

К методике ускоренной оценки усталости металлов с упрочняющими покрытиями

А. Г. Трапезон

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

В рамках предложенной схемы ускоренной оценки прочности при циклическом нагружении композиций основа–покрытие показана необходимость комплексной ее реализации – экспериментальным и расчетным способами. Обосновано применение для этой цели высокочастотного метода на примере предлагаемой экспериментальной методики. На основе полученных соотношений для расчета остаточных напряжений разработана модель для прогноза сопротивления усталости композиции. Показана ее применимость для первичной оценки выносливости систем основа–покрытие и при отработке технологии создания упрочняющих покрытий.

Ключевые слова: усталость, циклические напряжения, тонкопленочные покрытия, остаточные напряжения, толщина покрытия, расчетная модель.

Введение. Для повышения несущей способности конструктивных элементов все чаще используются методы их упрочнения с помощью покрытий. Опыт показывает, что одним из важных критериев качества упрочняющих покрытий является сопротивление усталости композиции основа–покрытие. Поэтому необходимость ускоренной оценки этой характеристики представляется первоочередной и определяющей, особенно на стадии отработки технологии формирования и нанесения покрытий. Особенностью композиций основа–покрытие является наличие в покрытии и поверхностных слоях основного материала технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, которые могут играть важную роль в упрочнении (или разупрочнении) несущих конструктивных элементов. Учет $\sigma_{ост}$ в случае оценки прочности при циклическом нагружении, как и прочности вообще, необходим, следовательно, в качестве одной из предпосылок обеспечения требуемого уровня служебных свойств элементов с покрытиями. Толщина покрытия влияет как на $\sigma_{ост}$, так и на прочностные характеристики, обусловленные его структурно-механическими параметрами. С последними непосредственно связаны особенности технологии: продолжительность процесса; температура; химический состав и др. Очевидно, что при создании системы основа–покрытие с целью ее оптимизации с учетом всех проблемных факторов наиболее надежным и достоверным методом проверки полученного результата является экспериментальный. В частности, при определении сопротивления усталости материалов с тонкопленочными покрытиями на образцах, подвергаемых изгибным колебаниям, в случае выполнения ряда исходных условий [1] учет $\sigma_{ост}$, особенностей технологического процесса, поверхностных и структурных эффектов происходит автоматически, интегрально отображаясь в виде различных значений пределов выносливости σ_{-1} . Экспериментальное определение σ_{-1} требует значительных затрат времени и средств. Поэтому наряду с проблемой

ускорения этого процесса альтернативной задачей является построение соответствующих расчетных моделей.

Очевидно, что расчетные модели не позволяют в полной мере учитывать многообразие факторов, влияющих на значение σ_{-1} . Если, например, учет остаточных напряжений возможен, поскольку возможно построение аналитических выражений для их расчета, то учет весьма неопределенных технологических параметров и связанных с ними структурных особенностей покрытий может быть осуществлен введением в соответствующую модель неких корректирующих коэффициентов, установленных предварительно из эксперимента. Отмеченное несовершенство расчетных моделей, являющееся неизбежным, компенсируется тем не менее возможностью целенаправленного выбора соответствующих практических мероприятий, вытекающих из результатов расчета, посредством которых могут быть оптимизированы свойства создаваемых композиций.

Цель работы заключается в построении схемы ускоренной расчетно-экспериментальной оценки влияния покрытий на прочность при циклическом нагружении с перспективой обеспечения повышенного ресурса создаваемой композиции. В основе комплексного решения задачи лежат простейшая экспериментальная методика определения σ_{-1} , метод расчета $\sigma_{ост}$ и расчетная модель для предельных напряжений цикла, учитывающая толщину покрытия и $\sigma_{ост}$.

Экспериментальная методика. Для экспериментальной экспресс-оценки свойств покрытий при циклическом нагружении необходимо, исходя из возможностей испытательного оборудования, выполнение по крайней мере двух вполне очевидных условий. Первое – обеспечение минимально возможного отрезка времени, за который испытуемый образец разрушится по достижении требуемой базы усталостных испытаний. Это условие легко реализуется на высокочастотном усталостном оборудовании, созданном, например, на основе магнитострикционных вибраторов с рабочей частотой 3...20 кГц. Второе условие – образцы должны быть максимально технологичными, не требующими при их изготовлении и подготовке больших затрат. Практика показывает, что в этом отношении наиболее целесообразно использование методики на основе консольных призматических образцов постоянного поперечного сечения, подвергаемых резонансным изгибным колебаниям по одной из высших форм. Такая методика разработана в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины [2] и широко применяется в течение многих лет при частотах около 10 кГц. Преимущества высокочастотных методик перед традиционными низкочастотными очевидны, особенно при сравнительных испытаниях различных объектов с целью получения информации в минимальные сроки. Так, при рабочей частоте 10 кГц база испытаний в 10^6 цикл нарабатывается всего за 1,7 мин, база в 10^7 цикл – за 17 мин, в то время как при испытаниях, предположим, при 50 Гц для наработки этого же числа циклов требуется время непрерывной работы оборудования в течение соответственно 2,3 и 23 календарных суток. Наглядной иллюстрацией актуальности проблемы и примером нерационального ее решения может, например, служить работа [3], в которой сравнительные усталостные испытания при изгибе проводились при частоте 80 Гц на дорогостоящих цилиндрических образцах

