



Трапезон А. Г.

Институт проблем
прочности
им. Г. С. Писаренко
НАН Украины

Trapezon A. G.

G.S. Pisarenko Institute
for Problems of Strength
National Academy of
Sciences of Ukraine

УДК 621.792.4

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С УПРОЧНЯЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Разработан расчетный метод прогнозирования усталостной прочности материалов с покрытиями. Полученное расчетное соотношение учитывает толщину покрытия, его структурную неоднородность и наличие остаточных напряжений. Сопоставление расчетных и опытных данных дает расхождение в (0.5...2)%.

Ключевые слова: вакуум-плазменные покрытия, расчетная модель, предел выносливости, толщина покрытия, структурная неоднородность, остаточные напряжения.

Введение. Перспективным методом поверхностного упрочнения деталей газотурбинных агрегатов (ГТА) является метод упрочнения при помощи тонко-пленочных вакуум-плазменных покрытий. Как показал анализ литературных источников, покрытия такого типа обеспечивают неизменную повторяемость эффекта упрочнения при знакопеременном нагружении, повышая в разной мере усталостную прочность сталей, титановых сплавов, чугуна и др. металлов [1]. На практике, однако, проблема выбора способа упрочнения, тесно связанного с методическими и технологическими особенностями нанесения покрытий, по-прежнему решается методом проб, что обусловлено отсутствием надежных теоретических основ, разработка которых остается в начальном состоянии. Простейший подход для прогнозирования прочностных характеристик основан на соотношении аддитивности [2,3]

$$\sigma = \sigma_o - V(\sigma_o - \sigma_n), \quad (1)$$

где $\sigma, \sigma_o, \sigma_n$ – напряжения соответственно в композиции (системе основа-покрытие), основе и покрытии при фиксированных деформациях; V – объемное содержание покрытия.

Модель (1), как видно, не учитывает структурных особенностей покрытия, но позволяет сделать некоторые полезные выводы. Так, из (1) следует, что $\sigma > \sigma_o$, если $\sigma_n > \sigma_o$, т.е. можно предположить, что упрочнение композиции возможно в случае

значений прочности покрытия, превышающих значения прочности основы. Исходя из этого, представляются перспективными усилия, направленные на получение высокопрочных тонко-пленочных элементов как аналога покрытий. Высокие значения прочности пленок достигаются, в частности, путем диспергирования их структуры, что для экспериментальных данных, полученных при изучении свойств поликристаллических пленок, представлено в виде эмпирического соотношения типа Холла-Петча [4], справедливого, однако, в узком интервале толщин, т.е.

$$\sigma_g = \sigma^* + kh^{-n}, \quad (2)$$

где h – толщина пленки; $n=0,5$; σ_g – предельное напряжение; σ^*, k – параметры данного материала.

В работе [5] применительно к пределу текучести микрослойных композиций Fe-Cu для соотношения (2) установлен расширенный интервал $h=10...100$ мкм, причем показано, что при $h=10...50$ мкм соотношение (2) лучше выполняется при $n=1$.

Из-за весьма неопределенного физического смысла параметров σ^* и k зависимость (2) малоприспособна для практики, но может быть использована в частных теоретических исследованиях.

Цель работы. Ввиду того, что соотношения типа (1) и (2), исходя из различных предпосылок, направлены на



решение единой проблемы – прогнозирования прочности при наличии покрытия, возникает вопрос о возможности их синтеза. Учитывая, однако, что эти соотношения не имеют между собой четкой логической связи, прямое их объединение тем или иным образом не представляется возможным.

Решение этой задачи предлагается искать на пути аналитического развития соотношения (1) целесообразным введением в него дополнительных параметров, отображающих влияние реальных факторов, обусловленных наличием покрытия. Ниже на примере случая циклического изгиба изложен метод реализации такого подхода, приведены соответствующие зависимости в форме расчетной модели и результаты проверки ее работоспособности при помощи независимых опытных данных.

