной 28...96 мкм на многоцикловую усталость образцов сплава ВТ6. Покрытия получены методом электронно-лучевого испарения и последующей конденсации из паровой фазы (ЕВ-PVD) на подложки из титанового сплава ВТ6. Проведено исследование многоцикловой усталости образцов при комнатной температуре путем возбуждения в них резонансных изгибных колебаний на первой (не разрушающие напряжения) и второй формах колебаний при частотах 0,4 и 2,0 кГц соответственно на базе 10^7 циклов. Установлено, что осаждение однослойных покрытий из V_4C на образцы из сплава ВТ6 нецелесообразно по причине слабой адгезии покрытия (угол изгиба не превышал 4°). Использование внутреннего связующего слоя (Ti, Ag, Hf толщиной 1...3; 2,5...15,0; 1...2 мкм соответственно) повысило адгезию покрытия (угол изгиба составлял $20...25^\circ$), при этом предел выносливости образцов снизился на 29...33 % по сравнению со сплавом без покрытия. Показано, что внутренний связующий слой из Cu или AgCu обеспечивает высокую адгезию (угол изгиба достигал $36...48^\circ$), однако предел выносливости снизился на 33...49 % вследствие быстрого проникновения усталостной трещины через этот внутренний связующий слой в сплав ВТ6. Показано, что применение многослойного внутреннего связующего слоя в покрытиях типа Hf/Ti/Hf/Ti/Cr или AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/ V_4C с оптимальным соотношением толщин индивидуальных слоев позволяет обеспечить предел выносливости на уровне 73...80 % от уровня предела выносливости образцов без покрытий. Установлено, что многослойное демпфирующее покрытие Hf/Ag/Ni/Cr толщиной 52 мкм, испытанное при одинаковом уровне мощности, подводимой от виброэлектродинамического стенда к образцу для возбуждения колебаний, обеспечивает снижение амплитуды колебаний (действующих напряжений в образце) на 23...56 % по сравнению с образцами без покрытий. С учетом этого целесообразно для оценки эффективности демпфирования различных вариантов покрытий и их влияния на многоцикловую усталость проводить вибрационные испытания образцов при одном и том же уровне мощности, подводимой к образцу для возбуждения колебаний. Библиогр. 18, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: сплав; электронно-лучевое испарение и осаждение в вакууме; многоцикловая усталость; защитные (функциональные) покрытия; многослойные покрытия; усталостная трещина; компрессорные лопатки

Сплавы на основе титана типа ВТ6 (Ti–6 % Al–4 % V, здесь и далее по тексту составы указаны в мас. %) широко используются для изготовления высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей, например лопаток компрессора. Одним из актуальных направлений повышения долговечности таких деталей является нанесение на их поверхность функциональных (демпфирующих и эрозионно-стойких) покрытий, обеспечивающих как снижение вибрационных резонансных колебаний, так и защиту от эрозионного износа [1–7].

Многослойные покрытия [5–7] с внешним слоем хрома или наноструктурного карбида бора, осаждаемые методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме (ЕВ-PVD), обла-

дают высокими демпфирующими свойствами и эрозионной стойкостью. Особенностью таких покрытий является использование в каждом последующем слое материала с более высоким модулем упругости (от сплава ВТ6 к внешнему слою), а также наличие характерной для процесса ЕВ-PVD столбчатой микроструктуры слоев покрытия и субмикронных двойников в связующем подслое. Благодаря такой микроструктуре энергия вибрационных колебаний поглощается материалом покрытия как за счет внутреннего трения (между слоями покрытия, а также между покрытием и подложкой), так и за счет рассеивания энергии колебаний на многочисленных дефектах столбчатой структуры (межстолбчатой пористости) [7].

*По материалам доклада, представленного на IX Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., Одесса, Украина.

Сведения о влиянии конденсационных покрытий (PVD или EB-PVD) различной толщины на усталостные характеристики сплавов типа ВТ6 достаточно противоречивые, свидетельствующие о возможности как негативного, так и позитивного влияния [8–10].

Как правило нанесение подобных защитных покрытий снижает усталостную прочность материала подложки [8]. Объясняется это тем, что в условиях циклических нагрузок присутствующие в покрытии межкристаллитные (межстолбчатые) пустоты, ориентированные по нормали к подложке, являются очагами зарождения усталостных трещин, которые в условиях вибраций при резонансе быстро распространяются в подложку [10].

Следует отметить также, что осаждение методом PVD тонких (толщиной около 10 мкм) наноструктурных квазикристаллических покрытий Al–Cu–Fe с медным связующим слоем [11] и нанесение нитридных или карбидных покрытий позволяют несколько повысить предел выносливости сплава ВТ22 с указанным покрытием по сравнению с таковым без покрытия [12].

Цель данной работы — оценка механических свойств (в первую очередь усталости) образцов из сплава ВТ6 без покрытия и с многослойными функциональными покрытиями, полученными по методу EB-PVD.

Материалы и методика эксперимента. Объектом исследования являлись образцы из сплава ВТ6 в форме пластин размером 55,5×4,8×1,0 мм, на одну из сторон которых наносили покрытие. Перед осаждением покрытия поверхность образцов подвергали электролитической полировке, после чего уровень шероховатости поверхности образцов, измеренный с помощью профилометра Jenoptik Hommel-Etamic W5 (Германия), составлял $R_a = 0,27 \dots 0,3$ мкм.

Нанесение покрытий производили в электронно-лучевой установке [13], при этом оснастка с закрепленными в ней образцами располагалась над карусельным испарителем и вращалась со скоростью 25 об/мин, температура образцов в процессе нанесения покрытия составляла 450...500 °С.

Многослойные покрытия получали за один технологический цикл путем последовательного электронно-лучевого испарения в вакууме соответствующих материалов в виде таблеток, слитков или гранул [6], а именно: меди, никеля, хрома, титана, серебра, серебряно-медного припоя типа ПСр 72 и карбида бора, с последующим их осаждением из паровой фазы на образцы.

Адгезию покрытия с подложкой оценивали при испытаниях образцов на изгиб с использованием трехточечной схемы нагружения [6]. Критерием уровня адгезии являлся угол загиба образца, при котором происходило отслоение или скалывание покрытия.

Структуру и состав покрытий изучали по традиционной методике с использованием оптической и электронной микроскопии [6].