переменного сечения с покрытиями. Безусловно, применение высокочастотного нагружения, в частности, по методике [2] могло бы привести к тем же или сопоставимым результатам, однако с существенно меньшими временными, технологическими и энергетическими затратами.

При использовании вырезаемых обычно из одного листа призматических образцов по рекомендуемой методике во избежание неконтролируемого усталостного разрушения в месте их закрепления применяется точечно-шарнирная схема заделки (рис. 1). При таком способе закрепления усталостное разрушение происходит вне заделки в зоне пучности колебаний, а именно: в сечении, где действуют максимальные циклические напряжения σ_{\max} . Их расчет в зависимости от амплитуды A (рис. 1) при тонкопленочных покрытиях проводится по формуле

$$\sigma_{\max} = kAEH, \quad (1)$$

где k – коэффициент формы колебаний, определяемый по методике [2]; E – модуль Юнга основного материала; H – толщина образца.

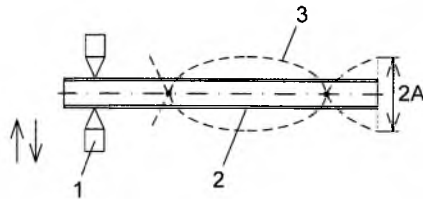


Рис. 1. Схема нагружения образца при испытаниях на усталость: 1 – вибратор; 2 – образец с покрытием; 3 – форма колебаний с двумя узлами.

Предел выносливости σ_{-1} устанавливается из кривой усталости, построенной по значениям разрушающих напряжений σ_{\max} , которые рассчитываются для каждого из испытанных образцов по формуле (1) при заданной амплитуде A , измеряемой микроскопом, и после фиксации числа циклов до разрушения с помощью электронного счетчика.

Определение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$. Рассмотрим вывод формул для $\sigma_{\text{ост}}$, необходимых при разработке расчетного метода оценки σ_{-1} композиции основа–покрытие. Полагаем, что типичный технологический процесс нанесения покрытий (например, вакуум-плазменным напылением) сопровождается изменением температуры – от некоторых исходных повышенных значений до значений температуры окончательного формирования композиции. Поэтому для определения $\sigma_{\text{ост}}$ используем схему анализа температурного деформирования балки, составленной из двух материалов: основы и покрытия. Пусть элемент балки (основы) толщиной H имеет одностороннее покрытие толщиной h и его длина в исходном состоянии, т.е. при рабочей температуре формирования покрытия t , будет l (рис. 2). Относительное укорочение элементов покрытия и основы после понижения температуры до значения t_1 будет соответственно равно $\alpha_{\text{п}}(t - t_1) = \alpha_{\text{п}}\Delta t$; $\alpha_{\text{о}}(t - t_1) = \alpha_{\text{о}}\Delta t$, где $\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{о}}$ – коэффициенты температурного расширения покрытия и основы. Длины элементов вследствие изменения температуры таковы: $l_{\text{п}} = l(1 - \alpha_{\text{п}}\Delta t)$; $l_{\text{о}} = l(1 - \alpha_{\text{о}}\Delta t)$.

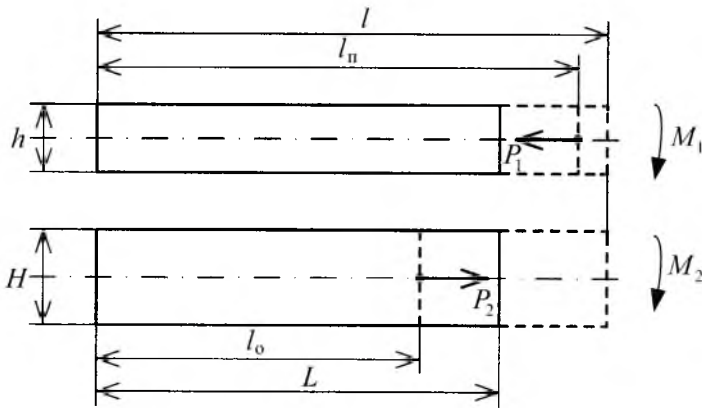


Рис. 2. Схема к расчету остаточных напряжений в балке с односторонним покрытием.

