

УДК 539.3

А.Г. Трапезон, д-р техн. наук, ст. науч. сотр, М.О. Лысенков, асп.
Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина
Тел./факс: (+380 93) 703-75-08, Email: xxlmax2007@yandex.ru

О ВЛИЯНИИ ВАКУУМ-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ТИТАНА ПРИ ОДНО - И ДВУХОСНОМ ИЗГИБЕ С СООТНОШЕНИЕМ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ $\sigma_2/\sigma_1=0,941$

Исследовано влияние вакуум-плазменного покрытия TiN на выносливость титана VT1-0 в условиях одно- и двухосного нагружения при $\sigma_2/\sigma_1 = 0; 0,941$. Усталостные испытания на высокой частоте нагружения 10кГц проведены на балочных и пластинчатых образцах. Установлено упрочняющее действие покрытия, повышающее выносливость на 15,5 % при одноосном нагружении и – на 20,8 % при двухосном. Сравнение экспериментальных результатов по различным критериям прочности подтвердило их удовлетворительное соответствие критерию, ранее разработанному одним из авторов статьи.

Ключевые слова: вакуум-плазменное покрытие, двухосное нагружение, предел выносливости, высокочастотные испытания, критерии прочности.

Введение

Ответственные элементы современных машин, приборов, установок, летательных аппаратов и других конструкций в условиях эксплуатации подвержены вибрационным нагрузкам различной направленности и интенсивности в широком диапазоне частот до 10 кГц и выше. Воздействие таких нагрузок часто проявляется в виде поперечных колебаний элементов пластинчатого и оболочечного типа (детали обшивки корпуса, несущих панелей, диски ГТД и т.п.), при которых материал будет находиться в условиях плоского напряженного состояния как частного случая сложного напряженного состояния (СНС). Интенсивные и продолжительные колебания приводят, как известно, к усталостным разрушениям.

Для оценки и прогнозирования долговечности упомянутых и им подобных элементов необходимо установить наиболее характерный для каждого из них вид напряженного состояния при эксплуатации, определяемый значениями отношения главных напряжений σ_2/σ_1 , выбрав способ его реализации (методику) при испытаниях на выносливость и на основе сопоставления полученных экспериментальных данных с надлежащими критериями предельного состояния установить в случае их соответствия значения допускаемых эксплуатационных параметров (напряжений для материала, величин нагрузок, времени их воздействия и т.п.)

Отмеченная проблема имеет обширную литературу в основном для статического нагружения, обобщающие результаты по которой отображены, например, в источнике [1]. Что касается циклического нагружения, то для этого случая экспериментальные результаты более ограничены ввиду трудоемкости традиционных экспериментов при СНС, связанных также с большими материальными и временными затратами. Следует отметить в связи с этим известные ранние результаты Гафа и Полларда, Заверта, Петерсона, Майера, Мак-Грегора, Морикавы и Гриффиса, Серенсена [2,3], полученные при низкочастотном нагружении. Для реализации случая

© Трапезон А.Г., Лысенков М.О.; 2012

$\sigma_2/\sigma_1 < 0$ использовались, как правило, сплошные цилиндрические образцы при изгибе и кручении (Гаф и Поллард, Серенсен, Заверт), для случая $\sigma_2/\sigma_1 > 1$ применялись тонкостенные трубчатые образцы, нагружаемые внутренним пульсирующим давлением и осевой нагрузкой (Майер) или только пульсирующим давлением (Морикава и Гриффис). Развитие исследований о влиянии вида напряженного состояния на прочностные характеристики материалов в настоящее время идет по двум взаимосвязанным направлениям – экспериментальном и теоретическом. Эксперименты в зависимости от конкретных целей и задач исследований проводятся различными традиционными методами – упомянутым комбинированным нагружением сплошных или полых цилиндрических образцов, использованием крестообразных образцов, образцов с концентраторами напряжений в виде гиперболических надрезов [4,5]. Теоретические исследования направлены на установление и изучение напряженно-деформированного состояния ответственных конструктивных элементов (трубопроводов, оболочек различной конфигурации), на критический анализ известных или разработку новых критериев прочности при СНС [6,7,8].

Цель и постановка задач работы

Необходимо исследовать выносливость тонколистового технического титана BT1-0 без покрытия и с тонкопленочным вакуум-плазменным покрытием TiN при изгибе в условиях одноосного и двухосного (плоского) напряженного состояния при $\sigma_2/\sigma_1=0; 0,941$ и высокой частоте нагружения 10кГц. Напряженное состояние с циклическими главными синфазными напряжениями одного знака характерно для поперечных колебаний пластинчатых и оболочечных конструкций. Отношение $\sigma_2/\sigma_1=0,94$, близкое к единице, может иметь место при пульсирующих колебаниях оболочечных элементов шаровидной формы. Кроме непосредственного прикладного значения результаты испытаний могут быть использованы для обобщающих выводов по проблеме влияния СНС на предельное состояние конструкционных материалов, а также для пополнения банка экспериментальных данных о влиянии СНС данного вида на выносливость. Высокая частота испытаний, кроме того, что приближена к реальным условиям эксплуатации отдельных современных конструкций (упомянутые элементы летательных аппаратов, дисков быстроходных турбин, днища ультразвуковых ванн, газоструйные излучатели, детали ультразвукового технологического оборудования и т.д.), позволяет в реальные сроки проводить усталостные испытания, существенно сократив временные затраты на весь комплекс исследования. Наличие вакуум-плазменных покрытий, как было показано ранее [9], повышает предел выносливости при одноосном изгибе, поэтому представляется важным и необходимым проверить влияние такого покрытия также при СНС.