Предпосылки к выводу расчетных соотношений. Выражения типа (1) могут быть использованы в случае осевого растяжения-сжатия композиции. При циклическом изгибе соотношения аддитивности (1) в среднем выполняются только тогда, когда композит многослойный, а распределение слоев по его толщине равномерно или же – если композит является равномерной смесью разнородных материалов [6]. При изгибе, следовательно, необходимо располагать иным, соответствующим случаю тонкопленочных покрытий соотношением, которое и было получено ранее [7] в виде

$$\sigma_{-1} = (\sigma_{-1})_o \frac{1 + \eta C}{1 + \eta}, \quad (3)$$

где $\sigma_{-1}, (\sigma_{-1})_o$ – пределы выносливости композита (материала с двухсторонним покрытием) и основы; $\eta = 6h/H$; $C = E_n/E_o = \sigma_n/(\sigma_{-1})_o$; h, H – толщины покрытия и основы, причем $h \ll H$; E_n, E_o – модули Юнга покрытия и основы; σ_n – напряжение в покрытии в момент, когда на поверхности основы напряжения достигают значений предела выносливости $(\sigma_{-1})_o$. Зависимость (3) в силу данной интерпретации σ_n построена, следовательно, из условия, что усталостное разрушение основы в переходной зоне предшествует разрушению покрытия, т.е. эта зависимость предназначена прежде всего для упрочняющих покрытий. Входящие в (3) величины, кроме коэффициента C , полагаются известными. Поскольку модель (3) является континуальной и не учитывает

структурных особенностей покрытия и межфазного слоя, зависящих от технологических параметров и условий нанесения покрытия, то коэффициент C следует полагать эмпирическим. Его выражение в форме отношения E_n/E_o , заложенное в (3), можно использовать в качестве приближения для первичной оценки σ_{-1} в зависимости от толщины покрытия и его модуля упругости, а также при необходимости для уточнения параметров соответствующего технологического процесса. Для такой оценки можно использовать значения E_n , которые могут быть определены или уже известны для аналогичных покрытию компактных материалов. Таким образом, для корректного применения (3) необходимо уточнение значений коэффициента C как параметра, неявно отражающего структуру покрытия. Как представляется, коэффициент C играет здесь ту же роль, что и параметры σ^* и k в соотношении (2), зависящие от структуры материала. Другим существенным фактором, влияющим на усталостную прочность композиции основа-покрытие, являются технологические остаточные напряжения σ_{ocm} , возникающие в основном материале и покрытии после его нанесения. Эти напряжения могут играть заметную роль в упрочнении (или разупрочнении) несущих конструктивных элементов с покрытиями.

Аналитический учет σ_{ocm} при оценке циклической прочности расчетным способом необходим, следовательно, в качестве одной из предпосылок повышения надежности такой оценки. Таким образом, составляющими элементами обобщенной расчетной модели должны являться соотношения, учитывающие влияние толщины покрытия, структурного параметра C и остаточных напряжений.

Построение расчетной модели.

Учесть σ_{ocm} можно путем развития (3) на основе одной из гипотез о влиянии статических (средних) напряжений на предел выносливости. Так, согласно гипотезе Гудмена, как наиболее логически обоснованной и многократно проверенной экспериментально [8,9], можно записать

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_{ocm}}{\sigma_s} \right), \quad (4)$$

где σ_a – предельное напряжение, отвечающее пределу выносливости при дополнительном



действию статического напряжения σ_{cm} ; σ_{-1} – предел выносливости при отсутствии σ_{cm} , т.е. при гармоническом симметричном нагружении; σ_{ϵ} – предел прочности. Заменяя в (3) σ_{-1} , $(\sigma_{-1})_o$, σ_n их аналогами σ_a , $(\sigma_a)_o$, $(\sigma_a)_n$ в соответствии с (4), положив при этом $\sigma_{cm} = \sigma_{ocm}$, получим для предельного напряжения σ_a композиции