Усталостные испытания проводили при комнатной температуре путем плоского изгиба при консольном закреплении образца и возбуждении в нем резонансных изгибных колебаний (f) на их первой (не разрушающие напряжения) и второй формах на частотах 0,4 и 2,0 кГц на электродинамическом вибростенде ВЭДС-200 по методике и на установке, описанных в работах [14, 15]. Максимальное напряжение (σ_a) в опасном сечении образца рассчитывали при измерении амплитуды колебаний образца в двух точках: на его конце — A_0 и в месте закрепления — A_1 :

$$\sigma_a = 2\pi f A_0 (3E\rho)^{1/2} [U(kx) + PV(kx)]. \quad (1)$$

Коэффициент P и аргумент kx функций А.Н. Крылова определяли из выражения

$$P = -T(kx)/U(kx) = [-S(kl) - A_0/A_1]/T(kl). \quad (2)$$

При этом $S(kx) = 0,5[ch(kx) + \cos(kx)]$, $T(kx) = 0,5[sh(kx) + \sin(kx)]$, $U(kx) = 0,5[ch(kx) - \cos(kx)]$, $V(kx) = 0,5[sh(kx) - \sin(kx)]$ известные в теории колебаний; l — длина консольной части стержня; x — координата сечения по длине стержня, начиная от его свободного конца до места разрушения; E — модуль Юнга и ρ — плотность материала образца.

Величину k определяли из выражения

$$k^4 = f^2 b H \rho / EI = 12 f^2 H \rho / E, \quad (3)$$

где $I = bH^3/12$ — момент инерции прямоугольного сечения стержня; b — его ширина; H — толщина. Для первой формы колебаний и жесткой заделке величина $[U(kx) + PV(kx)]$ равна единице. Для второй формы колебаний и упругой заделки величина $[U(kx) + PV(kx)]$ зависит от соотношения A_0/A_1 . Анализ систематической погрешности величин, входящих в формулу для расчета напряжений, показал, что основной вклад в погрешность расчета напряжений по данной методике вносят измерения амплитуды A_0 (2 %), модуля Юнга (1,5 %) и плотности (0,7 %) исследуемого материала. Погрешности определения величин k и P , входящих в уравнениях (2) и (3), слабо влияют на точность расчетов. Суммарная систематическая погрешность расчета напряжений по формуле (1) составляла 4,5 %, а общая погрешность — ± 4 %.

Механические свойства исследуемых покрытий

Номер покрытия	Состав покрытия	Толщина слоя, мкм	Суммарная толщина покрытия, мкм	Угол загиба образца до начала скола покрытия, град	σ_{-1} на базе 10^7 циклов, МПа	σ_{-1} по отношению к образцам без покрытия, %
1	Образцы без покрытия	—	—	—	490	100
2	B ₄ C	32	32	3	скол покрытия	—
3	Ti/B ₄ C	3/35	38	24	330	67
4	Cu/B ₄ C	5/35	40	48	250	51
5	AgCu/B ₄ C	13/15	28	36	330	67
6	Ag/Ti/B ₄ C	2,5/2,5/36	41	21	350	71
7	AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B ₄ C	12/1,5/3/1,5/3/41	62	18	390	80
8	Cu/Ni/Cr	16/40/40	96	50	250	51
9	AgCu/Ni/B ₄ C	17/9/13	39	45	270	55
10	Hf/Ag/Ni/Cr	1/15/10/26	52	25	340	69
11	Hf/Ti/Hf/Ti/Cr	2/2/2/40	48	40	360	73

Испытания прекращали при разрушении образцов (снижении резонансной частоты колебаний образца на 2 %) при заданном напряжении или по достижению 10^7 циклов, а также после начала отслоения покрытия с образца.

Для части исследованных материалов с покрытиями также была использована методика испытаний при неразрушающих и разрушающих нагрузках при постоянной мощности, подводимой от виброэлектродинамического стенда к испытываемому образцу, которая состояла в следующем:

задавали несколько постоянных уровней мощности установки W/W_m (W — уровень мощности, подводимой к испытываемому образцу) от 0,1 до 1,0 от её максимальной величины W_m (W_m — уровень условной максимальной мощности установки);

на каждом из этих уровней проводили измерение частоты резонансных колебаний и амплитуд образца без покрытия и с покрытием одинаковых размеров при одинаковых условиях закрепления. Число циклов неразрушающей нагрузки при этом

составляло $(1,0...1,5) \cdot 10^5$ циклов при частоте нагружения 0,4 кГц на первой форме колебаний или, преимущественно, 2 кГц на второй форме колебаний. При этом получали зависимости σ_a от W/W_m для неразрушающих напряжений при колебаниях образцов на первой и второй формах колебаний. При испытаниях на второй форме колебаний достигали уровня разрушающих напряжений и далее строили усталостную кривую — зависимость σ_a от N , где N — число циклов до разрушения на уровне W/W_m , определяя предел выносливости образцов σ_{-1} на базе 10^7 циклов;

строили зависимости σ_a от W/W_m для образцов без покрытия и с покрытием для неразрушающих и разрушающих уровней напряжений;

сравнивали результаты испытаний при одинаковых значениях W/W_m .

Результаты экспериментов. В таблице приведены варианты составов исследованных покрытий, результаты исследований их толщин, данные об угле загиба образцов до начала скола покрытий

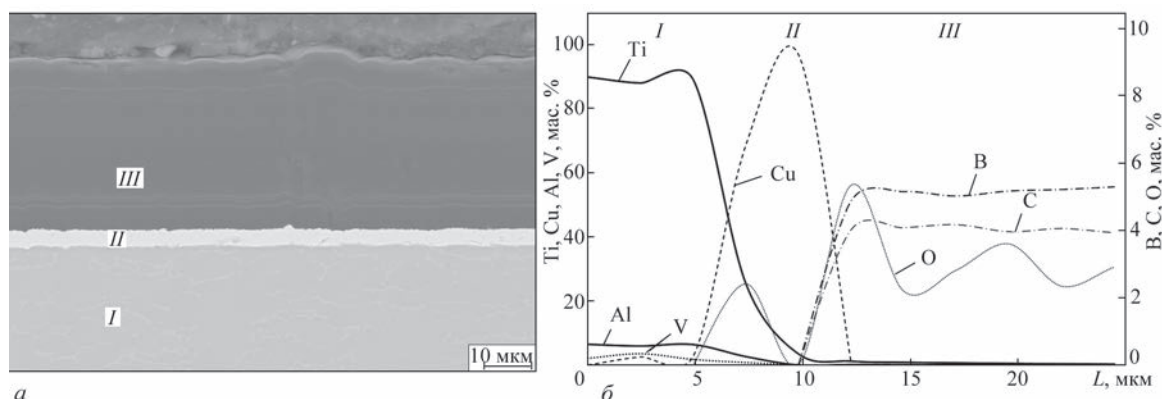


Рис. 1. Покрытие Cu/B₄C после осаждения: а — микроструктура поперечного сечения; б — распределение химических элементов по толщине покрытия на границе с подложкой (I — сплав ВТ6; II — слой Cu; III — внешний слой B₄C)

