УДК: 620.191.33

DOI: 10.53816/23061456 2022 9-10 65

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ДЕФЕКТНОСТИ И ТОЛЩИНЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE DEFECT AND THE THICKNESS OF THE FUNCTIONAL COATING OF SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT

Канд. техн. наук А.Ю. Андрюшкин, Е.А. Изюмова, М.У. Рустамова

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, E.A. Izyumova, M.U. Rustamova

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Дано теоретическое обоснование взаимосвязи дефектности и толщины функционального покрытия техники специального назначения. Показана взаимосвязь толщины функционального покрытия и величины критического напряжения при его отслоении от основы. Минимизация толщины функционального покрытия исключает его отслоение от основы. Показана взаимосвязь толщины функционального покрытия и величины критической глубины поперечной трещины при его растрескивании. Критическая глубина поперечной трещины составляет 25 % от толщины функционального покрытия. Стабильны поперечные трещины, имеющие глубину не более 40–60 % от ее критической глубины. Для снижения дефектности функционального покрытия рекомендовано его послойное нанесение на основу. Толщина единичного слоя должна быть равна или меньше критического размера поперечной трещины. *Ключевые слова*: функциональное покрытие, дефектность, дефект, отслоение, трещина, качество.

The theoretical substantiation of the relationship between the defect and the thickness of the functional coating of special-purpose equipment is given. The relationship between the thickness of the functional coating and the magnitude of the critical stress when it is detached from the substrate is shown. Minimizing the thickness of the functional coating eliminates its detachment from the substrate. The relationship between the thickness of the functional coating and the critical depth of the transverse crack during its cracking is shown. The critical depth of the transverse crack during its cracking is shown. The critical depth of the transverse cracks of the functional coating. Transverse cracks with a depth of no more than 40–60 % of its critical depth are stable. To reduce the defect of the functional coating, its layer-by-layer application to the base is recommended. The thickness of a single layer must be equal to or less than the critical size of the transverse crack. *Keywords*: functional coating, defect, defect, detachment, crack, quality.

Keyworus. Tunctional coating, derect, derect, detachinent, erack, quan

Высокие тактико-технические характеристики (TTX) современной техники специального назначения (TCH) определяются применяемыми в их конструкции функциональными покрытиями (ФП). Показатели качества ФП (прочность, водопоглощение, тепло- и электропроводность, износостойкость, коррозионная стойкость) обусловлены его производственной дефектностью, которая развивается в процессе эксплуатации TCH [1, 2].

Дефектность ФП вычисляется как отношение характерного размера дефектов к характерному размеру ФП, например отношение суммарной площади дефектов, к площади ФП. Чем меньше это отношение, тем выше качество ФП. В ФП часто встречаются дефекты в виде несплошностей: пор, раковин, отслоений, трещин. Несплошности являются концентраторами напряжений, они значительно снижают прочность и другие показатели качества ФП. Особенно опасны отслоения и трещины, так как у этих дефектов, с малым радиусом кривизны при вершине, напряжения могут увеличиваться в несколько раз по сравнению с напряжении в бездефектном ФП. Распространение дефекта, то есть его увеличение в размерах, приводит к разрушению ФП. Для распространения дефекта должно соблюдаться одно из двух условий:

 при заданном характерном размере дефекта ФП напряжение в месте его нахождения достигает критического значения;

 при заданном напряжении в бездефектном
 ФП характерный размер дефекта имеет критическое значение.

При выполнении любого условия наблюдается распространение дефекта и дальнейшее разрушение ФП, что существенно ухудшает ТТХ ТСН.

Обычно отвержденное ΦП испытывает растягивающие напряжения, возникающие вследствие усадки нанесенной на основу (подложку) исходной композиции, и находится в плоскодеформированном состоянии (ПДС). Отверждение проходит неравномерно по толщине композиции, что является причиной неоднородности ФП и приводит к возникновению и развитию различных дефектов. Основным контролируемым параметром ФП является его толщина, которая значительно влияет на показатели качества. Поэтому актуально обоснование взаимосвязи дефектности и толщины ФП ТСН.

Взаимосвязь толщины функционального покрытия и величины критического напряжения при его отслоении от основы

При растяжении ФП часто встречаются краевые отслоения, реже — отслоения, отстоящие от края (рис. 1). Отслоения представляют собой трещины, лежащие на границе раздела между основой (подложкой) и ФП. Движущей силой отслоения является накопленная в ФП упругая энергия. Отслоения развиваются в местах расположения производственных дефектов из-за значительной концентрации напряжений.