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \frac{1}{1+\eta} [\eta \gamma_n \sigma_{ocm(m)} + \gamma_o \sigma_{ocm(o)}], \quad (5)$$

где σ_{-1} – соответствует (3); $\gamma_o = \frac{(\sigma_{-1})_o}{(\sigma_{\epsilon})_o}$; $\gamma_n = \frac{(\sigma_{-1})_n}{(\sigma_{\epsilon})_n}$; $(\sigma_{\epsilon})_o, (\sigma_{\epsilon})_n$ – пределы прочности основы и покрытия; $(\sigma_{ocm})_o, (\sigma_{ocm})_n$ – остаточные напряжения в основе и покрытии, действующие в переходной зоне.

Входящие в (5) величины $(\sigma_{ocm})_o$ и $(\sigma_{ocm})_n$ можно раскрыть, используя соотношения, вывод которых приведен в [10] для балки с одно- и двухсторонним покрытием, нанесенным методом осаждения при повышенных температурах. Образцы для усталостных испытаний чаще всего имеют двухстороннее покрытие (рис. 1).

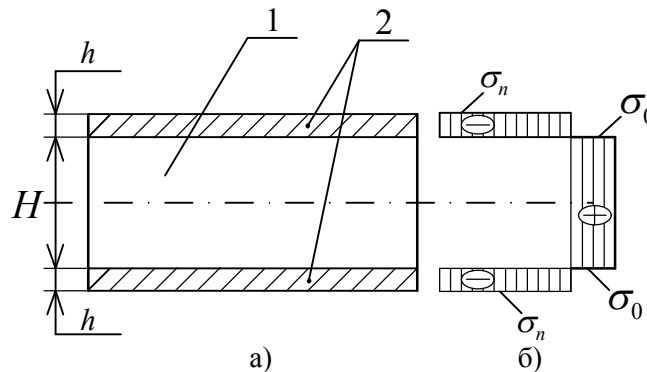


Рис. 1. К определению остаточных напряжений: а) элемент балки 1 с покрытием 2; б) эпюры $\sigma_{ocm} : \sigma_n$ – в покрытии; σ_o – в основе

Для этого случая действительны выражения, имеющие, например при $\alpha_o > \alpha_n$ вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_o &= \Delta \frac{2hE_oE_n}{HE_o + 2hE_n}; \\ \sigma_n &= -\Delta \frac{HE_oE_n}{HE_o + 2hE_n}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\Delta = (\alpha_o - \alpha_n)(t - t_1)$; α_o, α_n – коэффициенты температурного расширения основы и покрытия; t – рабочая температура формирования покрытия; t_1 – температура окончания процесса (комнатная). Из (6) следует, что при $\alpha_o > \alpha_n$ напряжения в основе будут растягивающими, а в покрытии – сжимающими. Кроме того, из сравнения σ_o и σ_n следует, что $\sigma_n = -\sigma_o \frac{H}{2h} = -\frac{3\sigma_o}{\eta}$ и

поэтому после внесения этого значения σ_n в (5) получим

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + \frac{3\gamma_n - \gamma_o}{1+\eta} \sigma_o. \quad (7)$$

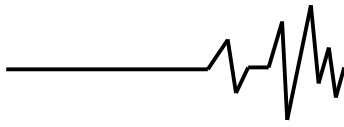
Далее, после подстановки в (7) выражения для σ_{-1} согласно (3) и выражения для σ_o согласно (6), записанного в виде

$$\sigma_o = \Delta E_o \frac{C\eta}{3 + C\eta},$$

получим расчетное соотношение для балочного элемента

$$\sigma_a = (\sigma_{-1})_o \frac{1 + C\eta}{1 + \eta} + \frac{(3\gamma - \gamma_o)C\eta}{(1 + \eta)(3 + C\eta)} \Delta E_o. \quad (8)$$

Для пластинки с покрытием выражения для σ_{ocm} отличаются от (6) только множителем $1/(1-\nu)$ (ν – коэффициент Пуассона), где принято $\nu = \nu_o \approx \nu_n$. Если положить $\nu = 1/3$, что допустимо для большинства



конструкционных материалов, то для пластинчатого элемента второй член выражения (8) необходимо умножить на 3/2.

