

Влияние параметров напыления и толщины покрытий из нитрида титана TiN на сопротивление усталости

А. Г. Трапезон, Б. А. Ляшенко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Исследовано влияние вакуум-плазменных покрытий из нитрида титана TiN на сопротивление усталости титана VT1-0 в зависимости от параметров напыления и толщины покрытий. Проведен анализ полученных результатов с целью необходимости увеличения предела выносливости композиции основа–покрытие. Показано, что во всех исследованных случаях TiN-покрытия повышают сопротивление усталости. Установлен оптимальный диапазон толщин покрытия, при котором изменение условий осаждения мало влияет на предел выносливости. Отмечено удовлетворительное согласование между экспериментальными и расчетными значениями пределов выносливости, которые получены по ранее предложенной расчетной модели. Обсуждена и подтверждена принципиальная возможность существенного повышения сопротивления усталости в случае формирования сверхтонких покрытий при вполне определенных условиях их осаждения.

Ключевые слова: предел выносливости, технология напыления, толщина покрытия, оптимальный диапазон толщин, расчетная модель, сверхтонкие покрытия.

Введение. Упрочнение поверхности машиностроительных деталей с помощью вакуум-плазменных покрытий имеет ряд экономических, экологических и технологических преимуществ. Такие покрытия, получаемые методом парогазовой конденсации (PVD) в сочетании с методом конденсации металлической плазмы при ионной бомбардировке (КИБ), наносятся на детали с помощью серийно выпускаемых промышленностью установок типа “Булат” [1]. При создании вакуум-плазменных покрытий на подобном оборудовании можно легко варьировать такими параметрами технологического процесса, как давление среды, сила тока дуги, время подачи газа (N, O₂, Ag и др.), состав газовой среды, скорость осаждения, температура. Вследствие этого появляется реальная возможность оптимизации процесса для получения покрытий с различными свойствами, в частности прочностными.

В данной работе исследуется влияние вакуум-плазменных покрытий из нитрида титана TiN на сопротивление усталости титана VT1-0 в зависимости от параметров напыления и толщины покрытий. Проведен анализ полученных результатов исходя из постановки задачи и целей исследования.

Постановка задачи. Реальные процессы, сопутствующие формированию покрытий, имеют сложный характер. В зависимости от энергетических параметров технологии нанесения покрытий они могут влиять на изменение химико-структурного состава и связанные с ним физико-механические характеристики. Так [2], TiN-покрытия кроме δ -нитрида TiN могут содержать некоторое количество α -Ti и ϵ -нитрида Ti₂N, образуя твердые растворы металла и химических соединений неопределенного состава. Покрытия, которые кристаллизуются при сравнительно низких температурах, при неравновесных

условиях обладают структурой, которая по мере увеличения толщины и накопления дефектов роста становится менее плотной, вследствие чего может снижаться прочность покрытия. Повышение температуры кристаллизации приводит к уменьшению количества дефектов до уровня, типичного для монокристаллических материалов в равновесном состоянии, т.е. их структурная неоднородность по толщине должна уменьшаться.

Не исключено, однако, что с повышением температуры осаждения прочность может понижаться, как это показано на примере пленок никеля [3]. Существенное влияние на изменение механических свойств и структуры оказывают состав остаточных газов и степень вакуума, обнаруженные на металлических пленках. Очевидно также, что изменение давления сводится практически к изменению концентрации реагирующих компонентов и, следовательно, химико-структурного состава покрытий. Таким образом, с изменением температуры, давления или концентрации составляющих компонентов неизбежно должно изменяться равновесное состояние реакции синтеза и, как следствие, структура и состав покрытия, как и должно быть согласно принципу Ле Шателье [4]. Учитывая, исходя из изложенного, неизбежную неоднозначность и неопределенность свойств создаваемых покрытий после их осаждения и принципиальные трудности в идентификации этих свойств, представляется актуальной задача экспериментальной оценки влияния вариаций технологии непосредственно на прочность покрытий или композиций основа-покрытие. Отображением прочностных свойств может служить сопротивление усталости таких композиций как достаточно информативная и наиболее практически важная характеристика покрытий.

Цель работы. Посредством проведения высокочастотных усталостных испытаний необходимо получить экспериментальные данные о пределе выносливости σ_{-1} титана ВТ1-0 с вакуум-плазменными TiN-покрытиями. Установить зависимость σ_{-1} от толщины покрытий и вариантов процесса осаждения. Полученная экспериментальная зависимость позволит, как представляется, наметить принципиальный подход к выбору оптимальных технологических параметров процесса и параметров покрытий с точки зрения воспроизводимости и стабильности повышенных характеристик выносливости. Предполагается, что ожидаемые σ_{-1} , полученные в некотором установленном диапазоне параметров, не должны существенно зависеть от их незначительных изменений, обусловленных возможными погрешностями технологии, в том числе случайными. Высокая частота испытаний (10...20 кГц) дает возможность значительно ускорить получение σ_{-1} . Предполагается, что выводы, предложения и методические подходы, вытекающие из проведенного исследования, могут быть использованы также для оценки σ_{-1} иных конструкционных материалов с покрытиями рассмотренного типа, в том числе и при других частотах переменного нагружения.