Положим $\alpha_o > \alpha_{\Pi}$, тогда получим $l_{\Pi} > l_o$. В этом случае для достижения элементами композиции некоторой итоговой длины L , соответствующей температуре t_1 , элемент покрытия длиной l_{Π} необходимо сжать некоторой силой P_1 , а элемент основы длиной l_o растянуть силой P_2 . Эти внутренние силы, действующие по линии их раздела, можно привести соответственно к внешним – сжимающему центральному усилию P_1 и моменту $M_1 = \frac{P_1 h}{2}$, приложенным к покрытию, и центральному растягивающему усилию P_2 и моменту $M_2 = \frac{P_2 H}{2}$ для основы. Из условия равновесия получим $P_1 = P_2 = P$, общий изгибающий момент будет равен сумме моментов $M = M_1 + M_2 = \frac{P(H+h)}{2}$. Поскольку, с другой стороны, $M_1 = \frac{E_{\Pi} J_{\Pi}}{r_{\Pi}}$; $M_2 = \frac{E_o J_o}{r_o}$, получим

$$\frac{P(H+h)}{2} = \frac{E_o J_o}{r_o} + \frac{E_{\Pi} J_{\Pi}}{r_{\Pi}}, \quad (2)$$

где $E_o, E_{\Pi}, J_o = \frac{bH^3}{12}, J_{\Pi} = \frac{bh^3}{12}, r_o, r_{\Pi}$ – модули упругости, моменты инерции и радиусы кривизны нейтральных слоев элементов основы и покрытия соответственно; b – ширина элемента балки. По линии раздела относительные изменения длин элементов должны быть одинаковыми. Поэтому, учитывая, что деформации основы и покрытия от усилий P равны $P/E_o F_o, -P/E_{\Pi} F_{\Pi}$, деформации от моментов M_1 и M_2 в месте сопряжения – соответственно $H/2r_o, -h/2r_{\Pi}$, получаем уравнение

$$-\alpha_o \Delta t + \frac{P}{E_o F_o} + \frac{H}{2r_o} = -\alpha_{\Pi} \Delta t - \frac{P}{E_{\Pi} F_{\Pi}} - \frac{h}{2r_{\Pi}}, \quad (3)$$

где $F_o = bH, F_{\Pi} = bh$ – площади поперечных сечений основы и покрытия.

Остаточные напряжения определяются алгебраическим сложением напряжений, вызванных усилием P и моментами M_1, M_2 . В результате для крайних по высоте слоев основы и покрытия получим

$$\sigma_o = \frac{P}{bH} - \beta \frac{E_o H}{2r_o}; \quad \sigma_{\Pi} = -\frac{P}{bH} + \beta \frac{E_{\Pi} h}{2r_{\Pi}}, \quad (4)$$

где $\beta = \pm 1$. При $\beta = 1$ эти формулы справедливы для наружных поверхностей балочного элемента, при $\beta = -1$ – для поверхностей раздела.

Исключая из (4) усилие P , а затем, используя (2) и учитывая, что $2r_o = 2R - H$, $2r_{\Pi} = 2R + h$ (R – радиус кривизны поверхности сопряжения), формулы (4) можно преобразовать в виде зависимостей от R :

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \frac{1}{3(H^2 + Hh)} \left\{ \frac{E_o H^2 [H(1 - 3\beta) - 3\beta h]}{2R - H} + \frac{E_{\Pi} h^3}{2R + h} \right\}; \\ \sigma_{\Pi} &= \frac{1}{3(h^2 + Hh)} \left\{ \frac{E_{\Pi} h^2 [h(3\beta - 1) + 3\beta H]}{2R + h} - \frac{E_o H^3}{2R - H} \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение для определения R получим из (2) и (3) в виде

$$\begin{aligned} 12\Delta(H^2 h + Hh^2)R^2 - 2 \left[H^4 \frac{E_o}{E_{\Pi}} + H^3 h(4 + 3\Delta) + Hh^3(4 - 3\Delta) + h^4 \frac{E_{\Pi}}{E_o} \right] R - \\ - H^4 h \frac{E_o}{E_{\Pi}} - H^3 h^2(1 + 3\Delta) + H^2 h^3(1 - 3\Delta) + Hh^4 \frac{E_{\Pi}}{E_o} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta = \Delta\alpha\Delta t$; $\Delta\alpha = \alpha_o - \alpha_{\Pi}$.