Величины за исключением C , входящие в (8), полагаются известными. Параметр C как зависимый от технологических условий нанесения покрытия, определяющих химико-структурные, физико-механические и прочностные свойства покрытия и переходной зоны, необходимо установить опытным путем. Резонансный метод определения C приведен в работе [11].

Результаты и анализ оценки σ_a .

Проверку работоспособности модели (8) произведем, используя экспериментальные данные сопротивления усталости материала без покрытия и с покрытием, а также – результаты опытного определения параметра C . В качестве примера рассмотрим оценку σ_a для системы титан-нитрид титана. В работах

[12,13] по исследованию выносливости листового технического титана BT1-0 с упрочняющим вакуум-плазменным покрытием TiN в условиях одно- и двухосного изгиба, выполненного на балочных и пластинчатых образцах, покрытых по единой технологии [14], получены следующие результаты (табл.1).

В табл.1 введены обозначения: m – отношение главных разрушающих напряжений σ_1 и σ_2 в зоне усталостного разрушения; (σ_1^o, σ_2^o) и (σ_1^n, σ_2^n) – пределы выносливости в главных напряжениях материала без покрытия (индекс “о”) и с покрытием (индекс “n”); $(\sigma_{экв}^o, \sigma_{экв}^n)$ – пределы выносливости в эквивалентных напряжениях, вычисленных по критерию [15]; δ – приращение пределов выносливости после нанесения покрытия.

Таблица 1

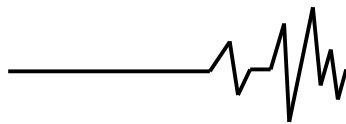
Результаты усталостных испытаний

$m = \sigma_2 / \sigma_1$	Пределы выносливости, МПа						$\delta, \%$
	σ_1^o	σ_2^o	σ_1^n	σ_2^n	$\sigma_{экв}^o$	$\sigma_{экв}^n$	
0	265	0	306	0	265	306	15,47
0,66	300	198	344	227	298	342	14,67
0,94	213	200	257	242	293	353	20,81

Балочные ($m = 0$) и пластинчатые ($m > 0$) образцы имели толщину $H = 0,5$ мм, толщина покрытия $h = 6$ мкм. Ранее было показано [11], что количественные значения C явно зависят как от технологии напыления покрытия, так и от его толщины, поэтому экспериментально был найден оптимальный диапазон толщины h^* , при котором параметр C не очень сильно отличается при различных вариациях технологии. В этом случае для $h^* = 6...8$ мкм из опытов получено $C = 2,9$ [11], что существенно ниже результата прямого вычисления $C = E_n / E_o = 4$ при $E_o = 1,1 \cdot 10^5$ МПа для BT1-0 и $E_n = 4,35 \cdot 10^5$ МПа для компактного горячепрессованного из ультрадисперсных порошков нитрида титана [16] как аналога покрытия TiN.

Значения коэффициентов γ_o и γ_n устанавливаем по справочным данным и дополнительным соображениям. Для титановых сплавов $\gamma_o = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_s} \cong 0,5$ [17], для различных разновидностей технической

керамики более-менее справедливо $\gamma_n = 0,3$ [18,19]. Если однако учесть, что соотношение (3) может быть применимо также и при статическом изгибе композиции с тонкопленочным покрытием при замене в (3) соответственно σ_{-1} , $(\sigma_{-1})_o$, $C = \sigma_n / (\sigma_{-1})_o$ на σ_s , $(\sigma_s)_o$, $C^* = \sigma_n^* / (\sigma_s)_o$, то в силу весьма малых значений η получим, что для данного композита также будет справедливо $\sigma_{-1} / \sigma_s = 0,5$. Отсюда следует, что для переходной зоны величина σ_n / σ_n^* также должна быть равна γ_o независимо от реальных σ_n и σ_n^* , т.е. и в случае $\sigma_n = (\sigma_{-1})_n$ и $\sigma_n^* = (\sigma_s)_n$. Принимаем поэтому и для покрытия $\gamma_n = 0,5$, т.е. в (8) следует положить $3\gamma_n - \gamma_o = 1$. Вакуум-плазменная технология напыления, которая использовалась при подготовке образцов с покрытием для усталостных испытаний, обеспечивала температуру осаждения в рабочей камере (500...600)°C, поэтому для расчета принимаем