Испытательная установка и экспериментальная методика. Исследование усталостной прочности проводилось на резонансной магнитоэластичной установке (рабочая частота 10 кГц), являющейся одной из модификаций установок, описанных в [5]. Отличительная особенность данной установки состоит в использовании в ее составе концентратора специальной конструкции [6], позволяющего существенно повысить размах рабочих ампли-

туд до уровней 300...400 мкм, что гарантирует успешное проведение испытаний практически любых высокопрочных конструкционных материалов и композиций. Экспериментальная методика определения σ_{-1} основана на возбуждении резонансных изгибных колебаний испытуемых образцов по одной из высших форм с уровнем амплитуд, достаточным для их усталостного разрушения. Использовались прямоугольные призматические образцы постоянного поперечного сечения как наиболее технологичные из всех известных, что в сочетании с высокой частотой нагружения послужило дополнительной предпосылкой ускорения и удешевления испытаний. Выбор требуемых резонансных размеров образцов, расчет разрушающих напряжений и техника проведения усталостных испытаний по данной методике изложены ранее [7, 8].

Особенности технологии напыления. TiN-покрытия на основе реагента N_2 наносились известным методом КИБ на титановые образцы после их очистки ионным травлением. Образцы вырезались из одного листа титана (толщина 0,5 мм, ширина 6 мм и длина 35 мм) с учетом технологического припуска. Варьируемая технология нанесения покрытий обеспечивается функциональными возможностями стандартного оборудования и заключается в выборе соответствующего давления P , времени t подачи азота N_2 , температуры T в рабочей камере, количества задействованных мишеней (испарителей Ti), величины тока A дуги. Энергетические параметры напыления, толщины TiN-покрытий, экспериментальные и расчетные характеристики исследованных образцов с покрытиями приведены в таблице.

Параметры напыления, характеристики и результаты экспериментов

№ партии образцов	$P \cdot 10^{-1}$, Па	T , °C	h , мкм	σ_{-1} , МПа	f , кГц	c	σ_a , МПа	δ , %	$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1(0)}}$	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1(0)}}$
1	–	–	Без покрытия	265	9,290	–	265,00	–	1,000	1,000
2	4,0	550	1	280	9,420	2,80	272,00	2,940	1,056	1,0264
3	4,0	550	6	295	10,070	2,90	306,00	–3,600	1,113	1,1550
4	4,0	550	12	350	10,670	2,75	336,00	3,900	1,320	1,2700
5	3,2	500	1	307	9,506	4,35	277,63	10,600	1,158	1,0480
6	3,5	500	10	300	9,930	1,65	290,33	3,330	1,132	1,0950
7	3,5	500	12	290	9,980	1,54	290,36	–0,125	1,094	1,0960
8	3,7	500	15	285	10,120	1,52	294,83	–3,300	1,075	1,1120
9	5,0	450	1	297	9,290	3,13	273,20	8,700	1,120	1,0310
10	5,0	450	6	288	9,950	2,50	298,30	–3,450	1,087	1,1260

Номинальные толщины h покрытий определены как произведение Vt , где V – скорость осаждения покрытия, зависящая, в частности, от давления P .

Так, при $V = 0,2$ мкм/мин и $P = 4 \cdot 10^{-1}$ Па при $t = 30$ мин получим $h = 6$ мкм, при $t = 60$ мин – $h = 12$ мкм и т.д. Для получения покрытий (в таблице № 2–4) использовался один испаритель Ti с силой тока дуги 100 А (технология 1). Покрытия (№ 5–8) получены с помощью двух испарителей с пониженным током дуги до 60 А и несколько пониженным давлением и температурой (технология 2). Предполагается исходя из общих представлений, частично отмеченных выше, что в этом случае должны уменьшиться размер зерна в покрытии, его пористость и число несплошностей, а с уменьшением пористости и числа дефектов должна повыситься прочность и, как следствие, выносливость. Покрытия (№ 9, 10) получены при повышенном давлении, пониженной температуре и увеличенной силе тока дуги до 100 А при двух испарителях (технология 3). Такое видоизменение по предположению должно несколько стабилизировать состав и свойства покрытия по толщине в результате ускорения процесса, поскольку скорость осаждения повышается до $V \approx 0,3$ мкм/мин.

