

Литература

1. Пестов, С.П. Стратегии обеспечения точности при обработке отверстий / С.П. Пестов, П.Г. Мазеин // Вестник машиностроения. – 2007. - №4. С. 31 – 34.
2. Пестов, С.П. Точность настройки станков с ЧПУ на обработку отверстий / С.П. Пестов, П.Г. Мазеин // СТИН. – 2006. - №11. С. 5 – 9.
3. Пестов, С.П. Разработка элементов технологической системы для обработки отверстий развертыванием на станках с ЧПУ / С.П. Пестов, С.Н. Юдин. // Автоматизация и информатизация в машиностроении: тематический сб. науч. тр. №5. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 114–117.

**К ПРОБЛЕМЕ ОТСЛАИВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
ИНСТРУМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*С.И. Петрушин, д.т.н., проф., Р.Х. Губайдулина, к.т.н., доц., А.А. Галеева, студент
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (8384-51)6-22-48
E-mail: victory_28@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Износостойкие покрытия, наносимые на поверхности инструментальных и конструкционных материалов, широко применяются в машиностроении с целью повышения долговечности трущегося поверхностного слоя при одновременном сохранении прочностных характеристик изделия. Так, например, ведущие инструментальные фирмы [1, 2] наносят на поверхность режущих лезвий из быстрорежущих сталей и твердых сплавов различные комбинации из тонких слоев карбидов и нитридов тугоплавких материалов и окиси алюминия (TiC, TiN, Al₂O₃ и др.). При этом общая толщина покрытия не превышает 10 – 20 мкм. В случае превышения данной величины покрытие становится хрупким и может отслоиться как при воздействии рабочих нагрузок, так и в процессе нанесения слоев [3]. Подобное явление может возникать также при наплавке, напылении, хромировании, никелировании и ряде других процессов, где имеется четкая граница между слоями (отсутствует значительная диффузионная зона). При отслаивании появляются межслойные трещины на границе раздела покрытия и основного материала (подложки). Рассмотрим общий подход к решению задачи трещиностойкости покрытия на основе анализа термических остаточных напряжений (ТОН), изложенного в работах [4,5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**1. РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Изделие с покрытой поверхностью представляет собой двухслойный композиционный материал (КМ), в котором верхний слой имеет сравнительно малую величину по сравнению с подложкой. Прочность многослойных композиционных материалов определяется не только пределами прочности материалов слоев, но и межслойной прочностью. Часто именно прочность границы между двумя смежными слоями является лимитирующей с точки зрения обеспечения сплошности композита. Обусловлено это тем, что изготовление композиционных материалов сопровождается нагревом изделия до значительной температуры (T_H). После спекания, наплавки, нанесения покрытия, послеслойного синтеза и т.п. происходит охлаждение композита до температуры окружающей среды (T_0). В связи с различием в значениях коэффициента линейного расширения (КЛР) между двумя смежными слоями на их границе возникают термические остаточные напряжения. В случае превышения ими предела прочности материала какого-либо слоя возникают холодные межслойные трещины, и композиционный материал становится непригодным для работы в данном изделии.

Когда величина термических остаточных напряжений меньше пределов прочности материалов слоев, обеспечивается монолитность композиционного материала. Однако их наличие может снизить прочностные характеристики изделия. Слой материала с большим коэффициентом линейного расширения при охлаждении стремится сократить свои размеры больше, чем слой с меньшим коэффициентом линейного расширения. В результате первый слой будет растянут вторым, а второй будет сжат первым. В материале с большим коэффициентом линейного расширения возникнут растяги-

вающие термические остаточные напряжения, а в материале с меньшим коэффициента линейного расширения – сжимающие термические остаточные напряжения [4].