разность температур $t - t_1 = 550^\circ\text{C}$. Коэффициенты линейного расширения α_o и α_n известны: $\alpha_o = 9 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ [18], $\alpha_n = 6,6 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ [20], поэтому $\Delta = (\alpha_o - \alpha_n)(t - t_1) = 1,32 \cdot 10^{-3}$. Введение вышеперечисленных исходных данных в (8) приводит к следующим результатам (табл.2).

Таблица 2

Результаты расчета характеристик усталости

$m = \sigma_2 / \sigma_1$	$\sigma_a, \text{МПа}$			$\delta, \%$	$\sigma_a, \%$	
	σ_1^n	σ_2^n	$\sigma_{экр}^n$		$\sigma_1^n, \%$	$\sigma_2^n, \%$
0	307,63	0	307,3	0,53	16,08=12,76+3,32	0
0,66	351,50	236,4	349,5	2,18	17,16=12,76+4,4	19,77=12,77+6,6
0,94	253,06	239	347,75	1,5	18,97=12,76+6,21	19,37=12,76+6,6

Обозначения для расчетных напряжений, приведенные в табл.2, соответствуют тем же, что и в табл.1 для напряжений, полученных по результатам усталостных испытаний. Различие в расчетных и экспериментальных данных, выраженное через параметр δ (табл.2), как следует из их сравнения, весьма незначительно – (0,5...2,2)%. Этот результат позволяет использовать модель (8) также и для отдельной количественной оценки упрочнения, вызванного только наличием покрытия без учета σ_{ocm} и отдельно – от действия σ_{ocm} , что выражается соответственно первым и вторым слагаемыми соотношения (8). Такие отдельные данные об упрочнении основы приведены в виде значений $(\sigma_1^n, \sigma_2^n)\%$. Как следует из табл.2, основное упрочнение ($\approx 13\%$) вызвано собственно наличием покрытия, а дополнительное ($\approx 3...6\%$) – действием σ_{ocm} .

Прогнозирование сопротивления усталости возможно также по соотношению (5) после введения в него значений σ_{ocm} , найденных из эксперимента на основе анализа изгиба образцов с односторонним покрытием [7,10]. В принципе такой подход не отличается от изложенного выше, однако на практике требует излишних затрат времени и преодоления некоторых технических проблем, могущих существенно исказить результат.

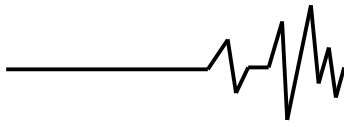
Во-первых, необходимо обеспечить полную идентичность покрытий на образцах для усталостных испытаний и на образцах для определения σ_{ocm} . Во-вторых, необходимо по возможности учесть наложение дополнительных σ_{ocm} , неизбежно возникающих вследствие наклепа при вырезке образцов. Внешним проявлением этого является неконтролируемое неравномерное коробление, наблюдаемое после вырезки, что

особенно заметно, если образцы имеют толщину намного меньше их длины. Эти эффекты, влияющие на точность соответствующих измерений, предусмотренных методикой [7], минимизируются при увеличении толщины, что и было проверено на специально поставленных опытах. Однако, увеличение толщины по сравнению с исходной опять-таки может нарушить идентичность образцов теперь уже по физико-механическим свойствам основы, особенно если эти образцы принадлежат иной партии материала. Следует заметить также, что необходимость определения коэффициента C как структурного параметра, остается в силе и при данном подходе. Таким образом, изложенная выше схема расчета пределов выносливости по соотношению (8) может быть принята в качестве базовой рабочей модели как по простоте ее использования, так и по приведенным выше результатам ее проверки. Модель (8), следовательно, может найти практическое применение для прогнозирования усталостной прочности материалов с покрытиями.