Результаты усталостных испытаний. Кривые усталости и пределы выносливости σ_{-1} , полученные для трех партий образцов с покрытиями, соответствующими технологиям 1–3, на базе 10^7 цикл представлены соответственно на рис. 1 и в таблице.

Сравнение данных по σ_{-1} (таблица) свидетельствует об упрочняющем действии вакуум-плазменных TiN-покрытий во всем рассмотренном диапазоне толщин при $N \leq 10^7$ цикл. Результаты, полученные в зависимости от технологических параметров напыления, расходятся как в количественном, так и в качественном отношении. Так, зависимость σ_{-1} от толщины покрытия h в одних случаях (№ 2–4) с увеличением h возрастает, в других (№ 5–8, 9, 10) – убывает. По-видимому, технологические различия напыления, влияющие отмеченным образом на выносливость, вызывают соответствующие изменения в условиях осаждения и формирования покрытия, в его химико-структурном составе и, как следствие, в физико-механических характеристиках, в том числе и усталостных. Исходя из этого можно заключить, что в целом эти характеристики, определяющие прочность композиции основа–покрытие, являются переменными величинами и должны зависеть от условий осаждения, влияющих на строение субструктуры покрытий, которая может видоизменяться также по толщине.

Расчетный метод. Количественную оценку циклической прочности в зависимости от подобного влияния можно получить также расчетным путем, если воспользоваться ранее предложенной зависимостью для двухстороннего покрытия [9]:

$$\sigma_a = \frac{1 + c\eta}{1 + \eta} \left[\sigma_{-1(o)} + \Delta E_o \frac{c\eta}{(1 + c\eta)(3 + c\eta)} \right], \quad (1)$$

где σ_a – предельное (разрушающее) напряжение композиции; $\sigma_{-1(o)}$, E_o – предел выносливости и модуль Юнга основы; $\Delta = (\alpha_o - \alpha_{\Pi})(T - T_1)$; α_o , α_{Π} – коэффициенты температурного расширения основы и покрытия; T , T_1 – соответственно температура кристаллизации (рабочая) и комнатная; $\eta = 6h/H$; h – толщина покрытия; H – толщина основы; c – параметр, в первом

приближении определяемый как $E_{\text{п}}/E_0$ ($E_{\text{п}}$ – модуль Юнга компактного (промышленного) материала покрытия). Заметим, что при выводе (1) учитывалось влияние остаточных напряжений в основе и покрытии, значения которых выражены через параметры Δ , h , H , $E_{\text{п}}$, E_0 .