Основное содержание и результаты работы

Ниже дано описание и обоснование методики усталостных испытаний, результатов экспериментальных исследований, обсуждение и критический анализ общих результатов, изложены некоторые рекомендации по их практической реализации, вытекающие из проведенного исследования.

Усталостные испытания проводились на балочных и пластинчатых образцах, подвергнутых интенсивным высокочастотным изгибным колебаниям в резонансном режиме. Использовалась магнитострикционная усталостная установка с рабочей частотой около 10кГц. [10]. Высокая частота, как отмечено, является предпосылкой

ускорения и удешевления исследований, что особенно целесообразно при сравнительных испытаниях, поскольку в этом случае возможное влияние частотного фактора не будет сказываться на результатах сравнения выносливости при одно- и двухосном нагружении. Нанесение покрытия на образцы выполнялось методом PVD (физическое осаждение из парогазовой фазы). Использовалась установка ННВ-6,6-И1 типа «Булат». Технологические особенности и подробности нанесения покрытий изложены ранее [9].

Образцы для испытаний при одноосном напряженном состоянии изготовлены как балки постоянного поперечного сечения (рис. 1,а), а для испытаний при плоском напряженном состоянии - в виде круглых пластинок постоянной толщины (рис. 1, б). Образцы вырезались из одного листа технического титана ВТ1-0. Способ закрепления на рабочей части установки балочных и пластинчатых образцов однотипный, реализующий схему точечно-шарнирной заделки при помощи винта малого диаметра (2...3 мм).

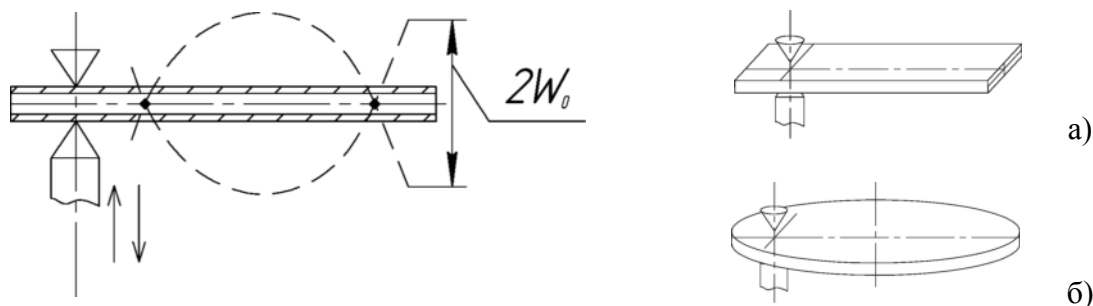


Рис. 1. схема испытаний балочных (а) и пластинчатых (б) образцов

При таком способе закрепления после возбуждения резонансных колебаний по соответствующим формам усталостное разрушение будет происходить вне заделки в зоне пучности колебаний, где действуют максимальные циклические напряжения σ_{\max} в балке или же – одно из максимальных главных напряжений $\sigma_{1,2} = \sigma_{\max}$ в пластинке.

Расчет напряжений производится по внешне однотипным формулам

$$\sigma_{\max} = (2W_0) \frac{EH}{l^2} \sigma' \text{ (балка); } \sigma_{\max} = (2W_0) \frac{EH}{R^2} \sigma'_{1,2} \text{ (пластинка),} \quad (1)$$

где $2W_0$ - размах колебаний (двойная амплитуда свободного края образца), измеряемый и поддерживаемый в процессе испытаний; E - модуль Юнга материала основы; H - толщина основы; l и R длина консольной части балки и радиус пластинки соответственно; σ' и $\sigma'_{1,2}$ - коэффициенты, зависящие от форм колебаний и координат места действия разрушающих σ_{\max} , определяемые по методикам [11] и [12,13] для балки и пластинки соответственно. Наличие тонкопленочных покрытий, к которым относится вакуум-плазменное покрытие толщиной $h=(1..10)$ мкм, не требует уточнения формул (1) и связанных с их выводом расчетных соотношений, поскольку при $h \ll H$ допустимо, как было показано [14], их прямое использование.