Мерой напряжений и деформаций в окрестности вершины дефекта является коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Критическое значение КИН определяют экспериментально при растяжении образцов с дефектом [2–5]:

$$K_{Ic} = \sigma_{K_{Ic}} \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{\rm rp}}, \qquad (1)$$

где K_{lc} — критический коэффициент интенсивности напряжений, Па·м^{0,5}; $\sigma_{K_{lc}}$ — критическое напряжение при разрушении образца с дефектом, Па; Y — поправочная функция, или фактор конфигурации; $a_{\rm тр}$ — полудлина трещины (отслоения); $\pi = 3,14$.

При достижении КИН критического значения образец разрушается. Критический КИН является мерой трещиностойкости материала. Чем больше значение критического КИН, тем выше трещиностойкость испытываемого материала.

Рост отслоения ФП при ПДС происходит при достижении энергетическим критерием Гриффитса критического значения [6–10]:

$$G_{lc} = \frac{\sigma_{\kappa p}^2 \cdot a_{\tau p} \cdot \pi \cdot \left(1 - \mu_{\Phi \Pi}^2\right)}{E_{\Phi \Pi}},$$
 (2)



Рис. 1. Отслоения функционального покрытия от основы: 1 — основа; 2 — краевое отслоение;

3 — функциональное покрытие; 4 — отслоение, отстоящее от края; h_{фn} — толщина функционального покрытия; a_{mp} — полудлина отслоения (трещины); σ_{кp} — критическое напряжение в месте расположения дефекта где G_{lc} — критическая скорость высвобождения энергии, Дж/м²; $E_{\Phi\Pi}$ — модуль Юнга для ФП, Па; $\mu_{\Phi\Pi}$ — модуль Пуассона для ФП; $\sigma_{\kappa p}$ — критическое напряжение в месте расположения отслоения (трещины), Па.

Критический энергетический критерий Гриффитса (2) связан с критическим КИН (1) выражением [6–10]:

$$G_{lc} = \frac{K_{lc}^2 \cdot \left(1 - \mu_{\Phi\Pi}^2\right)}{E_{\Phi\Pi}}.$$
(3)

Критическое напряжение для отслоения $\Phi\Pi$ от основы можно рассчитать по выражению (рис. 1) [11–14]:

$$\sigma_{\kappa p} = \left(\frac{2 \cdot G_{lc} \cdot E_{\Phi \Pi}}{h_{\Phi \Pi} \cdot (1 - \mu_{\Phi \Pi}^2)}\right)^{0.5}, \quad (4)$$

где $h_{\Phi\Pi}$ — толщина ФП, м.

Подставим (1) и (3) в выражение (4) и получим:



Расчет по выражению (5) позволяет оценить влияние толщины $\Phi \Pi h_{\Phi \Pi}$ и полудлины трещины a_{Tp} на величину критического напряжения $\sigma_{\kappa p}$ при отслоении. Расчет проводился при следующих исходных данных: полудлина трещины $a_{Tp} = 20$; 35; 50 мкм; толщина $\Phi \Pi h_{\Phi \Pi} = 100 - 1000$ мкм. Критическое напряжение, приводящее к разрушению образца с дефектом $\sigma_{K_k} = 10$ МПа. Значение фактора конфигурации Y = 1 (рис. 2).

Результаты расчета показывают, что чем выше трещиностойкость материла ФП, тем при большей длине полутрещины достигается критическое напряжение, необходимое для роста отслоения. При меньшей толщине ФП значение критического напряжения при отслоении выше. С увеличением толщины ФП влияние длины полутрещины на величину критического напряжения при отслоении снижается.

Таким образом, для исключения отслоения ФП от основы рекомендуется минимизировать его толщину до значений, не снижающих другие показатели качества ФП.

Взаимосвязь толщины функционального покрытия и величины критической глубины поперечной трещины при его растрескивании

У вершин поперечных трещин в подверженном растяжению ФП наблюдается высокая кон-



Рис. 2. Зависимость критического напряжения $\sigma_{_{\kappa p}}$ при отслоении от толщины функционального покрытия $h_{_{\phi\Pi}}$ при различной полудлине трещины $a_{_{mp}}$

центрация напряжений. Если растягивающее напряжение в бездефектном ФП имеет значение σ_0 , то при критической глубине поперечной трещины $a_{\text{тр_кр}}$ происходит ее увеличение в размерах и ФП разрушается (рис. 3). Концентрация напряжений у вершины трещины является необходимым, но не достаточным условием для ее роста и разрушения ФП. Увеличение трещины в размерах происходит при подводе достаточной энергии к ее вершине [1–7].