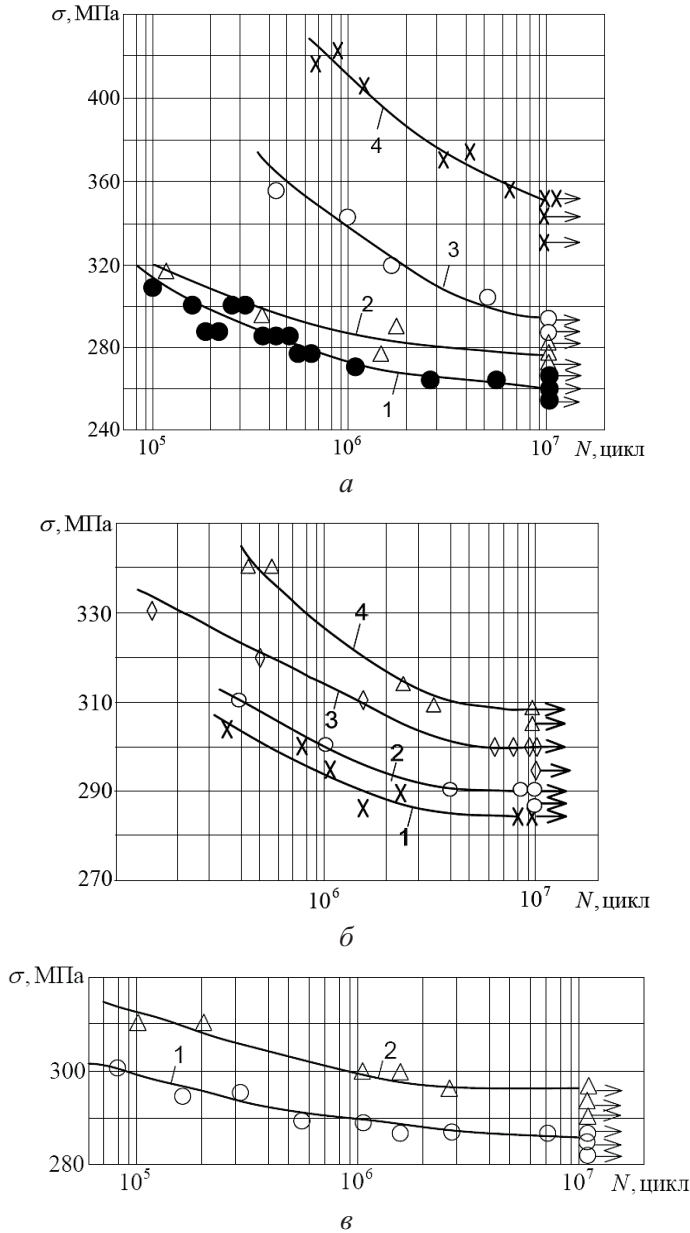


Рис. 1. Кривые усталости титана с покрытием: а, б, в – технологии 1, 2, 3 соответственно (а: 1, ● – без покрытия; 2, Δ – $h = 1$ мкм; 3, \circ – $h = 6$ мкм; 4, \times – $h = 12$ мкм; б: 1, \times – $h = 15$ мкм; 2, \circ – $h = 12$ мкм; 3, \diamond – $h = 10$ мкм; 4, Δ – $h = 1$ мкм; в: 1, \circ – $h = 6$ мкм; 2, Δ – $h = 1$ мкм).

Согласно (1) предполагается, что, приняв характеристику $E_{\text{п}}$ неопределенной, можно с помощью параметра c оценить интегральное влияние

химико-структурных и физико-механических особенностей покрытия и переходной зоны, вызванных условиями осаждения, на σ_a . В связи с этим очевидно, что в каждом отдельном случае параметр c следует определять исключительно на исходных образцах из тех партий, которые использовались для экспериментального изучения выносливости. Наиболее целесообразно и корректно определять параметр c резонансным методом, поскольку характер и природа силового циклического воздействия на композицию в этом случае и при экспериментальном определении выносливости будут мало отличаться, особенно при сохранении неизменным номинального уровня частот нагружения.

При резонансных изгибных колебаниях балки-образца без покрытия модуль Юнга материала основы вычисляется из соотношения

$$E_o = \frac{12\omega_o^2 l_o^4 \rho_o}{\lambda_o^4 H^2}, \quad (2)$$

где $\omega_o = 2\pi f_o$; f_o – резонансная частота; l_o , H – длина и толщина образца; λ_o – частотный параметр для данной формы свободных колебаний; ρ_o – плотность материала основы.

Для образцов с двухсторонним покрытием длиной l , толщиной $h \ll H$, модулем Юнга E_{Π} , плотностью ρ_{Π} , полагая связь покрытия с основой абсолютно жесткой, вместо (2) необходимо рассматривать выражение, полученное методом эквивалентных жесткостей [10]:

$$E_o H + 6hE_{\Pi} = \frac{12\omega^2 l^4 (\rho_o H + 2\rho_{\Pi} h)}{\lambda^4 H^2}, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – резонансная частота изгибных колебаний образца композиции; λ – частотный параметр для принятой формы свободных колебаний.

Поскольку в общем случае E_{Π} может изменяться по толщине покрытия, эту характеристику (3) следует полагать усредненной. Из (2) и (3) после принятия обозначений $\eta = 6h/H$ и $c = E_{\Pi}/E_o$, придав величине c смысл одноименного параметра, входящего в зависимость (1), получим соотношение для его определения. При этом под E_{Π} , как отмечено, будем подразумевать некий эквивалентный усредненный модуль упругости покрытия и переходной зоны, изменяющийся в зависимости от условий осаждения. Если при эксперименте обеспечить неизменной форму колебаний образцов с покрытием и без покрытия, то следует положить $\lambda = \lambda_o$, и поэтому формулу для вычисления c запишем в виде

$$c = \left(\frac{f^2}{f_o l_o^2} \right)^2 \left(\frac{1}{\eta} + \frac{\rho_{\Pi}}{3\rho_o} \right) - \frac{1}{\eta}. \quad (4)$$

Для повышения достоверности определяемых c заранее обеспечивали равенство длин образца $l = l_o$, исключив их экспериментальное измерение,