Заключение. Путем аналитического развития существующих моделей разработан метод прогнозирования усталостной прочности материалов с упрочняющими покрытиями. Полученное расчетное соотношение позволяет учитывать толщину покрытия, его структурную неоднородность и наличие остаточных напряжений. Сопоставление результатов расчета с опытными данными дает расхождение в (0,5...2)%, что позволяет сделать вывод о практической целесообразности метода.

Список использованных источников

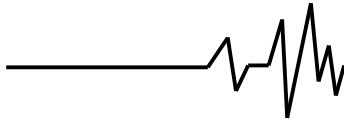
1. Трапезон А. Г. Сопротивление усталости металлов с упрочняющими покрытиями (обзор) / А. Г. Трапезон, Б.А. Ляшенко, М.О. Лысенков // Проблемы прочности. – 2013. – № 3. – С. 42–57.



2. Панасюк В. В. К теории циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионных средах / В. В. Панасюк, Л.В. Ратыч, Н.Н. Дмитрах // Publications of the technical university for Heavy industry. – Miskols. – 1983. – 38. – P. 123–138.
3. Хиббард У. Введение / У. Хиббард // Волокнистые композиционные материалы – М. : Мир, 1967. – С. 13–23.
4. Ильинский А. Н. О влиянии конденсированных пленок на усталостную прочность металлов / А. Н. Ильинский, Л.С. Палатник, И.В. Навроцкий // Проблемы прочности. – 1974. – № 12. – С. 108–110.
5. Луговський Ю. Ф. Закономірності впливу структури на характеристики опору утомі композиційних металевих матеріалів: дис. ... доктора техн. наук : 01.04.07 / Луговський Юрій Федорович. – К., 2011. – 32 с.
6. Райт Е. С. Слоистые металлические композиционные материалы / Е. С. Райт, А.П. Левит // Композиционные материалы с металлической матрицей. – 1978. – Т.4. – 504 с.
7. Трапезон А. Г. Методологические проблемы при исследовании тонкопленочных упрочняющих покрытий / А. Г. Трапезон // Проблемы прочности. – 2007. – № 2. – С. 99–112.
8. Кеннеди А. Дж. Ползучесть и усталость в металлах / А. Дж. Кеннеди ; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1965. – 312 с.
9. Форрест П. Усталость металлов / П. Форрест ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1968. – 352 с.
10. Трапезон А. Г. К методике ускоренной оценки усталости металлов с упрочняющими покрытиями / А. Г. Трапезон // Проблемы прочности. – 2009. – №2. – С. 79–90.
11. Трапезон А. Г. Влияние параметров напыления и толщины нитридитановых покрытий на сопротивление усталости / А. Г. Трапезон, Б. А. Ляшенко // Проблемы прочности. – 2010. – № 6. – С. 64–75.
12. Трапезон А. Г. О влиянии вакуум-плазменных покрытия на выносливость титана при одно- и двухосном изгибе с отношением главных напряжений $\sigma_2/\sigma_1=0,941$ / А. Г. Трапезон, М. О. Лысенков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : 2013 г. : международн. сб. научн. трудов. – Донецк, 2013. – Вып. 1,2 (45). – С. 267–278.
13. Трапезон А. Г. О выносливости тонколистового титана ВТ1-0 с покрытием TiN в условиях высокочастотного нагружения при отношении главных напряжений $\sigma_2/\sigma_1=0; 0,66$ / А. Г. Трапезон, М. О. Лысенков // Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций : 28-31 мая 2013 г. : тезисы докл. междунар. н.-техн. конф. – Киев, 2013. – С. 303–305.
14. Трапезон А. Г. Влияние технологии нанесения вакуум-плазменных покрытий на сопротивление усталости титана / А. Г. Трапезон, А. В. Рутковский, М. О. Лысенков // Надежность и долговечность машин и сооружений : 2012 г. : труды междунар. н.-техн. сб. – Киев, 2012. – Вып. 36. – С. 70–76.
15. Трапезон А. Г. Критерий прочности при высокочастотном двухосном циклическом изгибе / А. Г. Трапезон // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций : 2000 г. : труды междунар. конф. – Киев : Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2000. Т. 1. – С. 167–172.
16. Берди́ков В. Ф. Микромеханические характеристики горячепрессованного нитрида титана из ультрадисперсных порошков / В. Ф. Берди́ков, Ю.Н. Вильк, О.Н. Пушкарев, Е.А. Лавренова // Проблемы прочности. – 1993. – № 3. – С. 90–93.
17. Глазунов С. Г. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – М. : Металлургия, 1974. – 368 с.
18. Трощенко В. Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Т.2 / В. Т. Трощенко, и др. – К. : Наукова думка, 1994. – 701 с.
19. Кузьменко В. А. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / В. А. Кузьменко, и др. – К. : Наукова думка, 1979. – 336 с.
20. Соломин Н. В. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций / Н. В. Соломин. – М. : Машиностроение, 1980. – 128 с.