Если толщина покрытия намного меньше толщины основы, то при $h \ll H$ выражения (5) и (6) можно заменить приближенными, отбросив члены высшего порядка малости:

$$\sigma_o = \frac{E_o H}{3(H + h)} \left[\frac{H(1 - 3\beta) - 3\beta h}{2R - H} \right]; \quad \sigma_{\Pi} = -\frac{E_o H^2}{3h(2R - H)}; \quad (7)$$

$$12\Delta R^2 - 2H \left(\frac{HE_c}{hE_{\Pi}} + 4 + 3\Delta \right) R - H^2 \frac{E_o}{E_{\Pi}} = 0. \quad (8)$$

Из (8), пренебрегая малыми величинами второго порядка, получаем

$$R = \frac{H}{12\Delta} \left[\frac{HE_o}{hE_{\Pi}} + 4 + 3\Delta \pm \frac{H}{h} \sqrt{\frac{E_o^2}{E_{\Pi}^2} + 2(4 + 3\Delta) \frac{hE_o}{HE_{\Pi}}} \right].$$

Учитывая, что второе слагаемое под корнем существенно меньше первого, поскольку $\Delta \ll 1$, $h \ll H$, то, ограничившись двумя членами степенного ряда функции вида $\sqrt{a^2 + x} \approx a + \frac{x}{2a}$, запишем

$$\sqrt{\frac{E_o^2}{E_{II}^2} + 2(4 + 3\Delta) \frac{hE_o}{HE_{II}}} \approx \frac{E_o}{E_{II}} + (4 + 3\Delta) \frac{h}{H},$$

откуда следует, что

$$R = \left(\frac{HE_o}{hE_{II}} + 4 + 3\Delta \right) \frac{H}{6\Delta}. \quad (9)$$

После подстановки (9) в (7) формулы для расчета остаточных напряжений на поверхности раздела (при $\beta = -1$) и на наружных поверхностях (при $\beta = 1$) будут иметь следующий вид:

$$\sigma_o(\beta = -1) = \frac{4\Delta hE_o E_{II}}{(H + h)E_o + 4hE_{II}}; \quad \sigma_o(\beta = 1) = -\frac{2\Delta hE_o E_{II}}{(H + h)E_o + 4hE_{II}};$$

$$\sigma_{II}(\beta = \pm 1) = -\frac{\Delta HE_o E_{II}}{HE_o + 4hE_{II}}.$$

Из этих формул видно, что в принятом случае $\alpha_o > \alpha_{II}$ при $h \ll H$ напряжения в покрытии σ_{II} будут сжимающими по всей его толщине ввиду ее малости, а напряжения в основе σ_o на поверхности раздела – растягивающими, на наружной – сжимающими. Отношение абсолютных значений будет $\sigma_o(\beta = -1)/\sigma_o(\beta = 1) = 2$, поэтому устанавливаем также величину радиуса кривизны R_1 нейтрального слоя балки с покрытием, т.е. $R_1 = R - 2H/3$. Отношение абсолютных значений напряжений на поверхности раздела будет $\sigma_o/\sigma_{II} \approx 4h/H$. Формулы (7) для случая $\beta = -1$ (для поверхностей раздела) можно переписать в виде

$$\sigma_o = \frac{2HE_o}{3r_o} \frac{\left(H + \frac{3h}{4} \right)}{(H + h)} \approx \frac{2HE_o}{3r_o}; \quad \sigma_{II} = -\frac{H^2 E_o}{6hr_o}. \quad (10)$$

Первая из этих формул получена ранее [1] методом эквивалентных жесткостей без привлечения изложенной схемы деформирования с учетом влияния температуры, что может свидетельствовать о ее применимости при любых способах модификации поверхности основы. Вторая формула часто рекомендуется [4, 5] для расчета σ_{II} по результатам измерения r_o , точнее – по измерению прогиба искривленного под действием $\sigma_{ост}$ лабораторного образца с односторонним покрытием, который легко пересчитывается в r_o или R_1 . Рассмотренный случай одностороннего покрытия имеет практичес-