А.А. Гриффитс предложил энергетический критерий роста трещины: трещина увеличивается в размерах, когда уменьшение потенциальной энергии (энергии упругой деформации) будет больше или равно необходимой для разрушения материала работе, приходящейся на единицу площади, возникающей в результате этого свободной поверхности [2, 3]. Высвобожденная энергия упругой деформации U поступает в вершину трещины, вызывает концентрацию напряжений и расходуется на ее рост. Изменение энергии упругой деформации ∂U при распространении трещины с характерным размером *а*_{тр} на бесконечно малое расстояние $\partial a_{\rm TD}$ и является скоростью высвобождения упругой энергии деформации [3, 11-14]:

$$G(a_{\rm TP}) = \frac{\partial U(a_{\rm TP})}{\partial a_{\rm TP}}$$

где *U*— энергия упругой деформации, Дж; *a*_{тр} — глубина трещины, м.



Рис. 3. Поперечная трещина функционального покрытия основы: 1 — основа; 2 — поперечная трещина; 3 — функциональное покрытие; h_{φΠ} толщина функционального покрытия; a_{mp, кp} критическая глубина трещины; a_{mp} — глубина трещины; σ₀ — растягивающее напряжение в бездефектном функциональном покрытии; z — координата, перпендикулярная поверхности функционального покрытия

При ПДС скорость высвобождения упругой энергии деформации в вершине поперечной трещины ФП определяется по выражению [11–14]:

$$G(z) = 1,258 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma_0^2 \cdot \left(1 - \mu_{_{3\Pi}}^2\right)}{E_{_{3\Pi}}} \cdot z, \qquad (6)$$

где σ_0 — растягивающие напряжения в бездефектном $\Phi\Pi$, Πa ; *z* — координата, перпендикулярная поверхности $\Phi\Pi$, м; $\pi = 3,14$.

Применяя выражение (6), можно установить удельную энергию упругой деформации, выделяющуюся в вершине поперечной трещины ФП:

$$W = \int_{0}^{a_{\rm rp}} G(z) dz , \qquad (7)$$

где W — удельная энергия упругой деформации, выделяющаяся в вершине поперечной трещины, Дж/м; $a_{\rm тp}$ — глубина поперечной трещины $\Phi\Pi$, м.

При действующем растягивающем напряжении σ_0 рост поперечной трещины будет происходить, если ее глубина имеет критическое значение $a_{\text{тр_кр}}$. Аналогично выражению (4) такое критическое состояние характеризуется энергетическим критерием Гриффитса [11–14]:

$$G_{Ic} = \frac{\sigma_0^2 \cdot h_{\Phi\Pi} \cdot \left(1 - \mu_{\Phi\Pi}^2\right)}{2 \cdot E_{\Phi\Pi}}$$

В критическом состоянии удельная работа разрушения, необходимая для роста поперечной трещины вглубь ФП:

$$W_{\rm kp} = a_{\rm rp} \cdot G_{\rm lc} = \frac{a_{\rm rp} \cdot \sigma_0^2 \cdot h_{\rm \Phi\Pi} \cdot \left(1 - \mu_{\rm \Phi\Pi}^2\right)}{2 \cdot E_{\rm \Phi\Pi}}, \qquad (8)$$

где $W_{\rm kp}$ — удельная работа разрушения, необходимая для роста поперечной трещины, Дж/м.

Из сопоставления выражений (7) и (8) видно, что условием роста поперечной трещины вглубь ФП является $W \ge W_{\text{кр}}$, то есть удельная энергия упругой деформации должна быть больше или равна работе разрушения.

Таким образом, для разрушения ФП из-за роста поперечной трещины ее глубина должна иметь критическое значение $a_{_{\rm TP},{\rm KP}}$, при котором выполняется условие $W \ge W_{_{\rm KP}}$.

Рассмотрим влияние глубины поперечной трещины на соотношение удельной энергии упругой деформации W и удельной работы разрушения $W_{\rm кp}$, при различной толщине ФП по выражениям (7) и (8) для различных толщин ФП $h_{\rm \phi\Pi} = 100$; 120; 140 мкм (рис. 4). Растягивающее напряжение в бездефектном ФП $\sigma_0 = 0,143$ МПа. Характеристика материала ФП: модуль Юнга $E_{\rm \phi\Pi} = 10$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu_{\rm \phi\Pi} = 0,3$.