вследствие чего точность вычислений по формуле (4) будет определяться только точностью измерения частот f_0 и f , которая в случае применения электронного частотомера является вполне достаточной. Величина $\rho_{\text{п}}/3\rho_0 = \gamma_{\text{п}}/3\gamma_0$ (γ – удельный вес), как слабо влияющая на результаты вычислений при незначительных колебаниях $\gamma_{\text{п}}$, принималась равной 0,407 не зависимо от условий осаждения, учитывая, что $\gamma_0 = 4,5 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³ для ВТ1-0 и $\gamma_{\text{п}} = 5,49 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³ для TiN [11]. Результаты измерений частот для консольного закрепления образца, а также вычисленные величины c приведены в таблице. Там же представлены σ_a , рассчитанные согласно (1) с помощью найденных c . При этом использовали такие параметры: $\alpha_0 = 9 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹ [11]; $\alpha_{\text{п}} = 6,6 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹ [12]; $E_0 = 1,037 \cdot 10^5$ МПа, вычисленное согласно (2); $\Delta = \Delta\alpha\Delta T = 1,2 \cdot 10^{-3}$. Последняя величина получена при неизменном $\Delta T = (5 \cdot 10^2)$ °C ввиду незначительного влияния ΔT на конечный результат расчета при данном диапазоне температур T (таблица). В таблице приведены также результаты сопоставления экспериментальных σ_{-1} значений пределов выносливости с расчетными σ_a , выраженные в виде относительного параметра $\delta = (\sigma_{-1}/\sigma_a - 1) \cdot 100\%$.

Сопоставление полученных результатов, их обсуждение и анализ.

Значения c в зависимости от толщины покрытия при трех вариантах технологии напыления представлены на рис. 2. Видно, что при толщинах до ~ 6 мкм и выше ~ 8 мкм зависимость $c(h)$ явно неоднозначна, что свидетельствует, по-видимому, о нестабильности условий осаждения и формирования структуры, которые, как можно судить из хода кривых, несомненно, явно зависят от параметров напыления. Очевидно поэтому, что для воспроизводимости и стабильности свойств покрытий TiN, более-менее не зависящих от технологии напыления, на практике следует выбирать такой диапазон толщин, при котором значения c будут не очень сильно различаться между собой.

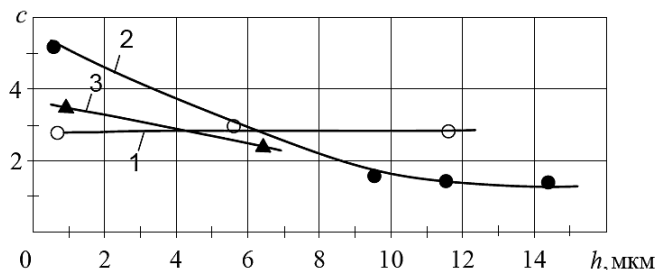


Рис. 2. Зависимость характеристики c от толщины покрытия h : 1, ○ – технология 1; 2, ● – технология 2; 3, ▲ – технология 3.

В данном случае необходимо ограничиться толщинами $h^* = (6...8)$ мкм (рис. 2). Этот диапазон с точки зрения устойчивости предполагаемых свойств покрытия, отображением которых является c , практически гарантирует их стабильность и, как следствие, должен обеспечивать определенную независимость предела выносливости от вышеприведенных возможных вариаций технологии.

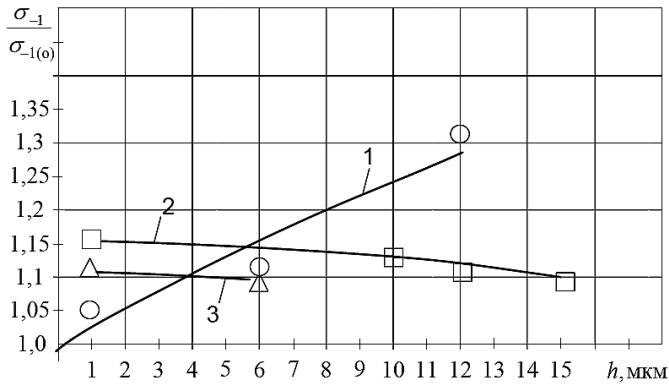


Рис. 3. Зависимость отношения $\sigma_{-1}/\sigma_{-1(0)}$ от толщины покрытия h : 1, ○ – технология 1; 2, □ – технология 2; 3, △ – технология 3.

Из рис. 3, где представлена зависимость относительных значений пределов выносливости $\sigma_{-1}/\sigma_{-1(0)}$ от толщины покрытия h , видно, что при указанном диапазоне h^* значения циклической прочности должны быть несколько меньше, чем при некоторых толщинах вне этого диапазона. Однако, как отмечалось выше, циклическая прочность должна оставаться стабильно устойчивой. Установленный оптимум h^* является ориентировочным, так как в силу вполне вероятных неточностей в идентификации технологических параметров напыления, в том числе и толщин, вводимых в расчет [13], возможно его расширение или сужение со сдвигом в ту или иную сторону. Уточнение h^* возможно также в результате расширения набора экспериментальных данных. Полученное (экспериментально) существенное изменение c при изменении толщины покрытия в первом случае (на рис. 2 кривые 2, 3) и практически неизменность этой характеристики во втором (кривая 1) можно объяснить, как указывалось выше, различными условиями осаждения. Можно предположить, что в первом случае в начале процесса образуется сверхтонкий высокомодульный межфазный слой вследствие, например, диффузионного взаимодействия покрытия с основным металлом, а также с попутно образовавшимися микроструктурными соединениями на основе остаточных газов различной природы. Этот слой может содержать также неопределенное количество фракций Ti_xN , свойства которых отличаются от TiN . После формирования структуры межфазного слоя формирование основного покрытия будет происходить в условиях, заданных выбранной технологией, и его свойства уже не должны существенно зависеть от изменения (увеличения) толщины покрытия. Если толщина высокомодульного слоя S , а толщина покрытия h , то согласно правилу смеси для эквивалентного модуля упругости получим