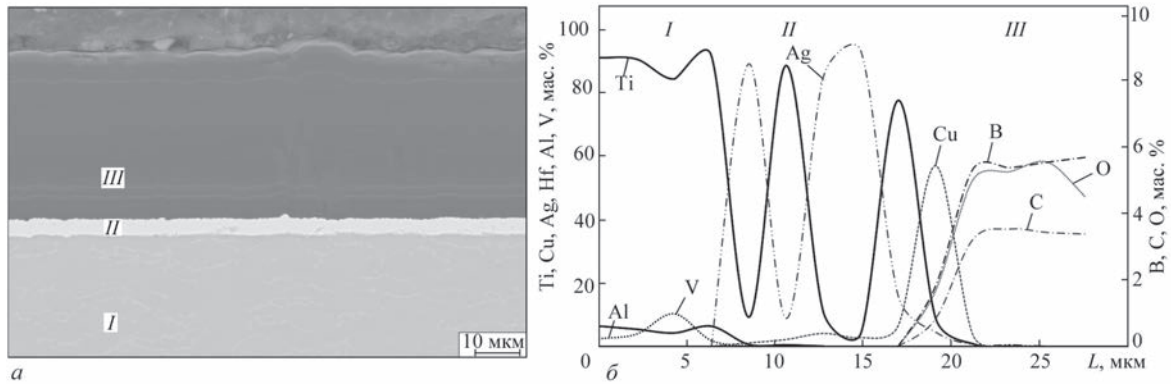


Рис. 2. Покрытие AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B₄C: *a* — микроструктура поперечного сечения; *б* — распределение химических элементов по толщине покрытия на границе с подложкой (*I* — сплав ВТ6; *II* — слои AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu; *III* — внешний слой B₄C)

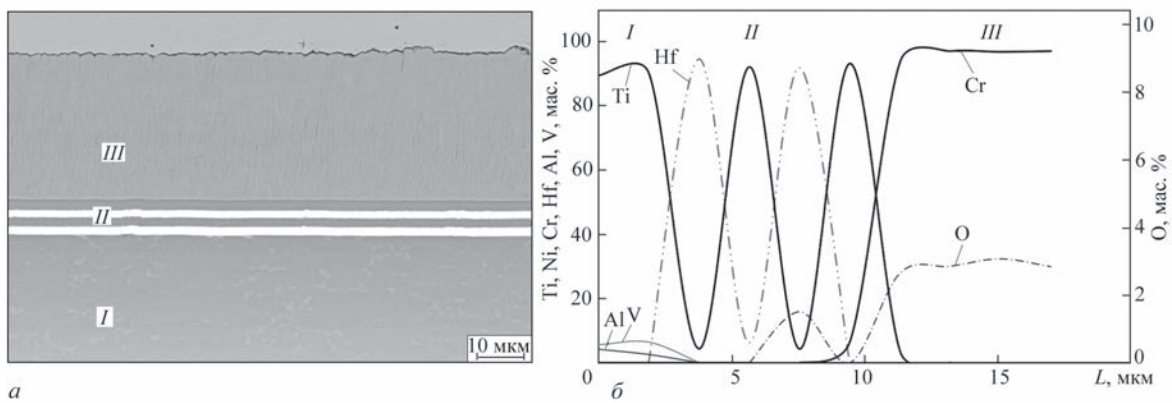


Рис. 3. Покрытие Hf/Ti/Hf/Ti/Cr: *a* — микроструктура поперечного сечения; *б* — распределение химических элементов по толщине покрытия на границе с подложкой (*I* — сплав ВТ6; *II* — слои Hf/Ti/Hf/Ti; *III* — внешний слой Cr)

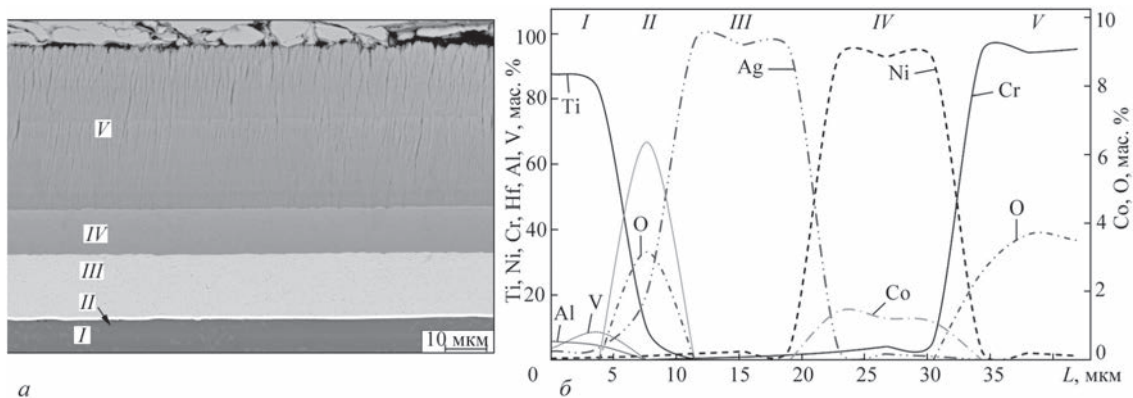


Рис. 4. Покрытие Hf/Ag/Ni/Cr: *a* — микроструктура поперечного сечения; *б* — распределение химических элементов по толщине покрытия на границе с подложкой (*I* — сплав ВТ6; *II* — слой Hf; *III* — слой Ag; *IV* — слой Ni; *V* — внешний слой Cr)

и предел выносливости образцов на базе испытанных 10⁷ циклов.

На рис. 1–4 представлены микроструктуры некоторых вариантов покрытий и распределение основных химических элементов по толщине покрытия. При температуре осаждения покрытия, не превышающей 500 °С, внутренний связующий слой покрытия толщиной 2...3 мкм, контактирующий с подложкой, является достаточно плотным, без выраженной столбчатой структуры. С уве-

личением толщины покрытия в нем появляются межстолбчатые пустоты между кристаллитами и формируется характерная столбчатая структура как в однослойных покрытиях, так и в многослойных, даже если толщина каждого из последующих слоев составляет не более 3 мкм. Исключением является серебро, которое сохраняет плотную микроструктуру при толщине около 20 мкм.