кое значение именно для отмеченного экспериментального способа определения $\sigma_{\text{ост}}$. При исследовании усталости по описанной выше экспериментальной методике образцы основного металла могут иметь двухстороннее покрытие (рис. 1). Рассмотрим схему определения $\sigma_{\text{ост}}$ и для этого случая. Сохраняя все предварительные рассуждения для вывода уравнений (2) и (3), учитываем, что наличие симметричного покрытия приводит к условию: суммы соответствующих моментов, действующих на основу и покрытие, равны нулю. Принимая во внимание, что здесь на основу действует растягивающее усилие P , а на каждый из слоев покрытия – сжимающие усилия $P/2$, уравнение для определения P в отличие от (3) имеет вид

$$-\alpha_o \Delta t + \frac{P}{E_o F_o} = -\alpha_{\text{п}} \Delta t - \frac{P}{2E_{\text{п}} F_{\text{п}}},$$

откуда находим

$$P = \Delta \frac{2E_o E_{\text{п}} F_o F_{\text{п}}}{E_o F_o + 2E_{\text{п}} F_{\text{п}}}.$$

Остаточные напряжения в основе и покрытии с учетом величины и направления действия усилий P и $P/2$ для двухстороннего покрытия определяются по формулам

$$\sigma_o = \frac{P}{F_o} = \frac{2\Delta h E_o E_{\text{п}}}{E_o H + 2E_{\text{п}} h}; \quad \sigma_{\text{п}} = -\frac{P}{2F_{\text{п}}} = -\frac{\Delta H E_o E_{\text{п}}}{E_o H + 2E_{\text{п}} h}. \quad (11)$$

Поскольку, как и для одностороннего покрытия, здесь принято $\alpha_o > \alpha_{\text{п}}$, то $\sigma_{\text{п}}$ также будут сжимающими ($\sigma_{\text{п}} < 0$), а σ_o – растягивающими ($\sigma_o > 0$). Их отношение по абсолютной величине будет $\sigma_o / \sigma_{\text{п}} = 2h/H$. Если формулы (10) для одностороннего покрытия выразить с помощью (9) через Δ , то получим

$$\sigma_o = \frac{4\Delta h E_o E_{\text{п}}}{E_o H + 4E_{\text{п}} h}; \quad \sigma_{\text{п}} = -\frac{\Delta H E_o E_{\text{п}}}{E_o H + 4E_{\text{п}} h}. \quad (12)$$

Сравнение напряжений, определяемых по формулам (11) и (12), показывает, что остаточные напряжения в покрытии $\sigma_{\text{п}}$ приблизительно равны, а остаточные напряжения в основе σ_o , которые действуют в переходной зоне при одностороннем покрытии, примерно в два раза больше напряжений в основе при двухстороннем покрытии. Этот результат, следовательно, необходимо учитывать в случаях, когда экспериментально найденные σ_o с помощью формулы (10), справедливой для одностороннего покрытия, необходимо использовать для балочного объекта с двухсторонним покрытием, например для образца, который показан на рис. 1.

Расчетная оценка прочности при циклическом нагружении. Располагая полученными формулами для расчета остаточных напряжений, можно выяснить степень влияния последних на сопротивление усталости композиции. Ранее [1] было получено соотношение, позволяющее установить связь

между относительной толщиной двухстороннего покрытия и пределом выносливости при симметричном нагружении:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1(o)} \left[1 + (C - 1) \frac{\eta}{1 + \eta} \right], \quad (13)$$

где $\eta = 6h/H$; $C = \frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_{-1(o)}} = \frac{E_{\Pi}}{E_o}$; $\sigma_{-1(o)}$ – предел выносливости основы; σ_{Π} – напряжение в покрытии в момент, когда напряжение в основе на поверхности раздела равно $\sigma_{-1(o)}$.

Зависимость (13) не учитывает $\sigma_{ост}$ и получена из условия, что усталостное разрушение основы в переходной зоне предшествует разрушению покрытия, т.е. зависимость предназначена прежде всего для расчета σ_{-1} композиции с упрочняющими покрытиями. Очевидно, что учет $\sigma_{ост}$ при оценке предельного напряжения для случая циклического изгиба возможен, если развить (13), воспользовавшись одной из расчетных гипотез о влиянии среднего напряжения цикла на предел выносливости. Уравнения, связывающие предельные напряжения со статическими, приведены, например, в справочном пособии [6]. Согласно уравнению Гудмена, как одному из наиболее обоснованных и проверенных экспериментально [7, 8], для основы и покрытия соответственно можно записать

$$\sigma_{a(o)} = \sigma_{-1(o)} \left[1 - \frac{\sigma_{ост(o)}}{\sigma_{B(o)}} \right]; \quad \sigma_{a(\Pi)} = \sigma_{\Pi} \left[1 - \frac{\sigma_{ост(\Pi)}}{\sigma_{B(\Pi)}} \right], \quad (14)$$