Рассмотрим двухслойный композиционный материал, синтезированный при разнице температур $\Delta T = T_H - T_O$ и нагруженный только термически остаточными напряжениями (рис. 1). Материал 1 имеет коэффициент линейного расширения α_1 , модуль упругости E_1 и коэффициент Пуассона μ_1 , а материал 2 имеет значения: α_2 , E_2 и μ_2 . Рассмотрим вначале случай, когда $\alpha_1 > \alpha_2$. Так как толщина единичного слоя в композиционном изделии как правило, значительно меньше его длины и ширины, то в нем при охлаждении будет реализовано плоское напряженное состояние, для которого закон Гука имеет вид [6]:

$$\text{для слоя 1 (растяжение) - } \sigma = \frac{\varepsilon E_1}{1 - \mu_1}; \quad (1)$$

$$\text{для слоя 2 (сжатие) - } \sigma = \varepsilon E_2 (1 - \mu_2). \quad (2)$$

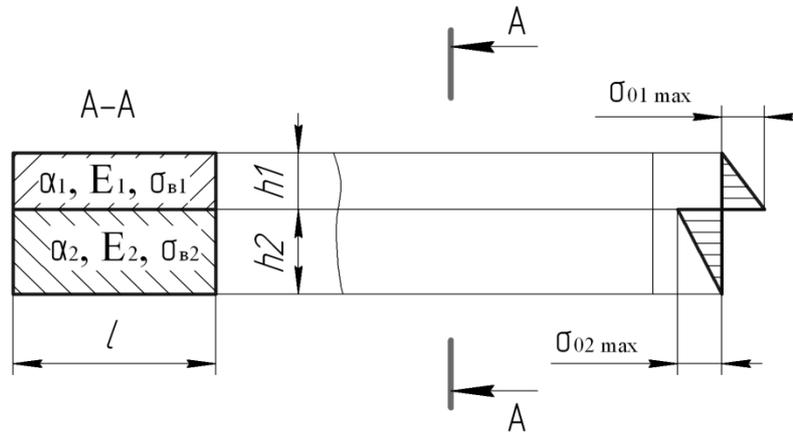


Рис. 1. Схема двухслойного композиционного материала, нагруженного только термическими остаточными напряжениями ($\alpha_1 > \alpha_2$).

При отсутствии внешних нагрузок максимальные значения термически остаточных напряжений σ_O^{\max} будут находиться на границе раздела слоев. На верхней поверхности слоя 1 и нижней поверхности слоя 2 термически остаточные напряжения равны нулю, а внутри слоев они распределяются линейно (см. рис. 1). Если обозначить через $F_1 = bh_1$ площадь поперечного сечения слоя 1, а через $F_2 = bh_2$ – слоя 2, где b – ширина слоев, h_1 и h_2 – их толщины, то имеем условие равновесия сил при сплошности композиционного материала на границе:

$$\frac{1}{2} \sigma_{O1}^{\max} bh_1 = \frac{1}{2} \sigma_{O2}^{\max} bh_2.$$

Отсюда

$$\sigma_{O2}^{\max} = \sigma_{O1}^{\max} \frac{h_1}{h_2}. \quad (3)$$

Отсутствие термических трещин на межслойной границе композиционного материала должно обеспечиваться условием равенства деформаций [6]. Деформация в слое 1 от термического охлаждения $\varepsilon = \alpha \Delta T$ направлена в противоположную сторону по отношению к остаточной деформации от термически остаточных напряжений, а в слое 2 эти деформации складываются. Отсюда с учетом выражений (1) и (2) имеем:

$$\alpha_1 \Delta T - \frac{\sigma_{O1}^{\max} (1 - \mu_1)}{E_1} = \alpha_2 \Delta T + \frac{\sigma_{O2}^{\max}}{E_2 (1 - \mu_2)}. \quad (4)$$

Для рассматриваемого случая ($\alpha_1 > \alpha_2$) большую опасность с точки зрения появления межслойных трещин в композиционном материале представляет максимальное растягивающее напряжение в слое 1. Его величина определится из (4) и (3) следующим образом:

$$\sigma_{01}^{\max} = \frac{\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1}{E_2(1 - \mu_2)} \frac{h_1}{h_2}}. \quad (5)$$

Обозначим далее предел прочности на растяжение материала слоя 1 через σ_{b1} , а через $k > 1$ – коэффициент запаса, учитывающий отклонение фактических физико-механических характеристик материалов слоев расчетных ($k_{\min} \approx 1,5$). Тогда условие трещиностойкости двухслойного композиционного материала (см. рис.1), остывшего на разницу температур ΔT и пока не нагруженного рабочими тепловыми и силовыми нагрузками, принимает следующий вид:

$$\frac{\sigma_{b1}}{k} \geq \frac{\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1}{E_2(1 - \mu_2)} \frac{h_1}{h_2}}. \quad (6)$$