Микротвердость слоев покрытий в состоянии после осаждения составляла в среднем, ГПа:

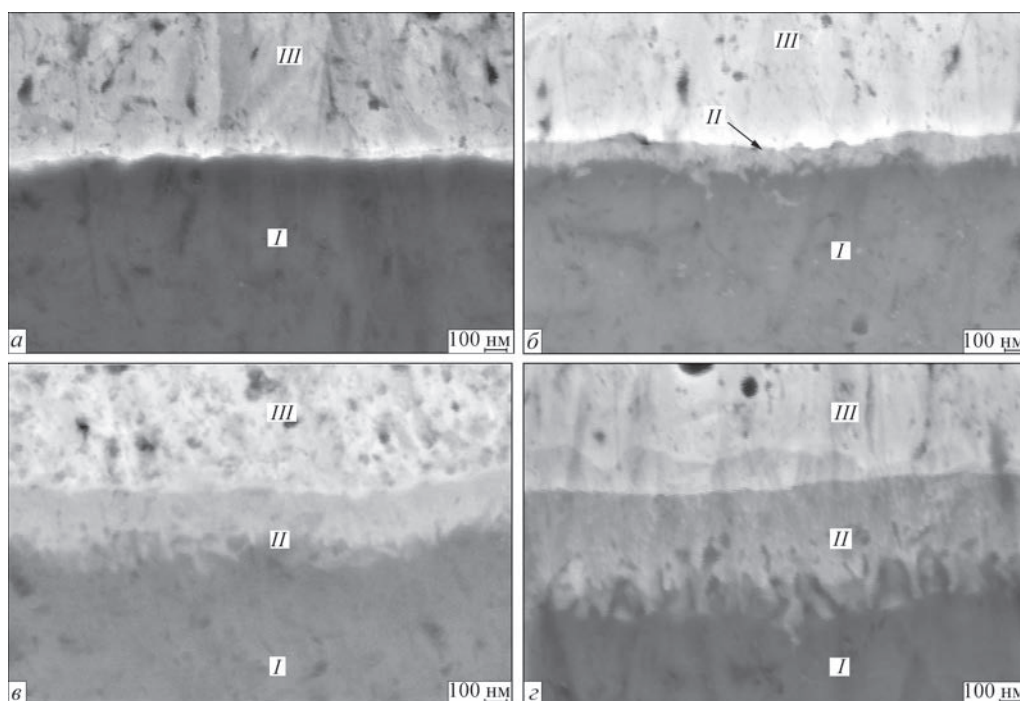


Рис. 5. Микроструктура границы контакта сплава ВТ6 и слоя меди в образце после осаждение покрытия при различных температурах ложки, $\times 50000$: а — 400 °С; б — 450 °С; в — 480 °С; з — 500 °С (I — сплав ВТ6; II — диффузионная зона; III — слой Cu)

серебра — 0,7; меди — 0,8; титана — 3,44; гафния — 3,65; никеля — 1,75; хрома — 2,9; карбида бора — 16,5.

Установлено, что осаждение однослойных покрытий V_4C толщиной более 30 мкм на образцы из сплава ВТ6 нецелесообразно по причине слабой адгезии покрытия (угол изгиба на уровне 3°).

Как показали усталостные испытания однослойных покрытий из Ti, Ag, Hf, нанесение тонкого слоя толщиной 2,5...4,0 мкм существенно не влияет на предел выносливости исследованных образцов (отклонение от предела выносливости не превышало 5...10 %). Исключением являлся слой меди, нанесение которого приводило к снижению предела выносливости образцов на 49 %.

Исследование границы контакта титанового сплава и слоя меди в образце после осаждение покрытия показало присутствие лишь тонкой диффузионной зоны, толщина которой достигала до 0,5 мкм при температуре осаждения 500 °С. При снижении температуры осаждения толщина этой зоны постепенно уменьшалась, при этом адгезия покрытия при температуре осаждения 400 °С снижалась в 2–3 раза (рис. 5).

Установлено также, что если в составе слоев покрытия присутствует медь, которая в состоянии после осаждения не контактирует с подложкой (например, вариант покрытия на рис. 5), то после термической обработки при 500 °С в течение 1 ч медь полностью диффундирует к границе сплава ВТ6, концентрируясь на границе раздела. Было

предположено, что подобная диффузия меди к титану может быть связана с возможным образованием интерметаллидных соединений. Известно, что при высокотемпературной (выше 650 °С) пайке титана припоями, содержащими медь, возможно образование хрупких интерметаллидов Ti_2Cu и $TiCu_3$ [16]. Также сообщалось [17] о появлении интерметаллидов $TiCu_4$ и $TiCu_2$ при сварке взрывом пластин Cu и Ti, в процессе термической обработки которых при температуре 900...1010 °С формировалась хрупкая интерметаллидная прослойка Ti_3Cu_4 , по которой происходило разрушение сваренных образцов.

В исследованных образцах, содержащих в составе медь, после усталостных испытаний выделения частиц интерметаллидных фаз на границе Cu/ВТ6 выявлено не было. Однако формирование диффузионной зоны толщиной до 0,5 мкм, микротвердость в зоне которой составляла 4,06 ГПа, является признаком зарождения более твердой фазы, которая может охрупчивать эту зону. Другой вероятной причиной негативного влияния внутреннего связующего слоя меди, контактирующего со сплавом ВТ6, на усталостные характеристики является присутствие в этом относительно тонком слое (3...5 мкм) межкристаллитных дефектов, по которым усталостная трещина из внешнего слоя карбида бора или хрома легко проникает в сплав ВТ6. В этом случае хорошая адгезия слоя меди с подложкой играет негативную роль. Отмечено также увеличение микротвердости слоев меди и серебра

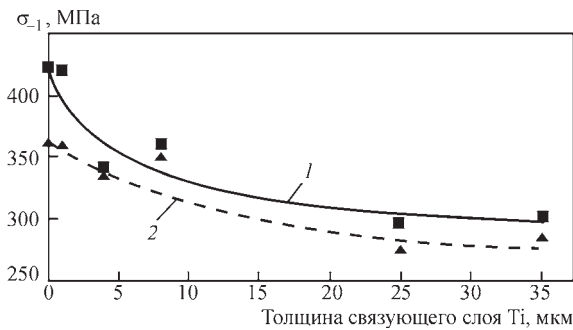


Рис. 6. Влияние толщины внутреннего связующего слоя из Ti на предел выносливости образцов с покрытием Ti/B₄C на базе испытаний 1·10⁶ циклов(1) и 1·10⁷ циклов (2)

на 10 % после усталостных испытаний, что может свидетельствовать о происходящем наклепе.

При усталостных испытаниях обнаружено, что некоторые покрытия (№ 3 и 6, см. табл.) отслаивались от поверхности образцов после выхода на резонансную частоту. В случае продолжения усталостных испытаний образцов после скалывания покрытий их предел выносливости достигал уровня 90...95 % от предела выносливости образцов без покрытия. Это является подтверждением того, что снижение усталостной прочности образцов с покрытиями обусловлено зарождением усталостных трещин в покрытии и их быстрым переходом в сплав ВТ6, что особенно наглядно проявляется в случае хорошей адгезии покрытия с образцом (при повышении адгезии покрытия, при больших

углах загиба образца до отслоения покрытия, уровень усталостной прочности понижается).