где $\sigma_{a(o)}$ – предельное напряжение в основе, отвечающее пределу выносливости основы $\sigma_{-1(o)}$ при симметричном нагружении; $\sigma_{a(\Pi)}$ – напряжение в покрытии, отвечающее напряжению σ_{Π} , действующему в покрытии при симметричном нагружении в момент усталостного разрушения основы от напряжений $\sigma_{-1(o)}$; $\sigma_{ост(o)}$, $\sigma_{ост(\Pi)}$ – остаточные напряжения в переходной зоне; $\sigma_{B(o)}$, $\sigma_{B(\Pi)}$ – пределы прочности основы и покрытия.

После замены в (13) σ_{-1} , $\sigma_{-1(o)}$, σ_{Π} отвечающими им аналогами σ_a , $\sigma_{a(o)}$, $\sigma_{a(\Pi)}$ в соответствии с (14) для предельного напряжения композиции σ_a получим

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \frac{1}{1 + \eta} [\eta \gamma_{\Pi} \sigma_{ост(\Pi)} + \gamma_o \sigma_{ост(o)}], \quad (15)$$

где σ_{-1} – предел выносливости композиции без учета $\sigma_{ост}$, определяемый согласно (13); $\gamma_o = \sigma_{-1(o)}/\sigma_{B(o)}$; $\gamma_{\Pi} = \sigma_{\Pi}/\sigma_{B(\Pi)}$.

Приняв во внимание следующую из (11) зависимость $\sigma_{ост(\Pi)} = -3\sigma_{ост(o)}/\eta$, вместо (15) можно записать

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + \frac{(3\gamma_{\Pi} - \gamma_o)}{1 + \eta} \sigma_{ост(o)} = \sigma_{-1} - \frac{\eta(3\gamma_{\Pi} - \gamma_o)}{3(1 + \eta)} \sigma_{ост(\Pi)}. \quad (16)$$

Ориентировочные значения коэффициентов γ_o , полученные из опытов для различных металлов, лежат в сравнительно узких пределах. Например, для стали – 0,4...0,6, для алюминиевых сплавов – 0,25...0,4, для медных сплавов – 0,3...0,5 [6], для титановых сплавов – в среднем 0,5 [9], поэтому для упрощения положим $\gamma_o = \gamma_{\Pi} = 0,5$. Выражение (16) в этом случае принимает вид

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + \frac{\sigma_{\text{ост}(o)}}{1+\eta} = \sigma_{-1} - \frac{\eta}{3(1+\eta)} \sigma_{\text{ост}(\Pi)}. \quad (17)$$

Исходя из соотношения между коэффициентами температурного расширения (α_o , α_{Π}) необходимо установить знаки напряжений $\sigma_{\text{ост}(o)}$ и $\sigma_{\text{ост}(\Pi)}$, входящих в (16) и (17). В общем случае возможны два варианта. В первом варианте, принятом выше в качестве рабочего, т.е. при $\alpha_o > \alpha_{\Pi}$, имеем $\sigma_{\text{ост}(o)} > 0$, $\sigma_{\text{ост}(\Pi)} < 0$, поэтому согласно (17) получим

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + \frac{\sigma_{\text{ост}(o)}}{1+\eta} = \sigma_{-1} + \frac{\eta}{3(1+\eta)} \sigma_{\text{ост}(\Pi)}, \quad (18)$$

откуда видно, что, несмотря на растягивающие остаточные напряжения в основе ($\sigma_{\text{ост}(o)} > 0$), здесь тем не менее требуемое условие $\sigma_a > \sigma_{-1}$ будет выполнено.

Во втором варианте, т.е. при $\alpha_o < \alpha_{\Pi}$, получим $\sigma_{\text{ост}(o)} < 0$, $\sigma_{\text{ост}(\Pi)} > 0$, откуда согласно (17) следует

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \frac{\sigma_{\text{ост}(o)}}{1+\eta} = \sigma_{-1} - \frac{\eta}{3(1+\eta)} \sigma_{\text{ост}(\Pi)}.$$