Анализ результатов расчета показывает (рис. 4), что с увеличением глубины трещины значение удельной энергии упругой деформации W и удельной работы разрушения $W_{\rm kp}$ возрастает. В местах пересечения графиков, где выполняется условие $W = W_{\rm kp}$, значение глубины поперечной трещины является критическим $a_{\rm rp} = a_{\rm rp_{\rm kp}}$. Если $a_{\rm rp} < a_{\rm rp_{\rm kp}}$, то $W < W_{\rm kp}$ и трещина сохраняет прежние размеры. Если $a_{\rm rp} \ge a_{\rm rp_{\rm kp}}$, то $W \ge W_{\rm kp}$ и трещина растет вглубь ФП.

С увеличением толщины ФП величина удельной работы разрушения, требующейся для распространения поперечной трещины, повышается, следовательно, растет ее критическая глубина. При толщине ФП $h_{\Phi\Pi} = 100$ мкм критическая глубина поперечной трещины составляет $a_{\rm тр \ кp} = 25$ мкм; при $h_{\Phi\Pi} = 120$ мкм —

 $a_{_{\rm TP,KP}} = 30$ мкм; при $h_{_{\Phi\Pi}} = 140$ мкм — $a_{_{\rm TP,KP}} = 35$ мкм. Отношение $(a_{_{\rm TP,KP}}/h_{_{\Phi\Pi}}) = 0,25$ является постоянным для ФП различной толщины и не зависит от свойств материала. Если глубина поперечной трещины равна или более 25 % толщины ФП, то оно разрушается. Таким образом, критическая глубина поперечной трещины составляет $a_{_{\rm TP,KP}} = 0,25 \cdot h_{_{\Phi\Pi}}$.

Из анализа графиков следует, что глубина поперечной трещины не должна превышать значение $a_{rp} \leq (0,4-0,6) \cdot a_{rp_kp}$, так как при этом разница между удельной работой разрушения и удельной энергией упругой деформации ($W_{kp} - W$) максимальна и дальнейший рост трещины невозможен, ее форма и размеры стабильны (рис. 4).

Таким образом, определена критическая глубина поперечной трещины ФП $a_{_{\rm TP}_{\rm KP}} = 0.25 \cdot h_{_{\rm OII}}$. Устойчивы к дальнейшему распространению поперечные трещины, имеющие глубину $a_{_{\rm TP}} \leq (0.4-0.6) \cdot a_{_{\rm TP}_{\rm KP}}$.

Полученные результаты показывают, что для обеспечения работоспособности ФП глубина поперечной трещины не должна достигать критического значения, составляющего 25 % от толщины ФП. Поэтому рационально перейти к послойному нанесению ФП, при этом толщина единичного слоя должна быть $h_{\rm cn} < a_{\rm тр \ кp}$. При послойном



Рис. 4. Зависимость удельной энергии упругой деформации W, выделяющейся в вершине поперечной трещины, и удельной работы разрушения W_{кр}, требующейся для распространения поперечной трещины вглубь функционального покрытия, от глубины поперечной трещины а_{тр}, при различных толщинах функционального покрытия h_{фП}

формировании ФП дефекты каждого единичного слоя не будут превышать критического значения, так как их размер не может быть больше толщины единичного слоя. Также необходимо отметить, что поверхностные и сквозные дефекты нижележащего слоя будут залечиваться при нанесении последующего слоя композиции. Поэтому послойное нанесение значительно снижает дефектность ФП.

Выводы

Высокие ТТХ ТСН определяются качеством ФП, которое зависит от его дефектности.

Опасными дефектами, снижающими качество ФП и приводящими к его разрушению, являются несплошности: поры, раковины, отслоения, трещины.

Минимизация толщины ФП приводит к росту значения критического напряжения, необходимого для увеличения в размерах отслоения между ФП и основой.

Разрушение ФП из-за роста поперечной трещины наблюдается при критическом значении ее глубины, при этом удельная энергия упругой деформации больше или равна работе разрушения.

Критическая глубина поперечной трещины составляет 25 % от толщины ФП. Стабильны поперечные трещины с глубиной не более 40–60 % от критического значения их глубины.

Послойное нанесение ФП снижает дефектность и исключает появления дефектов с критическими размерами.

Литература

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. — СПб.: Наука, 2014. 412 с.

2. Андрюшкин А.Ю. Применение сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для снижения вероятности отказа многослойных функциональных покрытий: монография. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2021. 258 с.

3. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Издательство Пермского государственного технического университета. 2010. 103 с.

4. Сысоева В.В. Расчеты коэффициентов интенсивности напряжений для типовых авиационных конструкций с трещинами // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 60–77.