Математическая модель резонансной колебательной системы в составе балочного образца строится на основе задачи о поперечных колебаниях балки, закрепляемой тем или иным образом. При любом способе закрепления, не исключая

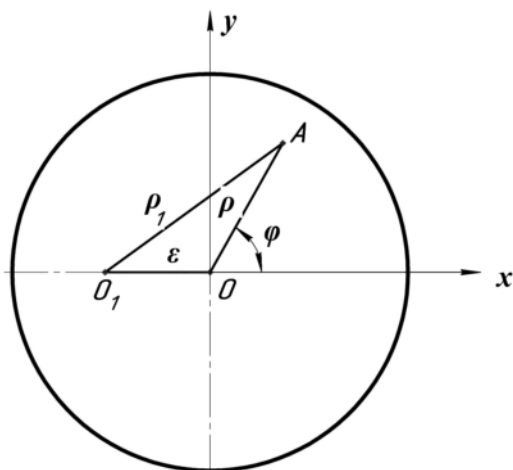


Рис. 2. Схема образца-пластинки

точечно-шарнирной заделки, при обеспечении форм колебаний с узловыми сечениями, параллельными торцу балки, её прогибы определяются при помощи балочных функций [15], удовлетворяющих заранее граничным условиям на одном из концов, например, на свободном. Далее, исходя из результатов экспериментальных измерений положения узлов, как это рекомендуется в работе [11], определяются частоты и иные параметры, необходимые для расчета σ_{max} согласно (1).

Для колебательной системы с пластинкой (рис.2) расчет прогибов и напряжений основан на задаче о колебаниях круглой пластинки с точечной опорой,

расположенной эксцентрично [16]. Прогиб в произвольной точке $A(\rho, \varphi)$ пластинки находится из выражения

$$W(\rho, \varphi) = C_0 \left\{ \begin{aligned} &A_0 J_0(\kappa\rho) + B_0 I_0(\kappa\rho) - Y_0(\kappa\rho_1) - \frac{2}{\pi} K_0(\kappa\rho_1) \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} [A_n J_n(\kappa\rho) + B_n I_n(\kappa\rho)] (-1)^n \cos n\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\kappa^2 = 2\pi f R^2 \sqrt{\frac{\gamma H}{gD}}; \quad (3)$$

Здесь $C_0 = -XR^2 / 8DK^2$; $D = EH^3 / 12(1-\nu^2)$; X – амплитуда реакции в опоре, R, H – радиус и толщина; E, ν, γ – модуль Юнга, коэффициент Пуассона и удельный вес материала; g – ускорение силы тяжести; $\rho = r / R$ – относительный переменный радиус; r, φ – полярные координаты при полюсе O ; $\varepsilon = e / R$ относительный эксцентриситет точки закрепления O_1 ; e – эксцентриситет; $\rho_1 = \sqrt{\rho^2 + \varepsilon^2 + 2\rho\varepsilon \cos \varphi}$; f – частота; J_n, Y_n, I_n, K_n – функции Бесселя целого порядка $n=0,1,2,\dots$;

A_n, B_n – постоянные при $n=0,1,2,\dots$, определяемые из граничных условий. Изменяя величину ε , т.е. изменяя e или R , можно изменять формы колебаний образца, которыми и определяется напряженное состояние в месте усталостного разрушения. Чтобы исключить влияние заделки и свободной кромки образца на процесс разрушения и гарантировать его в месте, удаленном от опоры и края, необходимо обеспечить возбуждение вполне определенных форм колебаний. Необходимые сведения для выбора требуемых форм колебаний сведения приведены в [13]. Форма колебаний при $\kappa=6,24$ и $\varepsilon=0,822$, которая использована в настоящем исследовании, представлена на рис. 3, где приведены также графики изменения прогибов и напряжений, а также фотография образца с трещиной усталости.

Как следует из рис.3, при данной форме колебаний максимальные главные напряжения σ_1 действуют в центре образца при $\rho=0, \varphi=0$ и поэтому усталостное разрушение, что также следует из рисунка, происходит в центре. Трещины усталости,

как показывают эксперименты, во всех случаях располагались перпендикулярно направлению действия главного напряжения σ_1 (рис.3).