Как видно, наличие сжимающих напряжений в основе $\sigma_{\text{ост}(o)}$ приводит к разупрочнению композиции, поскольку $\sigma_a < \sigma_{-1}$. Аналогичную роль играют и растягивающие напряжения в покрытии $\sigma_{\text{ост}(\Pi)}$. Изложенное подтверждает целесообразность применения покрытий в качестве упрочняющего фактора только при соблюдении условий $\sigma_{\text{ост}(o)} > 0$, $\sigma_{\text{ост}(o)} < 0$. В противном случае следует ожидать снижения сопротивления усталости композиции. Таким образом, для реализации требования $\sigma_a > \sigma_{-1}$ необходимо выполнение условия $\alpha_o > \alpha_{\Pi}$. Это условие гарантированно реализуется, в частности, если основа – металл, а покрытие – разновидность технической керамики (нитриды, бориды, карбиды и т.д.) Кроме того, из (13) видно, что для превышения σ_{-1} величины $\sigma_{-1(o)}$ необходимо, чтобы $C > 1$, т.е. $E_{\Pi} > E_o$. Это условие также, как правило, удовлетворяется в системах металл–керамика. Следует заметить, что описанная ситуация, при которой реализуется данная схема упрочнения или разупрочнения в зависимости от значений α_o и α_{Π} , возникает в случаях, когда входящий в (16) множитель $3\gamma_{\Pi} - \gamma_o > 0$. Вариант $3\gamma_{\Pi} - \gamma_o \leq 0$, приводящий, как можно проверить, к прямо противоположным заключениям, не рассматривается ввиду его практической маловероятности. Например, если $\gamma_o = 0,5$, то должно быть $\gamma_{\Pi} \leq 0,16$, что, по-

видимому, может иметь место для весьма хрупких гипотетических покрытий, практически не сопротивляющихся переменному нагружению.

Для инженерных расчетов целесообразно выражение (16), принятое в качестве рабочего, представить в виде

$$\sigma_a = \frac{1 + Ch}{1 + \eta} \left[\sigma_{-1(o)} + (3\gamma_{\text{п}} - \gamma_o) \Delta E_o \frac{C\eta}{(1 + Ch)(3 + C\eta)} \right]. \quad (19)$$

Входящие в (19) величины, кроме коэффициента C , считаем известными. Поскольку расчетная модель (19) является континуальной и не учитывает структурных особенностей покрытия и межфазного слоя, зависящих от технологических параметров и условий нанесения покрытия, коэффициент C следует полагать неопределенным. Его выражение в виде $C = E_{\text{п}}/E_o$, приведенное выше, является рабочим приближением для первичной оценки σ_a , необходимой для последующего уточнения параметров технологического процесса. Для такой оценки, безусловно, можно использовать значения $E_{\text{п}}$, которые могут быть определены или уже известны для компактных материалов, аналогичных материалу покрытия.

Проверить пригодность (19) для практических расчетов можно, если имеются экспериментальные данные для σ_{-1} . В качестве примера рассмотрим оценку σ_a для системы титан–нитрид титана. Ранее [10] для листового технического титана ВТ1-0 толщиной $H = 5$ мм получено: $\sigma_{-1(o)} = 265$ МПа без покрытия, $\sigma_{-1} = 295$ МПа при $h = 6$ мкм и $\sigma_{-1} = 350$ МПа при $h = 12$ мкм с покрытием TiN. Использовалась вакуум-плазменная технология нанесения покрытия при температуре в рабочей камере $(500...600)^\circ\text{C}$, методика усталостных испытаний соответствовала изложенной выше. Исходные данные для расчета: $H = 0,5$ мм; $\Delta t = (5 \cdot 10^2)^\circ\text{C}$; $\alpha_o = 9 \cdot 10^{-6}$ [6]; $E_o = 1,1 \cdot 10^5$ МПа [9]; $\sigma_{-1(o)} = 265$ МПа; $\alpha_{\text{п}} = 6,6 \cdot 10^{-6}$ [11]; $C = 4$ при $E_{\text{п}} = 4,35 \cdot 10^5$ МПа. Последний параметр получен на образцах горячепрессованного из ультрадисперсионных порошков нитрида титана именно как аналога покрытия TiN [12]. Результаты расчета σ_a при $3\gamma_{\text{п}} - \gamma_o = 1$ для ряда толщин h приведены в таблице, где представлены также значения $\sigma_{\text{ост}(o)}$, вычисленные по первой из формул (11).

Различие между расчетными (таблица) и приведенными выше экспериментальными значениями пределов выносливости при $h = 6$ и 12 мкм составляет около 10%. Если при $C = 4$ вместо $\gamma_{\text{п}} = 0,5$ положить $\gamma_{\text{п}} = 0,3$, что более-менее справедливо для керамики и стекла [6, 13], то различие между данными эксперимента и расчета будет несколько меньше, а именно: 9% при $h = 6$ мкм и 6% при $h = 12$ мкм.