5. Соколов С.А., Тулин Д.Е. Методика вычисления коэффициента интенсивности напряжений для трещины в области концентратора напряжений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 328–335.

6. Маркочев В.М., Алымов М.И. О теории хрупкого разрушения Я. Френкеля и А. Гриффитса // Чебышевский сборник. 2017. Т. 18. № 3 (63). С. 381–393.

7. Комарицина В.Н., Сухорукова Н.Н. Исследования механики деформаций и разрушений и некоторые вопросы обеспечения безопасности и надежности трубопроводов с учетом особенностей технологического процесса // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 4. С. 116–119.

8. Старцев О.В., Лебедев М.П., Славин А.В., Ноев И.И. Механика разрушения неоднородно стареющих полимерных материалов // Доклады Академии наук. 2018. Том 483. № 5. С. 522–527.

9. Хутыз А.М., Шишова Р.Г. Механика разрушения и критерии трещиностойкости // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике. 2016. № 1 (7). С. 235–239.

10. Добровольский Д.С. Критерии трещиностойкости нелинейной механики разрушения элементов конструкций // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Том 15. № 2. С. 23–26.

11. Freund L.B., Suresh S. Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution, Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 820 p.

12. Hsueh C.-H., Lee S., Lin H.-Y. Analyses of mode I edge delamination by thermal stresses in multilayer systems // Composites B. 2006. Vol. 37. Pp. 1–9.

13. Zhang X.C., Xu B.S., Wang H.D., Wu Y.X. Effect of graded interlayer on the mode I edge delamination by residual stresses in multilayer coating-based systems // Applications. Surf. Sci. 2008. Vol. 254. Pp. 1881–1889.

14. Yu H.H., He M.Y., Hutchinson J.W. Edge effects in thin film delamination // Acta Mater. 2001. Vol. 49. Pp. 93–107.

References

1. Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality Management of industrial products Publisher: «St. Petersburg publishing and bookselling firm». — SPb.: «Science». 2014. 412 p.

2. Andryushkin A. Yu. Application of supersonic gas dynamic spraying with multi-jet gas supply to reduce the probability of failure of multilayer functional coatings: monograph. — St. Petersburg: BSTU «VOENMEH», 2021. 258 p.

3. Nikolaeva E.A. Fundamentals of destruction mechanics. Publishing House of Perm State Technical University. 2010. 103 p.

4. Sysoeva V.V. Calculations of stress intensity coefficients for typical aircraft structures with cracks // Proceedings of MAI. 2011. No. 45. Pp. 60–77.

5. Sokolov S.A., Tulin D.E. Methodology for calculating the stress intensity coefficient for a crack in the stress concentrator area // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. No. 5. Pp. 328–335.

6. Markochev V.M., Alymov M.I. On the theory of brittle fracture by J. Frenkel and A. Griffiths // Chebyshevsky collection. 2017. Vol. 18. No. 3 (63). Pp. 381–393.

7. Komaritsina V.N., Sukhorukova N.N. Studies of the mechanics of deformations and fractures and some issues of ensuring the safety and reliability of pipelines taking into account the peculiarities of the technological process // Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 116–119.

8. Startsev O.V., Lebedev M.P., Slavin A.V., Noev I.I. Mechanics of destruction of heterogeneously aging polymer materials Reports of the Academy of Sciences. 2018. Vol. 483. No. 5. Pp. 522–527.

9. Khutyz A.M.,Shishova R.G. Fracture mechanics and crack resistance criteria // Current directions of scientific research: from theory to practice. 2016. No. 1 (7). Pp. 235–239.

10. Dobrovolsky D.S. Criteria of crack resistance of nonlinear mechanics of structural elements destruction / D.S. Dobrovolsky // Intelligent systems in production. 2017. Vol. 15. No. 2. Pp. 23–26.

11. Freund L.B., Suresh S. Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution, Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 820 p.

12. Hsueh C.-H., Lee S., Lin H.-Y. Analyses of mode I edge delamination by thermal stresses in multilayer systems // Composites B. 2006. Vol. 37. Pp. 1–9.

13. Zhang X.C., Xu B.S., Wang H.D., Wu Y.X. Effect of graded interlayer on the mode I edge delamination by residual stresses in multilayer coating-based systems // Applications. Surf. Sci. 2008. Vol. 254. Pp. 1881–1889.

14. Yu H.H., He M.Y., Hutchinson J.W. Edge effects in thin film delamination // Acta Mater. 2001. Vol. 49. Pp. 93–107.