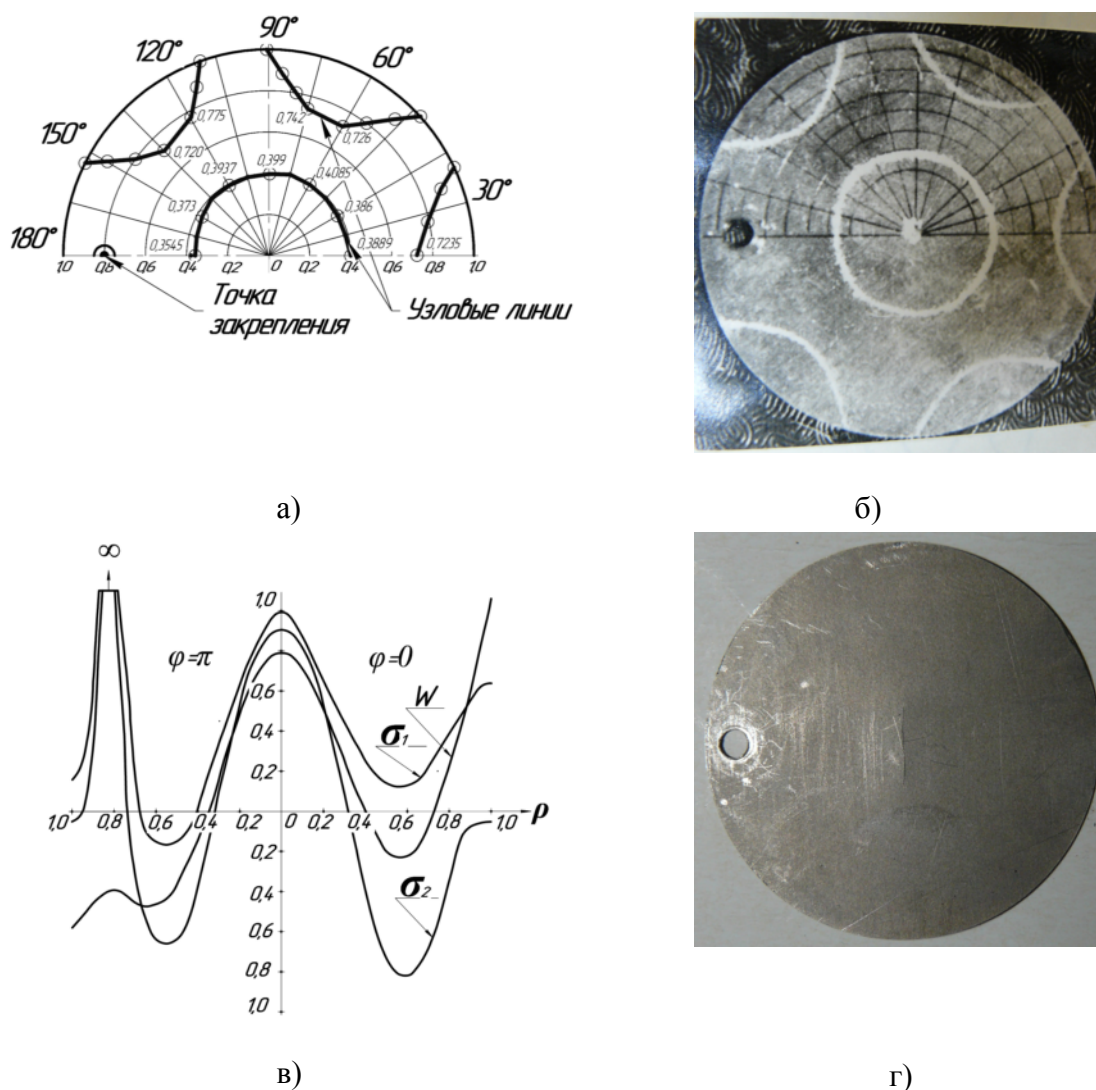


Рис. 3. Расчетная (а) и экспериментальная (б) форма колебаний образца, соответствующие ей графики прогибов W и главных напряжений σ_1, σ_2 , действующих вдоль линии опора-центр ($\varphi = 0, \varphi = \pi$) (в), а также образец с трещиной усталости (г)

Для вычисления напряжений необходимо воспользоваться общими формулами [17], справедливыми для любой точки пластинки, выраженными через функцию прогибов (2), т.е.

$$\sigma_r = \frac{6D}{H^2 R^2} \left[W_{\rho\rho} + \nu \left(\frac{1}{\rho} W_{\rho} + \frac{1}{\rho^2} W_{\varphi\varphi} \right) \right];$$

$$\sigma_t = -\frac{6D}{H^2 R^2} \left[\nu \cdot W_{\rho\rho} + \frac{1}{\rho} W_{\rho} + \frac{1}{\rho^2} W_{\varphi\varphi} \right]; \quad (4)$$

$$\tau_{rt} = \frac{6D(1-\nu)}{H^2 R^2} \left(\frac{1}{\rho} W_{\rho} + \frac{1}{\rho^2} W_{\varphi} \right),$$

где σ_r , σ_t - радиальные и тангенциальные нормальные напряжения; τ_{rt} - касательные напряжения; W_{ρ} , $W_{\rho\rho}$, W_{φ} , $W_{\varphi\varphi}$ - частные производные соответственно по ρ и φ .

Главные напряжения σ_1 и σ_2 определяются известным образом

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\sigma_r + \sigma_t \pm \sqrt{(\sigma_r - \sigma_t)^2 + 4\tau_{rt}^2} \right).$$

Ввиду того, что здесь для нас представляют интерес формулы для расчета напряжений в центре ($\rho=0$, $\varphi=0$), то при $\varphi=0$ согласно (2) и (4) получим $\tau_{rt} = 0$ и поэтому в этом случае главными разрушающими напряжениями будут являться величины $\sigma_r = \sigma_1$, $\sigma_t = \sigma_2$. Исходя из этого и с учетом (3) рабочие формулы для вычисления напряжений в центре пластинки, как места усталостного разрушения образца, запишутся в виде (1), т.е.

$$\sigma_{1,2} = (2W_0) \frac{EH}{R^2} \sigma'_{1,2},$$

где $\sigma'_{1,2} = \sigma_{r,t}^* / 4(1-\nu^2) W'_0$; $\sigma_r^* = 20,784891$; $\sigma_t^* = 19,552514$; $W'_0 = 1,07527$.