$$E_{\text{ЭКВ}} = (E_{\text{П}} h + E_S S)/(h + S). \quad (5)$$

Поскольку по условию имеем $c = E_{\text{ЭКВ}}/E_0$, с помощью (5) и найденных из эксперимента значений c можно проверить справедливость изложенной схемы формирования покрытия, установив связь между c и h . Заменяя в (5) h выражением $h - S$, так как только эта часть общей толщины соответствует

E_{Π} , получим соотношение $cE_0 = E_{\Pi} + (S/h)(E_S - E_{\Pi})$. Полагая, согласно данным таблицы (покрытия № 5–8) и кривой 2 (рис. 2), $c = 4,35; 1,65; 1,54; 1,52$ и соответственно $h = 1; 10; 12; 15$ мкм при $E_0 = 1,037 \cdot 10^4$ МПа, приходим к системе уравнений $E_{\Pi}(1 - S) + SE_S - 4,511 = 0; 12,599 - 9E_{\Pi} = 0; 14,653 - 11E_{\Pi} = 0; 19,129 - 14E_{\Pi} = 0$. Из последних трех уравнений, отвечающих $h = 10; 12; 15$ мкм, получим соответственно $E_{\Pi} = (1,4; 1,332; 1,37) \cdot 10^4$ МПа, т.е. в среднем не зависимо от толщины покрытия имеем $E_{\Pi} \approx 1,37 \cdot 10^4$ МПа. Из первого уравнения при найденном E_{Π} получим в зависимости от S значения E_S . Так, если $S = 0,1; 0,5; 1,0$ мкм, то $E_S = (32,807; 7,655; 4,511) \cdot 10^4$ МПа. Очевидно, что для этого случая (на рис. 2 кривая 1) условия осаждения таковы, что $E_{\Pi} \approx E_S$, и поэтому в среднем имеем $E_{\Pi} = cE_0 \approx \approx 2,92 \cdot 10^4$ МПа для всех толщин $h = 1; 6; 12$ мкм. В третьем случае (на рис. 2 кривая 3) аналогично из системы $E_{\Pi}(1 - S) + SE_S - 3,2458 = 0; 12,3092 - 5E_{\Pi} = 0$ получим $E_{\Pi} = 2,462 \cdot 10^4$ МПа и при $S = 0,1; 0,5; 1,0$ мкм – соответственно $E_S = (10,3; 4,03; 3,25) \cdot 10^4$ МПа. Результаты вычислений свидетельствуют о правомерности предложенной схемы формирования покрытия, однако произвольный выбор S приводит к несопоставимым (в рамках принятой технологии) значениям E_S . Это обстоятельство, в частности, подтверждает принятое в работе предположение о непригодности в общем случае соотношений аддитивности типа (3) или (5) для прямого определения модуля упругости покрытия E_{Π} при $h \ll H$, поскольку этим методом здесь непосредственно определяются не E_{Π} , а $E_{\text{экв}}$, зависящие, как показано выше, от неопределенной составляющей E_S . Последняя характеристика может быть определена, если идентифицировать толщину межфазного слоя S . Предложенная модель покрытия не исключает, как это следует из вычислений, наличие высокомодульного межфазного слоя, что, несмотря на гипотетически возможные сверхвысокие значения E_S , например $32,8 \cdot 10^4$ МПа, позволяет подойти к оценке и объяснению повышенных значений σ_{-1} при $h = 1$ мкм для покрытий № 5 и 9 (таблица). Различие между экспериментальными σ_{-1} и расчетными σ_a значениями в этих случаях сравнительно велико: соответственно $\delta = 10,6$ и $8,7\%$, что, по-видимому, свидетельствует о некотором несовершенстве расчетной зависимости (1), не учитывающей, в частности, эффектов, связанных с распространением трещин в композиции.