При увеличении толщины осаждаемых покрытий также наблюдается снижение предела выносливости образцов, обусловленное формированием столбчатой микроструктуры покрытия, ориентированной перпендикулярно подложке, которая способствует зарождению усталостной трещины в покрытии и ее быстрому распространению в материал образца.

При увеличении толщины внутреннего связующего слоя Ti в двухслойных покрытиях Ti/B₄C наблюдается снижение предела выносливости (рис. 6). Исследование микроструктуры данных образцов показало, что усталостные трещины зарождаются в слое В₄С и распространяются по границам столбов в титановый или медный внутренний связующий слой практически по прямой до проникновения в подложку.

Использование серебра вместо меди в качестве внутреннего связующего слоя приводит к некоторому снижению адгезии (угол загиба до отслоения покрытия 21°). Поэтому в ходе усталостных испытаний локальное отслоение покрытий происходит по границе контакта внутреннего связующего слоя серебра с подложкой. При нанесении внутреннего связующего слоя из серебряно-медного сплава (типа ПСр) достигается повышение адгезии по-

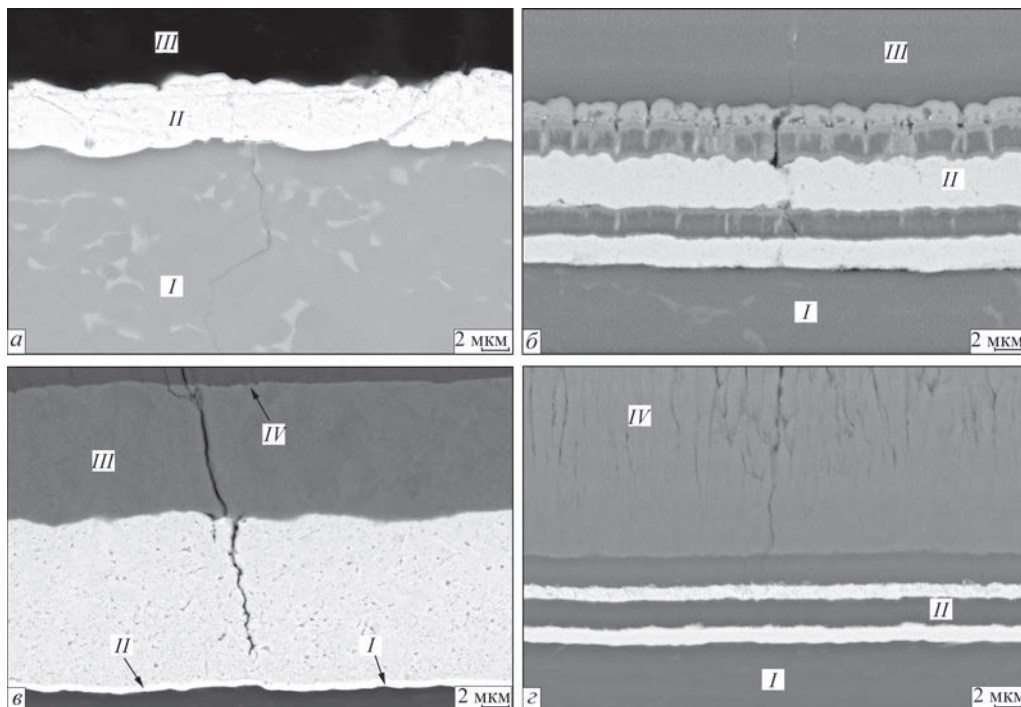


Рис. 7. Микроструктура границы контакта сплава ВТ6 и внутренних связующих слоев покрытий после усталостных испытаний: а — Cu/B₄C (I — сплав ВТ6; II — слой Ag; III — слой В₄С); б — AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B₄C (I — сплав ВТ6; II — слои AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu; III — слой В₄С); в — Hf/Ag/Ni/Cr (I — сплав ВТ6; II — слой Hf; III — слой Ni; IV — внешний слой Cr); г — Hf/Ti/Hf/Ti/Cr (I — сплав ВТ6; II — слои Hf/Ti/Hf/Ti; III — внешний слой Cr)

крытий, но предел выносливости также относительно невысок (не превышает 270...330 МПа).

Следует отметить, что в случае использования внутреннего связующего слоя из серебра распространение усталостной трещины в нем замедляется. Этот эффект усиливается в случае увеличения границ раздела (количества чередующихся слоев) в вариантах покрытий № 7, 10 и 11 (рис. 7). При усталостных испытаниях образцов с подобными многослойными покрытиями также отмечается очень медленный уход с резонансной частоты в процессе усталостного разрушения, что указывает на высокое сопротивление росту усталостной трещины. При этом образцы с покрытиями № 7, 10 и 11 имеют наименьшее снижение предела выносливости по сравнению с образцами без покрытия (на 20...31 %).

При увеличении количества слоев в покрытии наблюдается повышение предела выносливости образцов, которое объясняется замедлением роста усталостной трещины при переходе через границы раздела слоев. Это наблюдается в многослойных системах AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B₄C, Hf/Ag/Ni/Cr и Hf/Ti/Hf/Ti/Cr (рис. 7).

При этом практически все исследованные многослойные покрытия обладают повышенным уровнем рассеяния подводимой энергии. Об этом свидетельствуют измерения электрической мощности, подводимой от виброэлектродинамического стенда к образцу для возбуждения в нем резонансных колебаний. Например, установлено, что при испытании образцов без покрытия и с покрытиями системы Hf/Ag/Ni/Cr при одной мощности ($W/W_m = 0,8$) на второй форме колебаний уровень напряжений в образце с покрытием был на 23 % меньше, чем в образце без покрытия, а максимальное снижение амплитуды колебаний на первой форме (при неразрушающих напряжениях) составило 56 % $W/W_m = 0,8$ (рис. 8.)

Кривые на рис. 8 описаны аналитическими зависимостями стандартной программой Microsoft Excel:

$$\begin{aligned} \sigma_a &= y = -401,9x^2 + 862,6x - 14,69, \\ R^2 &= 0,994, \text{ при } x = W/W_m = 0,8, \\ \sigma_a &= 418 \text{ МПа;} \\ \sigma_a &= y = 209,7x^{0,550}, \\ R^2 &= 0,980, \text{ при } x = W/W_m = 0,8, \\ \sigma_a &= 185 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Показатель эффективности покрытия по неразрушающим напряжениям относительно основы при $W/W_m = 0,8$ составляет $(418 - 185)/418 = 0,56$.