Приведенные здесь коэффициенты σ_r^* и σ_t^* вычислены при $\kappa = 6,24$, $\varepsilon = 0,822$ по соотношениям (4) при $12DC_0/H^2R^2 = 1$, развернутый вид которых содержится в работе [13]. Коэффициенты W'_0 - это множитель при $2C_0$ в выражении (2), вычисленный при $\rho = 1$; $\varphi = 0$; $\kappa = 6,24$; $\varepsilon = 0,822$, исходя из равенства $W_0 = 2C_0[W'_0]$, где W_0 - амплитуда колебаний на свободном крае при $\varphi = 0$ (по линии опора-центр), измеряемая в процессе испытаний. В данном случае, как видно, $\sigma_2/\sigma_1 = 0,94071 \approx 0,941$

Результаты экспериментальных исследований

Испытуемые образцы вырезались из одного листа технического титана ВТ1-0 толщиной 0,5 мм в состоянии поставки. Балочные образцы имели ширину 6мм, длину 25 мм с учетом припуска, зависящего от параметров реальной колебательной системы рабочей установки. Пластинчатые образцы имели диаметр (42 ÷ 43)мм с учетом припуска. Покрyтия наносились по технологии [9], толщина покрyтия TiN составляла 6 ÷ 7 мкм в соответствии с рекомендованной, исходя из условий оптимизации предела выносливости [9]. Рабочая частота испытаний - (11,1 ÷ 11,2) кГц. Пределы выносливости σ_{-1} устанавливались из кривых усталости, построенных по значениям разрушающих напряжений σ_{\max} с фиксацией числа циклов до разрушения N при помощи электронного счетного прибора. Соответствующие напряжения вычислялись для каждого из испытуемых образцов по формулам (1) в зависимости от значений амплитуды W_0 , измеряемой при помощи устройства, снабженного микроскопом.

На рис.4 приведены кривые усталости, построенные по результатам испытания образцов без покрyтия на базе испытаний $N = 10^7$ циклов нагружения. При этом для

случая $\sigma_2/\sigma_1=0,941$ представлена только кривая изменения разрушающего главного напряжения σ_1 .

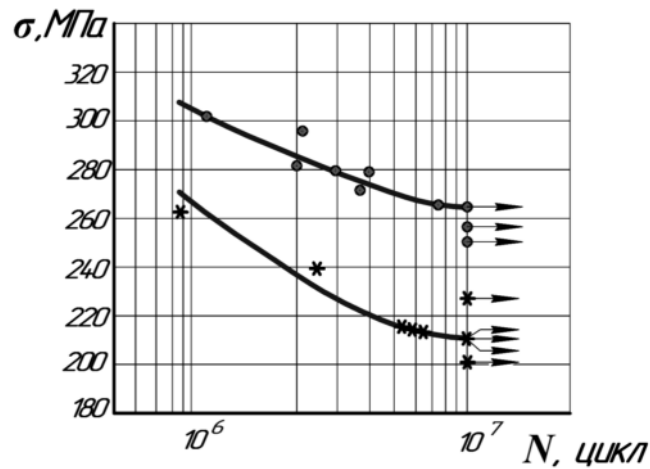


Рис. 4. Кривые усталости титана без покрытия: 1 - • - $\sigma_2/\sigma_1=0$; 2 - * - $\sigma_2/\sigma_1=0,941$

Аналогичным образом получены кривые усталости для образцов с покрытиями. При вычислении разрушающих напряжений в данном случае использовались без изменений расчетные соотношения, полученные выше для образцов без покрытия, что как было отмечено, допустимо в случае толщины покрытия намного меньшей толщины основы. На рис.5 приведены соответствующие кривые, построенные на базе $N=10^7$ циклов нагружения.

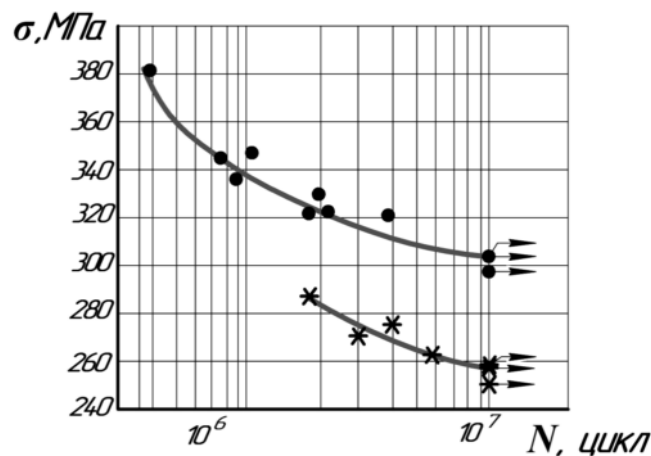


Рис. 5. Кривые усталости титана с покрытием: 1 - • - $\sigma_2/\sigma_1=0$; 2 - * - $\sigma_2/\sigma_1=0,941$

Достоверность результатов обеспечивалась: совпадением расчетных и реальных форм колебаний, сравниваемых посредством нанесения на контрольную пластинку полярной координатной сетки; тензометрированием контрольного образца

увеличенного диаметра (при частоте 500Гц) – расхождение с теорией $\sim 2,5\%$; точностью измерения амплитуды W_0 не менее 1% ; точностью измерения частоты до 1 Гц и выше; обработкой данных по единому способу – методом наименьших квадратов. В общем погрешность определения напряжений по формулам (1) на основе индивидуальных погрешностей имеет значение порядка $(2,15\dots 2,6)\%$, что не выходит за рамки допустимого для усталостных испытаний значения 3% .