Список источников в транслитерации

1. Trapezon A. G. Soprotyvlenie ustalosti metallov s uprochnyayuschimisya pokrytiyami (obzor) / A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, M. O. Lysenkov // Problemy prochnosti. – 2013. – №3 – s. 42–57.
2. Panasyuk V. V. K teorii tsiklicheskoj treschinostoukosti konstruktсионikh materialov v korrosionnikh sredakh / V. V. Panasyuk, L. V. Ratych, N. N. Dmitrakh // Publications of the technical university for Heavy industry – Miskols. – 1983. – 38 – p.123–138.
3. Khibbard U. Vvedenie / U. Khibbard // Voloknistye kompozitsionie materialy. – M. : Mir, 1967. – p.13–23.
4. Ilinskiy A. N. O vliyaniy kondensirovannykh plenok na ustalostnyuyu prochnost metallov / A. N. Ilinskiy, L. S. Palatnik, I.



V. Navrotsky // Problemy prochnosti. – 1974. – №12. – s.108–110.

5. Lugovskiy Yu. F. Zakonomirnosti vplyvu struktury na kharakteristiki oporu utomi kompozitsiynikh metalevikh materialiv: dis. ... doktora tekhn. nauk : 01.04.07 / Lugovskiy Yuriy Fedorovich. – K., 2-11. – 32 s.

6. Rayt E. S. Sloistye metallicheskie kompozitsionnye materialy / E. S. Rayt, A. P. Levit // Kompozitsionnye materialy s metallicheskoy matritsey. – 1978. – T. 4. – 504 s.

7. Trapezon A. G. Metodologicheskie problemy pri issledovanii tonkopenochnykh uprochnyayuschikh pokrytiy / A. G. Trapezon // Problemy prochnosti. – 2007. – №2 – s. 99–112.

8. Kennedi A. Dzh. Polzuchest i ustalost v metallakh / A. Dzh. Kennedi ; per. s angl. – M. : Metallurgiya, 1965. – 312 s.

9. Forrest P. Ustalost metallor / P. Forrest ; per. s angl. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 352 s.

10. Trapezon A. G. K metodike uskorennoy otsenki ustalosti metallor s uprochnyayuschimi pokrytiami / A. G. Trapezon // Problemy prochnosti. – 2000. – №2 – s. 79–90.

11. Trapezon A. G. Vliyanie parametrov napyleniya i tolschiny nitridtitanovykh pokrytiy na soprotivlenie ustalosti / A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko // Problemy prochnosti. – 2010. – №6 – s. 64–75.