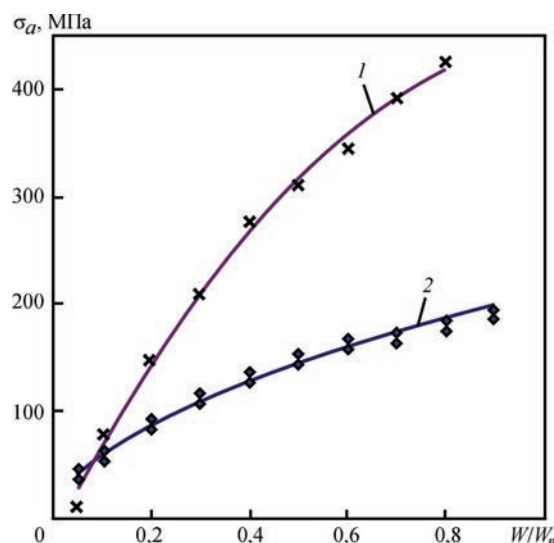


Рис. 8. Зависимости максимальных напряжений (σ_a) в образцах без покрытия (1) и с покрытием Hf/Ag/Ni/Cr (2) от уровня относительной мощности возбуждения колебаний установки (W/W_m)

Таким образом, для достижения одного и того же уровня действующих напряжений (амплитуды колебаний) для образцов с покрытиями необходима более высокая мощность, чем при усталостных испытаниях образцов без покрытия. Если проводить испытания всех образцов (с покрытиями и без) при одной и той же подводимой к образцу мощности, то уровень действующих напряжений в образцах с демпфирующими покрытиями снизится на 23...56 %. Применительно к деталям, подвергающимся при эксплуатации постоянным вибрационным нагрузкам, в том числе резонансным (например, компрессорным лопаткам газотурбинных двигателей), нанесение многослойных покрытий позволит снизить амплитуду их колебаний по сравнению с деталями без покрытий. При этом защитные покрытия будут выполнять свою позитивную роль, повышая эрозионную стойкость деталей.

Исходя из этого можно предположить, что помимо традиционной методики исследования многоциклового усталости при заданном уровне действующих в образце напряжений, для образцов с многослойными покрытиями, обладающими высокими диссипативными свойствами, целесообразно проводить вибрационные испытания (на заданной базе циклов) образцов с покрытиями и без при одинаковых уровнях мощности, подводимой к образцу для возбуждения колебаний.

С учетом того обстоятельства, что отклонения в уровне усталостной прочности компрессорных лопаток могут достигать 30 %, а уровень максимальных изгибных напряжений при эксплуатации реальных компрессорных лопаток не превышает

300 МПа [18], уже имеющиеся варианты разработанных покрытий (№ 7, 10 и 11 с пределом выносливости 340...390 МПа на базе 10^7 циклов) могут быть рекомендованы для испытаний на лопатках.

Выводы

1. Все исследованные варианты конденсационных покрытий, осажденных на образцы из сплава типа ВТ6 при температуре не выше 500 °С, снижают предел выносливости на 20...49 % по сравнению с образцами без покрытия.

2. Наиболее высоким уровнем адгезии со сплавом типа ВТ6 обладают покрытия с внутренним связующим слоем из Cu (угол изгиба образца до начала отслоения покрытий составляет 48...50°), однако они существенно снижают предел выносливости (до уровня 51 % от уровня образцов без покрытий). Причиной этого снижения может быть беспрепятственное распространение усталостной трещины сквозь слой меди, в котором присутствуют межзеренные дефекты, в подложку. При этом диффузионная зона меди и сплава ВТ6 способствует быстрому распространению усталостной трещины.

3. Использование внутреннего связующего слоя из сплава AgCu позволяет несколько повысить предел выносливости образцов (до уровня 55...67 % от уровня образцов без покрытий) при некотором снижении адгезии (угол изгиба образца до начала отслоения покрытий составляет не менее 36°). При этом медь при температуре 450...500 °С диффундирует сквозь слой Ag к границе с подложкой, формируя диффузионную зону с титаном.

4. Наименьший отрицательный эффект на сопротивление усталости образцов сплава ВТ6 оказывают многослойные покрытия типа Hf/Ti/Hf/Ti/Cr, Hf/Ag/Ni/Cr и AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B₄C (уровень предела выносливости образцов с такими покрытиями составляет 69...80 % от уровня образцов без покрытий), обладающие хорошей адгезией (угол изгиба образца до начала отслоения покрытий составляет 18...40°).

5. Многослойное покрытие типа Hf/Ag/Ni/Cr в процессе усталостных испытаний обеспечивает рассеяние подводимой энергии (от 23 до 56 %) на возбуждение колебаний (по сравнению с образцами без покрытий) и при этом также имеет повышенное сопротивление распространению усталостных трещин (медленный уход с резонансной частоты при усталостном разрушении) за счет их торможения на границах раздела слоев покрытия.

6. Для защиты компрессорных лопаток рекомендуется применять многослойные конденсационные покрытия типа Hf/Ti/Hf/Ti/Cr, Hf/Ag/Ni/Cr

или AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B₄C, обладающие минимальным негативным воздействием на многоцикловую усталость сплавов типа ВТ6. При этом перспективным направлением дальнейших исследований следует считать увеличение количества слоев покрытия при одновременном снижении их толщины.

7. Рекомендуется для оценки эффективности демпфирования различных вариантов покрытий и их влияния на многоцикловую усталость проводить вибрационные испытания образцов при одном и том же уровне мощности, подводимой к образцу для возбуждения колебаний.