Из кривых усталости определены следующие пределы выносливости. Для титана без покрытия $\sigma_{-1} = 265$ МПа при одноосном нагружении (циклический изгиб балки), для главного напряжения σ_1 (циклический изгиб пластинки) соответственно $\sigma_{-1} = 212,7$ МПа. Для материала с покрытием $(\sigma_{-1})_n = 306$ МПа при одноосном нагружении, для главного напряжения $(\sigma_1)_n$ соответственно $(\sigma_{-1})_n = 256,97$ МПа.

Обсуждение результатов

Как следует из результатов, влияние вакуум-плазменного покрытия TiN данной толщины на циклическую прочность титана VT1-0 в условиях одноосного и двухосного нагружения является однозначным – в обоих случаях наличие покрытия повышает выносливость. Для $\sigma_2/\sigma_1=0$ предел выносливости повышается на $15,5\%$, для $\sigma_2/\sigma_1=0,941$ – на $20,8\%$. Таким образом, результаты исследования позволяют сделать полезный для практики вывод, справедливый по крайней мере для данных материала и покрытия, заключающийся в том, что для первичной оценки влияния покрытий на σ_{-1} при двухосном нагружении достаточно иметь данные о характере такого влияния для случая одноосного нагружения, полученные из сравнительно простых экспериментов, подобных проведенным в настоящем исследовании. Вследствие этого, если достаточно только качественной оценки, отпадает необходимость в обязательном проведении сложных в методическом отношении и затратных исследований при СНС.

Представляет практический интерес сравнение усталостных характеристик при $\sigma_2/\sigma_1=0$ и $\sigma_2/\sigma_1=0,941$ на базе некоторых из наиболее известных и употребительных в исследовательской практике критериев прочности при плоском напряженном состоянии. Используем следующие выражения для эквивалентных напряжений $\sigma_{экр}$, которые согласно нижеследующим критериям должны быть ответственны за усталостное разрушение в точечной зоне, где действуют предельные σ_1 и σ_2 , в такой же мере, как и σ_{-1} при одноосном нагружении. Это означает, что $\sigma_{экр}$ по определению должны мало отличаться от экспериментально установленных σ_{-1} при одноосном нагружении.

По критериям наибольших главных напряжений (Галилей, Ляме, Рэнкин) и наибольших касательных напряжений (Кулон, Сен-Венан, Треска) при плоском напряженном состоянии получим $\sigma_{экр} = \sigma_1$, по критерию наибольших линейных деформаций (Мариотт, Навье, Сен-Венан) должно выполняться равенство $\sigma_{экр} = \sigma_1 - \nu\sigma_2$, по критерию удельной потенциальной энергии формоизменения (Генки, Губер, Мизес) соответственно $\sigma_{экр} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)^{1/2}$, по критерию Писаренко-Лебедева [18] $\sigma_{экр} = \chi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2) + (1 - \chi)\sigma_1$, (χ -параметр материала), а по критерию [19] $\sigma_{экр} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)/(\sigma_1 - \nu\sigma_2)$. Вычисления при

$\nu=1/3$ и $\chi=1$ после подстановки в перечисленные соотношения предельных σ_1 и σ_2 , полученных из эксперимента, в порядке следования критериев дают следующие результаты: $\sigma_{экр} = (212,7; 146; 206,71; 206,71; 292,66)$ МПа – без покрытия; $\sigma_{экр} = (256,97; 176,36; 249,62; 249,62; 353,31)$ МПа – с покрытием.

Из полученных данных, кроме тех, что рассчитаны по соотношению [19], видно, что $\sigma_{экр}$ существенно ниже (на 20-40%) значений σ_{-1} как для материалов без покрытия, так и с покрытием. По критерию [19], напротив, $\sigma_{экр}$ выше σ_{-1} на (10...15% соответственно без покрытия и с покрытием).

При оценке этих результатов необходимо учесть ряд обстоятельств, вытекающих из методических особенностей определения σ_{-1} и предельных значений σ_1 и σ_2 . Теоретические предпосылки вычисления напряжений в балочных и пластинчатых образцах основаны соответственно на теории балок и теории тонких пластин, различия между которыми в варианте перехода от пластины к балке могут привести к известному несоответствию между истинными напряжениями в балке и теми, что дает теория балок [17, 20]. Так, например, выше согласно теории балок вычислены значения σ_{-1} для образцов толщиной $h = 0,5$ мм, шириной $b = 6$ мм и длиной ~ 20 мм. С другой стороны, образцы таких размеров можно отнести и к пластинкам как объекту расчета. В этом случае полученные значения σ_{-1} формально, но в точном соответствии с теорией пластин, необходимо умножить на величину $1/(1-\nu^2)$, что дает при $\nu=1/3$ повышение отмеченных σ_{-1} на 10% и, следовательно, к удовлетворительному совпадению с $\sigma_{экр}$, рассчитанным по критерию [19] как для образцов без покрытия, так и с покрытием. На практике переход подобным образом от пластинки к балке не применяется, поскольку как показывают уточненные расчеты для некоторых случаев краевых условий, отличных от условий для консольной пластинки, существуют разные оценки границ такого перехода, зависящие от отношения b/h и длины.