Зависимость (1) построена исходя из условия начала трещинообразования в основе [9], т.е. в предположении, что с момента появления усталостной трещины в основном материале (при напряжениях $\sigma_{-1(0)}$) циклическая долговечность композиции в целом должна определяться упругими свойствами элементов основы и покрытия и их размерами. В действительности долговечность после появления трещины зависит также от особенностей распространения последней, в частности от скорости развития с возможным торможением или остановкой. Экспериментальные данные для образцов с покрытиями являются результирующим отображением комплекса реальных факторов, влияющих на долговечность, поскольку пределы выносливости σ_{-1} (таблица) получены по окончательному разрушению композиции, т.е. с учетом кинетики процесса.

Одна из основных схем торможения, или остановки усталостных трещин связана с упрочнением материала у вершины трещины при ее развитии [14]. Очевидно, что этой схеме соответствует также наличие у вершины трещины слоя повышенной прочности или, как в нашем случае, покрытия [15]. Считается доказанным, что преодоление трещиной упрочненной зоны у ее вершины возможно только при увеличении уровня циклических напряжений, поэтому σ_{-1} должно возрасти [14, 15]. Из данных таблицы следует, что большинство экспериментальных результатов по определению σ_{-1} удовлетворительно согласуются с расчетными значениями σ_a , кроме тех, которые соответствуют покрытиям № 5 и 9 при $h=1$ мкм.

Чтобы оценить прочность покрытий в зависимости от их толщины с использованием данных проведенных экспериментов, определим напряжения σ_{Π} , действующие в покрытии при напряжениях $\sigma_{-1(o)} = 265$ МПа и σ_{-1} , приведенных в таблице. Зависимость (1), как нетрудно убедиться, эквивалентна соотношению $\sigma_{-1(o)} + \eta\sigma_{\Pi} + \Delta E_o \eta c / (3 + c\eta) = \sigma_a (1 + \eta)$, поэтому, заменив в нем σ_a величиной σ_{-1} , получим для покрытий № 5 и 6 при $h=1$ и 10 мкм соответственно $\sigma_{\Pi} = 3629,6$ и 527,5 МПа, а для покрытий № 9 и 10 при $h=1$ и 6 мкм – $\sigma_{\Pi} = 2835,5$ и 509,6 МПа. Как видно, при $h=1$ мкм напряжения в покрытии σ_{Π} при соответствующих уровнях разрушающих напряжений, а именно при $\sigma_{-1} = 307$ и 297 МПа (таблица) существенно (на порядок) выше, чем в других случаях, поэтому покрытия неизбежно должны являться самостоятельным упрочнителем композиции и вследствие этого достаточно эффективным барьером на пути развития трещин усталости.

Учитывая изложенное, особый интерес представляет принципиальная возможность путем вариации параметров напыления повысить предел выносливости σ_a до весьма высоких значений при толщинах покрытий порядка (1-2) мкм и менее, что видно, например, из характера левой части кривой 2 на рис. 2. Такая возможность следует, кроме того, из подтвержденного многими исследованиями тонкопленочных материалов [3] эффекта увеличения прочности при сверхмалых толщинах. Объяснения этого явления разными исследователями в итоге сводятся к тому, что в данном случае наблюдается сближение теоретической и технической прочности вследствие реального создания малодефектных структур в тонкопленочных материалах. Согласно основному постулату статистической теории масштабного эффекта, предполагается наличие в образцах дефектов, распределенных по их объему. Именно наличием малоразмерных дефектов объясняется повышение прочности с уменьшением сечения образца, так как размер дефекта не может быть больше толщины или диаметра последнего. С другой стороны, с увеличением толщины (диаметра) образца возрастает вероятность наличия в нем дефектов достаточно больших размеров, с чем и связано уменьшение прочности.

Таким образом, в соответствии с отмеченными соображениями и приведенными экспериментальными данными усталостная прочность покрытий может быть увеличена за счет уменьшения их толщины h , вследствие чего должны повыситься характеристики выносливости композиции σ_a . На практике реальным препятствием для ожидаемого повышения σ_a может оказаться возрастающая со значительным уменьшением h вероятность появления несплошностей и прерывистой структуры как процесса, противополож-

ного упрочнению за счет уменьшения h . Причиной возникновения отмеченных дефектов могут быть: недостаточное внимание к контролю за условиями напыления; неэффективность контроля толщины h ; самопроизвольное разрушение покрытия вследствие повышения уровня остаточных напряжений в нем. Эти и некоторые другие причины, связанные с трудноконтролируемыми технологическими процессами, могут привести к противоположному результату: вместо повышения σ_a к неожиданному его уменьшению до значений, равных или ниже характеристик выносливости основы $\sigma_{-1(o)}$, на что уже обращалось внимание ранее, например, в работе [16]. Очевидно также, что значительное уменьшение h нецелесообразно не только вследствие возможной нестабильности и невоспроизводимости требуемых свойств из-за несовершенства технологии, но и высокой вероятности необратимых внешних повреждений, которые могут свести на нет ожидаемое преимущество сверхмалых толщин h и, как следствие, при эксплуатации понизить σ_a до недопустимых уровней. Таким образом, можно заключить, что положительный эффект сверхтонких покрытий может быть реализован и иметь прикладное значение, по-видимому, прежде всего в многослойных покрытиях и композициях.