12. Trapezon A. G. O vliyanii vacuum-plazmennykh pokrytiy na vynoslivost titana pri jedno- i dvukhosnom izgibe s otnosheniem glavnykh napryazheniy $\sigma_2/\sigma_1=0,941$ / A. G. Trapezon, M. O. Lysenkov // Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya : 2013 g. : mezhdunarodn. sb. nauchn. trudov. – Donetsk, 2013. – Vyp. 1,2 (45). – s. 267–278.

13. Trapezon A. G. O vynoslivosti tonkolistovogo titana VT1-0 s pokrytiem TiN v usloviyakh vysokochastotnogo nagruzheniya pri otnoshenii glavnykh napryazheniy $\sigma_2/\sigma_1=0,66$ / A. G. Trapezon, M. O. Lysenkov // Ustalost i termoustalost materialov i elementov konstruktsiy : 28-31 maya 2013 g. : tezisy dokl. mezhdunar. n.-tekhn. konf. – Kiev, 2013. – 303–305.

14. Trapezon A. G. Vliyanie tekhnologii naneseniya vakuum-plazmennykh pokrytiy na soprotivlenie ustalosti titana / A. G. Trapezon, A. V. Rutkovskiy, M. O. Lysenkov // Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy : 2012 g. : trudy mezhdunar. n.-tekhn. sb. – Kiev, 2012. – Vyp. 36. – s. 70–76.

15. Trapezon A. G. Kriteriy prochnosti pri vysokochastotnom dvukhosnom tsiklicheskom izgibe / A. G. Trapezon // Otsenka i obosnovanie prodleniya resursa elementov konstruktsiy : 2000

g. : trudy mezhdunar. konf. – Kiev : In-t problem prochnosti im. G. S. Pisarenko NAN Ukrainy, 2000. T.1. – s.167–172.

16. Berdikov V. F. Mikromekhanicheskie kharakteristiki goryachepressovanogo nitrida titana iz ultradispersnykh poroshkov / V. F. Berdikov, Yu. N. Vilk, O. N. Pushkarev, E. A. Lavrenova // Problemy prochnosti. – 1993. – №3 – s. 90–93.

17. Glazunov S. G. Titanovye splavy. Konstruktsionnye titanovye splavy / S. G. Glazunov, V. N. Moiseev. – M. : Metallurgiya? 1974. – 368 s.

18. Troschenko V. T. Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu. Spravochnoe posobie. T. 2 / V. T. Troschenko, i dr. – Kiev : Naukova dumka, 1994. – 701 s.

19. Kuzmenko V. A. Ustalostnyye ispytaniya na vysokikh chastotakh nagruzheniya / V. A. Kuzmenko, i dr. – Kiev : Naukova dumka, 1979. – 336 s.

20. Solomin N. V. Vysokotemperaturnaya ustoychivost materialov i elementov konstruktsiy / N. V. Solomin. – M. Mashinostroenie, 1980. – 128 s.

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗМІЦНЮЮЧИМИ ПОКРИТТЯМИ

Анотація. Розроблено розрахунковий метод прогнозування втомної міцності матеріалів з покриттями. Розрахункове співвідношення, що пропонується, враховує товщину покриття, його структурну неоднорідність та наявність залишкових напружень. Порівняння розрахункових та дослідних даних має розходження в (0,5-2)%.

Ключові слова: вакуум-плазмові покриття, розрахункова модель, межа витривалості, товщина покриття, структурна неоднорідність, залишкові напруження.

METHOD OF PROGNOSTICATION OF TIRELESS DURABILITY OF MATERIALS WITH CONSOLIDATING COVERAGE'S

Annotation. The calculation method of prognostication of tireless durability of materials is worked out with coverage's. The got calculation correlation takes into account the thickness of coverage, his structural heterogeneity and presence of remaining tensions. Comparison of the calculation and experienced data gives divergence in (0.5...2) %.

Key words: vacuum-plasma coverage's, calculation model, limit of endurance, thickness of coverage, structural heterogeneity, remaining tensions.