Исходя из этого можно предположить, что при заданном для основы коэффициенте γ_o величина $\gamma_{\text{п}}$, выбранная в характерном для большинства конструкционных материалов диапазоне $0,3...0,5$, мало влияет на количественные значения σ_a . В данном случае это в первую очередь связано с незначительными величинами $\sigma_{\text{ост}(o)}$ (таблица). Что касается параметра C , то он влияет на результат более существенно. Так, при $C = 2,8$ указанное

Напряжения σ_a и $\sigma_{ост(о)}$ в зависимости от h

h , мкм	h/H	η	σ_a , МПа	$\sigma_{ост(о)}$, МПа
5	0,010	0,060	319	9,8
6	0,012	0,072	329	11,6
7	0,014	0,084	338	13,3
9	0,018	0,108	357	16,6
12	0,024	0,144	384	21,3

различие при принятом $\gamma_o = \gamma_{п} = 0,5$ составляет $\pm 3\%$. В любом случае согласно расчетной модели (19), как следует из примера, получено в качественном отношении удовлетворительное приближение к эксперименту. Необходимо однако учитывать, что данные в примере относятся к покрытию, полученному при конкретных технологических параметрах вакуум-плазменного осаждения [10], которые целенаправленно были оптимизированы для создания покрытия с заданными воспроизводимыми свойствами, реально упрочняющими основной металл. Следовательно, расчетная зависимость (19) может быть рекомендована для отработки технологии получения упрочняющих покрытий в сочетании с ее экспериментальной проверкой, а также для первичной оценки существующих покрытий после предварительного анализа их физико-механических параметров основы и материала покрытия, которые входят в структуру этой зависимости.

Заключение. Предложена схема ускоренной оценки выносливости композиций основа–покрытие. Показана необходимость использования при ее реализации комплексного подхода: сочетания экспериментального и расчетного способов. Обоснована целесообразность применения в этом случае высокочастотного метода по рекомендуемой экспериментальной методике. На базе полученных соотношений для расчета остаточных напряжений в основе и покрытии разработана расчетная модель с целью прогноза сопротивления усталости композиции. Показана применимость модели для первичной оценки выносливости систем основа–покрытие, а также при отработке технологии создания упрочняющих покрытий.

Резюме

У рамках запропонованої схеми прискореної оцінки опору втомі композицій основа–покриття показано необхідність її комплексної реалізації – експериментальним та розрахунковим способами. Обґрунтовано використання з цією метою високочастотного методу на прикладі експериментальної методики, що пропонується. На основі отриманих співвідношень для розрахунку залишкових напружень розроблено модель для прогнозування опору втомі композиції. Показано її застосовність для первинної оцінки витривалості систем основа–покриття та при відпрацюванні технології створення зміцнювальних покриттів.

1. Трапезон А. Г. Методологические проблемы при исследовании тонкопленочных упрочняющих покрытий // Пробл. прочности. – 2007. – № 2. – С. 99 – 112.
2. Трапезон А. Г. К методике испытаний на усталость тонколистовых материалов при плоском изгибе на высоких частотах нагружения // Там же. – 1977. – № 3. – С. 38 – 41.
3. Alsaran Akgun, Kaymaz Irfan, Celik Ayhan, et al. A repair process for fatigue damage using plasma nitriding // Surface and Coatings Technol. – 2004. – **186**, No. 3. – P. 333 – 338.
4. Хасуи А. Техника напыления. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
5. Hu M. S., Thouless M. D., and Evans A. G. The decohesion of thin films from brittle substrates // Acta Met. – 1988. – **36**, No. 5. – P. 1301 – 1307.
6. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Т. 2 / В. Т. Трощенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский и др. – Киев: Наук. думка, 1994. – 701 с.
7. Кеннеди А. Дж. Ползучесть и усталость в металлах. – М.: Металлургия, 1965. – 312 с.
8. Форрест П. Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
9. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
10. Трапезон А. Г., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В. О влиянии вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана // Пробл. прочности. – 1995. – № 11-12. – С. 32 – 40.
11. Соломин Н. В. Высокотемпературная устойчивость материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 128 с.
12. Бердигов В. Ф., Вильк Ю. Н., Пушкарев О. И., Лавренова Е. А. Микромеханические характеристики горячепрессованного нитрида титана из ультрадисперсных порошков // Пробл. прочности. – 1993. – № 3. – С. 90 – 93.
13. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко. – Киев: Наук. думка, 1979. – 336 с.

Поступила 05. 11. 2007