Выводы

1. Построены кривые усталости технического титана с TiN-покрытием в зависимости от условий осаждения и толщины покрытия.
2. Показано, что во всех исследованных случаях TiN-покрытия повышают сопротивление усталости композиции основа–покрытие.
3. Установлен оптимальный диапазон толщин покрытия, при котором изменение условий осаждения мало влияет на уровень выносливости композиции.
4. Отмечено удовлетворительное согласование между экспериментальными и расчетными значениями пределов выносливости системы основа–покрытие, что обосновывает и подтверждает работоспособность ранее предложенной расчетной модели.
5. Обсуждена и подтверждена принципиальная возможность существенного повышения сопротивления усталости в случае формирования сверхтонких покрытий при вполне определенных условиях их осаждения.

Резюме

Досліджено вплив вакуум-плазмових покриттів із нітриду титану TiN на опір втомі титану VT1-0 в залежності від параметрів напылення та товщини покриттів. Проаналізовано отримані результати з метою необхідності підвищення границі витривалості композиції основа–покряття. Показано, що у всіх досліджених випадках TiN-покряття підвищують опір втомі. Установлено оптимальний діапазон товщин покриття, за якого зміна умов осадження мало впливає на рівень витривалості. Відмічено задовільне узгодження між експериментальними та розрахунковими значеннями границь витривалості, які отримано за допомогою раніше запропонованої розрахункової моделі.

Обговорено і підтверджено принципову можливість суттєвого підвищення опору втомі у випадку формування надтонких покриттів при цілком визначених умовах їх напылення.

1. Блинов В. Н., Богомолов В. Г., Латышев А. Е. Опытная установка для ионной цементации стали // *Металловедение и терм. обраб. металлов.* – 1982. – № 1. – С. 32 – 33.
2. Бякова А. В., Горбач В. Г., Власов А. А. Структурные аспекты повышения работоспособности покрытий из высокопрочных материалов // *Пробл. прочности.* – 1993. – № 9. – С. 48 – 55.
3. Ильинский А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсноупрочненных пленок. – М.: *Металлургия*, 1986. – 142 с.
4. Глинка Н. Л. *Общая химия.* – М.: *Гостехиздат*, 1958. – 732 с.
5. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко. – Киев: *Наук. думка*, 1979. – 336 с.
6. Трапезон К. А. Метод симметрий при расчете и проектировании акустических концентраторов // *Акуст. вестн.* – 2006. – 9, № 4. – С. 50 – 55.
7. Трапезон А. Г. К методике испытаний на усталость тонколистовых материалов при плоском изгибе на высоких частотах нагружения // *Пробл. прочности.* – 1977. – № 3. – С. 38 – 41.
8. Трапезон А. Г. Расчет упругих элементов при резонансных усталостных испытаниях. – Киев: *Наук. думка*, 1983. – 96 с.
9. Трапезон А. Г. К методике ускоренной оценки усталости металлов с упрочняющими покрытиями // *Пробл. прочности.* – 2009. – № 2. – С. 79 – 90.
10. Тимошенко С. П. *Сопротивление материалов.* Т. 1. – М.: *Физматгиз*, 1960. – 379 с.
11. *Сопротивление* материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Т. 1 / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: *Наук. думка*, 1994. – 288 с.
12. Соломин Н. В. *Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций.* – М.: *Машиностроение*, 1980. – 128 с.
13. Трапезон А. Г. Методологические проблемы при исследовании тонкопленочных упрочняющих покрытий // *Пробл. прочности.* – 2007. – № 2. – С. 99 – 112.
14. Кудрявцев П. И. *Нераспространяющиеся усталостные трещины.* – М.: *Машиностроение*, 1982. – 174 с.
15. Микляев П. Г., Нешпор Г. С., Кудряшов В. Г. *Кинетика разрушения.* – М.: *Металлургия*, 1979. – 279 с.
16. Мовчан Б. А., Луговской Ю. Ф., Гречанюк Н. И. и др. *Механические свойства конденсированных материалов Fe–Cu при циклическом нагружении* // *Пробл. спец. электротехнологии.* – 1987. – № 3. – С. 36 – 41.

Поступила 21. 01. 2009