Список литературы

1. Котельников А.Н., Габов И.Г. (2015) Оценка усталостной прочности рабочих лопаток компрессора при нерегулярном нагружении. *Фундаментальные исследования*, **9**, 470–475.
2. Горлов Д.С., Мубояджян С.А., Щепилов А.А., Александров Д.А. (2017) Влияние ионной имплантации на демпфирующую способность композиции «сплав–ионно-плазменное покрытие». *Труды ВИАМ*, **2**, 24–32, DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-4-4.
3. Малашенко И.С., Куренкова В.В., Белоусов И.В., Бибер В.И. (2014) Структура и физико-механические свойства вакуумных конденсатов титанового сплава ВТ6. *Современная электрометаллургия*, **2**, 26–35.
4. Чичков Б.А. (2000) *Рабочие лопатки авиационных газотурбинных двигателей*. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. Москва, МГТУ ГА.
5. Микитчик А.В., Рудой Ю.Э., Грушецкий И.В. и др. (2016) Влияние многослойных конденсационных покрытий на характеристики демпфирования титанового сплава ВТ6. *Современная электрометаллургия*, **1**, 26–31.
6. Яковчук К.Ю., Рудой Ю.Э., Микитчик А.В. и др. (2012) Влияние условий конденсации на структуру и свойства твердых покрытий на основе В₄C, полученных электронно-лучевым испарением в вакууме. *Там же*, **3**, 15–19.
7. Torvik P., Langley B. (2015) Material properties of hard coatings developed for high damping. *Proc. of the 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. (Orlando, Florida, USA, July 29, 2015)*.
8. Трапезон А.Г., Ляшенко Б.А., Лысенков М.О. (2013) Сопротивление усталости металлов с упрочняющими покрытиями (обзор). *Проблемы прочности*, **3**, 42–57.
9. Costa M.Y.P. et al. (2011) Fatigue behavior of PVD coated Ti–6Al–4V alloy. *International Journal of Fatigue*, **33**, 759–765.
10. Baragetti S., Villa F. (2014) An updated review of the fatigue behavior of components coated with thin hard corrosion-resistant coatings. *The Open Materials Science Journal*, **8**, 87–98.
11. Устинов А.И., Зиньковский А.П., Скородзиевский В.С., Токарь И.Г. (2010) О возможностях наноструктурированных покрытий для снижения динамической напряженности конструктивных элементов машин. *Современная электрометаллургия*, **1**, 28–33.
12. Трапезон А.Г., Ляшенко Б.А., Липинская Н.В. (2009) Усталость титанового сплава ВТ20 с вакуум-плазменными покрытиями при высоких температурах. *Проблемы прочности*, **4**, 101–107.
13. Мовчан Б.А., Яковчук К.Ю. (2004) Электронно-лучевые установки для испарения и осаждения неорганических

материалов и покрытий. *Современная электрометаллургия*, **2**, 10–15.

14. Кузьменко В.А. (ред.). (1979) *Усталостные испытания при высоких частотах нагружения*. Киев, Наукова думка.
15. Луговской Ю.Ф. (1987) Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **4**, 61–65.
16. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. (1988) *Пайка металлов*. Москва, Машиностроение.
17. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Евстропов Д.А. и др. (2014) Структура и фазовый состав покрытий системы Cu–Ti, сформированных на медной подложке. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*, **4**, 8–10.
18. Szczepanik R. (2013) Analysis of 1st stage compressor rotor blade stress and vibration amplitudes in one-pass jet engine. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, **20(4)**, 441–450.

References

1. Kotelnikov, A.N., Gabov, I.G. (2015) Evaluation of fatigue strength of compressor blades under irregular loading. *Fundamentalnye Issledovaniya*, **9**, 470–475 [in Russian].
2. Gorlov, D.S., Muboyadzhyan, S.A., Shchepilov, A.A., Aleksandrov, D.A. (2017) Influence of ion implantation on damping capability of composition «alloy-ion-plasma coating». *Trudy VIAM*, **2**, 24–32, DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-4-4 [in Russian].
3. Malashenko, I.S., Kurenkova, V.V., Belousov, I.V., Biber, V.I. (2014) Structure and physical-mechanical properties of vacuum condensates of titanium alloy VT6. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **2**, 26–35 [in Russian].
4. Chichkov, B.A. (2000) *Blades of aircraft gas turbine engines*. Pt 1. Operational damageability of blades. Moscow, MG TU GA [in Russian].
5. Mikitchik, A.V., Rudoy, Yu.E., Grushetsky, I.V. et al. (2016) Effect of multilayer condensation coatings on characteristics of titanium alloy VT6 damping. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **1**, 26–31 [in Russian].
6. Yakovchuk, K.Yu., Rudoy, Yu.E., Mikitchik, A.V. et al. (2012) Effect of condensation conditions on structure and properties

of hard coatings on B4S base, produced by electron beam evaporation in vacuum. *Ibid.*, **3**, 15–19 [in Russian].

7. Torvik, P., Langley, B. (2015) Material properties of hard coatings developed for high damping. In: *Proc. of the 51st AIAA/SA/ASEE Joint Propulsion Conf. (Orlando, Florida, USA, July 29, 2015)*.
8. Trapezon, A.G., Lyashenko, B.A., Lysenkov, M.O. (2013) Fatigue resistance of metals with reinforcing coatings (Review). *Problemy Prochnosti*, **3**, 42–57 [in Russian].
9. Costa, M.Y.P. et al. (2011) Fatigue behavior of PVD coated Ti–6Al–4V alloy. *Int. J. of Fatigue*, **33**, 759–765.
10. Baragetti, S., Villa, F. (2014) An updated review of the fatigue behavior of components coated with thin hard corrosion-resistant coatings. *The Open Materials Sci. J.*, **8**, 87–98.
11. Ustinov, A.I., Zinkovsky, A.P., Tokar, I.G., Skorodzievsky, V.S. (2010) About capabilities of nanostructured coatings to reduce the dynamic intensity of design elements of machines. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **2**, 28–33 [in Russian].
12. Trapezon, A.G., Lyashenko, B.A., Lipinskaya, N.V. (2009) Fatigue of titanium alloy VT20 with vacuum-plasma coatings at high temperatures. *Problemy Prochnosti*, **4**, 101–107 [in Russian].
13. Movchan, B.A., Yakovchuk, K.Yu. (2004) Electron beam installations for evaporation and deposition of inorganic materials and coatings. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 9–14.
14. (1979) *Fatigue tests under high frequencies of loading*. Ed. by V.A. Kuzmenko. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
15. Lugovskoj, Yu.F. (1987) Procedure of fatigue tests of composite materials under bending, produced by electron beam evaporation. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 61–65 [in Russian].
16. Lashko, S.V., Lashko, N.F. (1988) *Soldering of metals*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. Shmorgun, V.G., Slautin, O.V., Evstropov, D.A. et al. (2014) Structure and phase composition of Cu–Ti system coatings formed on copper substrate. *Vestnik Sibirsk. Gos. Industr. Unta*, **4**, 8–10 [in Russian].
18. Szczepanik, R. (2013) Analysis of 1st stage compressor rotor blade stress and vibration amplitudes in one-pass jet engine. *J. of KONES Powertrain and Transport*, **20(4)**, 441–450.

ВПЛИВ КОНДЕНСАЦІЙНИХ БАГАТОШАРОВИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ОПІР ВТОМІ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ ВТ6

К.Ю. Яковчук¹, А.В. Микитчик¹, Ю.Е. Рудой¹, Ю.Ф. Луговской²

¹Державне підприємство «Міжнародний центр електронно-промислових технологій Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України».

03150, м. Київ, вул. Горького (Антоновича), 68. E-mail: mykytchuk@paton-icebt.kiev.ua

²Інститут проблем матеріалознавства НАН України.