Подробный анализ работ по установлению границ применимости теории балок и пластин для практических расчетов выходит за пределы данной статьи. Оценка поправки для закрепленной с двух сторон шарнирной пластинки с размерами, соответствующим упомянутым размерам образцов, дает при изгибе вместо 10% меньшие значения поправки - около 5%. Некоторые специально поставленные исследования подтверждают необходимость учета поправки на «пластинчатость» также и при колебаниях балок [21]. Эксперименты по определению σ_{-1} на пластинчатых балках при их циклическом изгибе на I-ой и II-ой формах колебаний при фиксированной частоте, а следовательно, при разных длинах образцов во всех случаях давали значения σ_{-1} для коротких образцов (I-ая форма) меньше значений σ_{-1} , полученных для длинных образцов (II-ая форма) на (5÷6)% [22], что подтверждает необходимость введения поправки типа приведенной выше при вычислении напряжений в случае I-ой формы колебаний, т.е. в случае укороченных образцов. На различие в значениях предельных напряжений, получаемых на балочных образцах и на образцах в виде круглых пластинок, используемых в настоящем исследовании, может также влиять несопоставимость внешних условий и исходного состояния материала в зоне усталостного разрушения. Так, в балке при её циклическом изгибе разрушение начинается от угловой зоны внешней кромки, острота и способ обработки которой

является неопределенным и трудноуправляемым фактором, способствующим как повышению, так и понижению σ_{-1} вследствие, например, возможной концентрации местных напряжений и изменения состояния материала при вырезке, сопровождающемся возникновением $\sigma_{ост}$ неопределенного знака [2]. В пластинчатом образце усталостное разрушение гарантированно начинается в точечной зоне без «вредного» влияния кромки. В общем случае при определении выносливости при одноосном нагружении отмеченные для балочных образцов методические и технологические особенности, влекущие появление погрешностей, не могут иметь практического значения, поскольку получаемые значения σ_{-1} в большинстве случаев являются, как правило, предметом сравнения в зависимости от действия некоторых подлежащих изучению факторов (например, покрытий) и поэтому достаточно, чтобы σ_{-1} были получены в идентичных условиях, обеспечивающих влияние именно этих факторов и исключающих влияние других. В нашем случае сопоставления σ_{-1} , полученных на балочных образцах и $\sigma_{экр}$, полученных на пластинках, такая идентичность частично нарушается и поэтому для корректного сравнения результатов при одно- и двухосном нагружении необходимо уточнение методических подходов при определении σ_{-1} . Вышеприведенный принципиальный способ уточнения σ_{-1} на основе теории пластин дает основание для уже отмеченного заключения о наиболее полном соответствии экспериментальных результатов критерию [19] и непригодности прочих из выбранных известных критериев для прогнозирования выносливости при данном виде напряженного состояния $\sigma_2/\sigma_1=0,941$. Очевидно также, что для подтверждения данного заключения необходимо проведения исследований при иных значениях $\sigma_2/\sigma_1 > 0$, аналогичных проведенному в настоящем работе исследованию при $\sigma_2/\sigma_1=0,941$.

Заключение

В результате выполненных исследований реализовано следующие:

1. Описана методика исследования высокочастотной усталости материалов с тонкопленочными покрытиями в условиях линейного и плоского напряженного состояния при отношении главных напряжений $\sigma_2/\sigma_1 = 0,941$.
2. Проведены усталостные испытания и построены кривые усталости технического титана ВТ1-0 с покрытием TiN толщиной $\sim(6 \div 7)$ мкм и без покрытия в отмеченных условиях при частоте нагружения 10 кГц.
3. Установлено, что покрытие TiN повышает сопротивление усталости на 15,5% при одноосном нагружении ($\sigma_2/\sigma_1=0$) и – на 20,8% при двухосном ($\sigma_2/\sigma_1=0,941$).
4. Сделано на основе п.3 полезное для практики заключение, требующее дополнительной проверки, что характер влияния покрытий на выносливость не должен существенно зависеть от вида напряженного состояния. Исходя из этого, в случае необходимости изучения влияния иных покрытий на выносливость при сложном нагружении будет достаточно, видимо, ограничиться простыми экспериментами при одноосном нагружении.
5. Проведено сравнение пределов выносливости при одно- и двухосном напряженном состоянии по различным критериям прочности. Установлено удовлетворительное соответствие экспериментальных результатов критерию, ранее разработанному одним из авторов статьи.

6. Отмечена необходимость продолжения исследований при значениях σ_2/σ_1 , отличных от приведенных в работе, что позволит более обоснованно судить о влиянии вида напряженного состояния на выносливость с разработкой рекомендаций по выбору критерия ее количественной оценки.