03680, м. Київ, вул. Академіка Кржижанівського, 3. E-mail: lugovskoi_u@ukr.net

Розглянуто вплив багатошарових функціональних (демпфуючих та ерозійностійких) покриттів товщиною 28...96 мкм на багатоциклово втому зразків сплаву ВТ6. Покриття отримані методом електронно-променевого випаровування і наступної конденсації з парової фази (ЕВ-РВД) на підкладки з титанового сплаву ВТ6. Проведено дослідження багатоциклової втому зразків за кімнатної температури шляхом збудження в них резонансних згинальних коливань за першої (неруйнівні напруження) та другої форм коливань при частотах 0,4 і 2,0 кГц відповідно на базі 10⁷ циклів. Встановлено, що осадження одношарових покриттів В₄С на зразки зі сплаву ВТ6 є недоцільним через слабку адгезію покриття (кут згину не більше 4°). Використання внутрішнього зв'язуючого шару (Ti, Ag, Hf товщиною 1...3; 2,5...15,0; 1...2 мкм відповідно) підвищило адгезію покриття (кут згину становив 20...25°), при цьому границя витривалості зразків знизилася на 29...33 % у порівнянні зі сплавом без покриття. Показано, що внутрішній зв'язуючий шар з Cu або AgCu забезпечує високу адгезію (кут згину досягав 36...48°), проте границя витривалості зразків знизилася на 33...49 % внаслідок швидкого проникнення втомної тріщини через цей внутрішній зв'язуючий шар в сплав ВТ6. Показано, що застосування багатошарового внутрішнього зв'язуючого шару в покриттях типу Hf/Ti/Hf/Ti/Cr або AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/V₄C з оптимальним співвідношенням товщин індивідуальних шарів дозволяє забезпечити границю витрива-

лості на рівні 73...80 % від рівня межі витривалості зразків без покриття. Також встановлено, що багатошарове демпфуюче покриття Hf/Ag/Ni/Cr товщиною 52 мкм, яке випробовували за однакового рівня потужності, що підводиться від віброелектродинамічного стенду до зразка для збудження коливань, забезпечує зниження амплітуди коливань (діючих напружень в зразку) на 23...56 % у порівнянні із зразками без покриттів. З огляду на це доцільно для оцінки ефективності демпфування різних варіантів покриттів і їх впливу на багатоциклову втому проводити вібраційні випробування зразків за однакової потужності, що підводиться для збудження коливань. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: сплав; електронно-променево випаровування і осадження у вакуумі; багатоциклова втома; захисні (функціональні) покриття; багатошарові покриття; втомна тріщина; компресорні лопатки

EFFECT OF CONDENSED MULTILAYER PROTECTIVE COATINGS ON FATIGUE RESISTANCE OF VT6 ALLOY SAMPLES

K. Yu. Yakovchuk¹, A.V. Mykytchuk¹, Yu.E. Rudoy¹, Yu.F. Lugovskoy²

¹State-Run Enterprise «International Center for Electron Beam Technologies of E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU».

68 Gorky (Antonovich) Str. 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: mykytchuk@paton-icebt.kiev.ua

²Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences NASU.

3 Krzhizhanovsky Str., 03680, Kyiv, Ukraine. E-mail: lugovskoi_u@ukr.net

The effect of multilayer damping and erosion-resistant functional coatings 28...96 μm thick on high-cycle fatigue strength of VT6 alloy samples is considered. Coatings were applied by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) on VT6 titanium alloy substrates. Room-temperature high-cycle fatigue tests were conducted by exciting resonant bending oscillations of the first (non-destructive stresses) and second forms of oscillations in the sample at frequencies of 0.4 and 2.0 kHz on the basis of 10⁷ cycles, respectively. It was found that deposition of single-layer B₄C coatings on VT6 alloy samples is impractical due to poor adhesion of the coating (bending angle was 4°). If inner bonding layer (Ti, Ag, Hf 1...3, 2.5...15.0, 1...2 μm thick, respectively) was used, it was possible to increase the adhesion of the coating (bending angle was 20...25°), while the endurance limit decreased by 29...33 % compared with an uncoated alloy. It was demonstrated that the inner bonding layer (Cu or AgCu) provides high adhesion (the bending angle reached 36...48°). However, the endurance limit decreased by 33...49 % due to rapid penetration of the fatigue crack through this inner bonding layer into the VT6 alloy. Deposition of inner bonding multilayer (coatings of Hf/Ti/Hf/Ti/Cr or AgCu/Ti/AgCu/Ti/AgCu/B₄C type) with an optimal ratio of individual layer thicknesses ensures endurance limit at the level of 73...80 % of uncoated samples. Furthermore, it was found that multilayer Hf/Ag/Ni/Cr damping coatings 52 μm thick ensure a decrease of the amplitude of oscillations (effective stresses in the sample) by 23...56 % as compared to uncoated samples. The tests were carried out using the same power supplied from testing rig to coated and uncoated samples for oscillation excitation. Therefore, to evaluate the damping efficiency of various coatings and their effect on high-cycle fatigue of substrate material, it is recommended to conduct vibration tests of samples at the same power supplied for oscillation excitation. Ref. 18, Table 1, Fig. 8.

Key words: alloy; electron beam physical vapor deposition; high-cycle fatigue; protective (functional) coatings; multilayer coatings; fatigue crack; compressor blades

Поступила в редакцію 10.06.2019

САМЫЙ МОЩНЫЙ СВЕРХТЯЖЕЛЫЙ ПРОХОДЧЕСКИЙ КОМБАЙН



Новокраматорский машиностроительный завод (НКМЗ) презентовал самый мощный в Украине сверхтяжелый 100-тонный проходческий комбайн модели П315. Новая машина — совместное детище новокраматорских машиностроителей, покровских горняков и специалистов ЧАО «Донецк-сталь»–металлургический завод». О высокой степени уверенности горняков в продукции НКМЗ говорит следующий факт. Сегодня для этого заказчика уже изготавливаются очередные два таких комбайна и у него есть намерение приобрести в этом году еще один.

Ожидается, что в результате применения П315 будет существенно повышена производительность труда, темпы проходки, облегчена работа проходчиков, возрастут их заработки.

Новокраматорцы постоянно создают различную новую технику, которая составляет до 40 % продукции, выпускаемой предприятием. Это не только комбайны, это мельницы, отвалобразователи, дробилки, металлургические краны, конвертеры, миксеры. Коллектив предприятия работает в постоянном поиске и творчестве. Так, проходческий комбайн П315 абсолютно новой конструкции был создан фактически за год и есть уверенность, что эта машина будет работать надежно и успешно.

Пресс-служба НКМЗ