Список литературы:

1. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. Справочник / [Лебедев А.А., Ковальчук Б.Н., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П.]. – Киев: Издательский дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
2. Ужик Г.В. Методы испытаний металлов и деталей на выносливость / Ужик Г.В. – М. - Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – 263 с.
3. Форрест П. Усталость металлов / под ред. С.В. Серенсена; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
4. Жернаков В.С. Влияние напряженно-деформированного состояния деталей из объемных наноматериалов на усталостную прочность / Жернаков В.С., Семенова И.П., Ермоленко А.Н. // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12., №2(31). – С. 62-68.
5. Гумеров К.М. Программа испытаний соединений труб с внутренним покрытием применительно к промышленным трубопроводам / Гумеров К.М., Родомакин А.Н. // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – Уфа: ИПТЭР, 2008. – С. 124-125.
6. Божанов П.В. Определение напряженно-деформированного состояния тонкой полой оболочки с учетом пластической дилатансии / Божанов П.В., Забелин А.Н., Трещев А.А. // Вестник ЧПУ им. И.Я. Яковлева – Механика предельного состояния. – 2008. - №2. – С. 30-34.
7. Рудаченко А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Учебное пособие / Рудаченко А.В., Саруев А.Л. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.
8. Дудяк А.И. Критерии прочности для оценки напряженного состояния матриц аппаратов высокого давления / Дудяк А.И., Хвасько В.М. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. - №1(18). – С. 48-53.
9. Трапезон А.Г. Влияние технологии нанесения вакуум-плазменных покрытий на сопротивление усталости титана / Трапезон А.Г., Рутковский А.В., Лысенков М.О. // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2012. - вып. 36. – С. 70-76
10. Волощенко А.Г. Установки для исследования механических свойств материалов и элементов конструкций. Каталог-справочник / Волощенко А.Г., Алексюк М.М. – Киев: Наук. думка, 1982. – 276 с.
11. Трапезон А.Г. К методике испытаний на усталость тонколистовых материалов при плоском изгибе на высоких частотах нагружения / А.Г. Трапезон // Пробл. прочности. – 1977. - №3. – С. 38-41.
12. Трапезон А.Г. О частотах и формах колебаний свободной по контуре круглой пластинки с точечным закреплением / Трапезон А.Г. // Пробл. прочности. – 1976. - №8. – С. 100-105.
13. Писаренко Г.С. К анализу напряженного и деформированного состояния подверженной поперечным колебаниям круглой пластинки с точечной опорой / Писаренко Г.С., Трапезон А.Г. // Пробл. прочности. – 1977. - №8. – С. 3-7.

14. Методика определения усталости материалов с покрытиями при высокочастотном одно- и двухосном изгибе / А.Г. Трапезон, М.О. Лысенков // Сб. трудов VI международного симпозиума по трибофатике. – Минск, 2010. – С. 781-784.
15. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко; пер. с англ. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
16. Писаренко Г.С. О собственных колебаниях свободной по контуру круговой пластины постоянной толщины с точечной опорой / Г.С. Писаренко, А.Г. Трапезон // Избранные проблемы прикладной механики. – М.: Наука, 1974. – С.567-574.
17. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.; пер. с англ. – М.: Физматгиз, 1963. – 636 с.
18. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии / Писаренко Г.С., Лебедев А.А. – Киев: Наук. думка, 1969. – 211 с.
19. Трапезон А.Г. Критерий прочности при высокочастотном двухосном циклическом изгибе / А.Г. Трапезон // Тр. Междунар. конф. «Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций». – Киев: Ин-т проблем прочности НАН Украины, 2000. – Т.1. – С. 167-172.
20. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
21. Ли В. К вопросу о пределе применимости теории колебаний тонкостенных стержней / В. Ли // Пробл. прочности. – 1974. - №6. – С. 58-60.
22. Самгин В.А. Исследование влияния температуры и асимметрии цикла на выносливость тонколистовых конструкционных материалов: автореф. дис. канд. техн. наук / В.А. Самгин. – К., 1972. – 23 с.

Надійшла до редакції 10.01.2013.

О.Г. Трапезон, М.О. Лысенков
ПРО ВПЛИВ ВАКУУМ-ПЛАЗМОВОГО
ПОКРИТТЯ НА ВИТРИВАЛІСТЬ ПРИ ОДНО-
ТА ДВОВІСЬОВОМУ ЗГІНІ З
ВІДНОШЕННЯМ ГОЛОВНИХ НАПРУЖЕНЬ

$$\sigma_2/\sigma_1=0,941$$

Досліджено вплив покриття TiN на витривалість технічного титану при відношенні головних напружень $\sigma_2/\sigma_1=0,941$. Встановлено зміцнюючу дію покриття з підвищенням витривалості на 15,5% та 20,8% відповідно при $\sigma_2/\sigma_1=0,941$. Порівняння експериментальних даних по різних критеріях міцності підтвердило їх найбільшу відповідність критерію, що був раніше розроблений одним із авторів статті.

Ключові слова: покриття, двовісьове навантаження, межа витривалості, високочастотні випробування, критерії міцності.

A.G. Trapezon, M. O. Lysenkov
ABOUT THE INFLUENCE OF VACUUM-
PLASMA COVERING ON ENDURANCE AT
UNIAXIAL AND BIAXIAL BEND WITH THE
RELATION OF MAIN TENSIONS

$$\sigma_2/\sigma_1=0,941$$

The influence of TiN covering on endurance of technical titan at the relation of main stress-at-breaks $\sigma_2/\sigma_1=0,941$ was investigated.

Comparison of experimental data by different criteria of durability confirmed their highest correspondence to criterion that was developed earlier by one of the article authors.

Key words: covering, biaxial loading, limit of endurance, high-frequency tests, strength criteria.