Важно отметить, что условие (6) позволяет перейти к первому этапу проектирования слоистых композиционных материалов и композиционных материалов с покрытиями, связанных с обеспечением их сплошности при изготовлении. Для этого выразим из (6) отношение толщин слоев:

$$\frac{h_1}{h_2} \geq \left[E_1 \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2) k - (1 - \mu_1) \sigma_{b1} \right] \frac{E_2 (1 - \mu_2)}{E_1 \sigma_{b1}}. \quad (7)$$

Неравенство (7) задает границу для отношения толщин слоев в двухслойном композиционном материале, после перехода через которую в шве будут возникать межслойные термические трещины.

В случае, когда $\alpha_1 < \alpha_2$, для него аналогичным путем было получено следующее условие трещиностойкости:

$$\frac{h_1}{h_2} \leq \frac{\sigma_{b2} E_2}{\left[\Delta T (\alpha_2 - \alpha_1) k E_2 - (1 - \mu_2) \sigma_{b2} \right] E_1 (1 - \mu_1)}, \quad (8)$$

где σ_{b2} – предел прочности материала слоя 2.

При выводе неравенства (8) учитывалось то, что после охлаждения слой 1 будет сжат, а слой 2 – растянут.

2. ОТСЛАИВАНИЕ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ

На основе изложенного рассмотрим проблему отслаивания покрытий применительно к технологиям пайки и наплавки. Выражения (7) и (8) задают условия отсутствия отслаивания покрытия от подложки при отсутствии внешних нагрузок на композиционный материал. На рис. 2 представлен пример расчета границ трещиностойкости по (9) и (10) для двухслойного композиционного материала, состоящего из Стали 60 ($\sigma_b = 1500$ МПа; $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$; $\mu = 0,3$; $E = 218500$ МПа) и вольфрамкобальтового твердого сплава ВК8 ($\sigma_b = 1590$ МПа; $\alpha = 5,1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$; $\mu = 0,23$; $E = 598400$ МПа). Из него следует, что отношение толщин слоев существенно зависит от рабочей температуры изготовления композиционного материала. Термические трещины будут полностью отсутствовать при нагреве не выше $500^\circ C$, что соответствует, например, условиям низкотемпературной пайки мягкими припоями. При большей температуре процесса (пайка твердыми припоями, совместное спекание порошков, наплавка и др.) необходимо обязательно учитывать соотношение толщин слоев композиционного материала. Как следует из рис. 2, при $\alpha_1 > \alpha_2$ (покрытие сталью твердосплавной подложки) с увеличением рабочей температуры толщина верхнего слоя КМ должна возрастать прямо пропорционально, а при $\alpha_1 < \alpha_2$ (покрытие стали твердым сплавом) – уменьшаться по гиперболической зависимости.

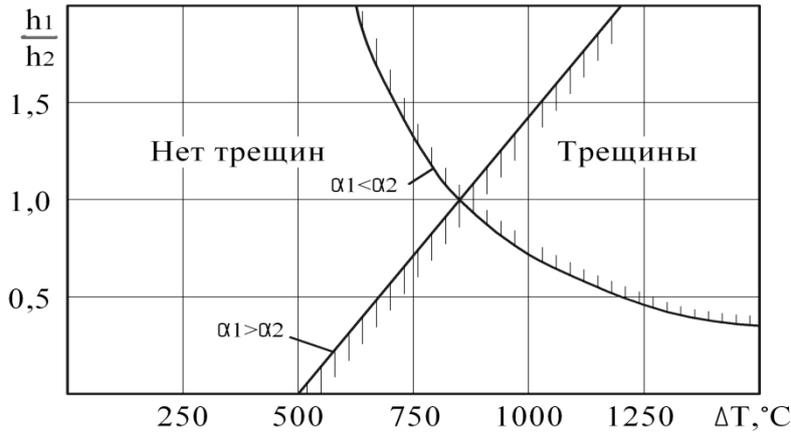


Рис. 2. Границы трещиностойкости для двухслойного композиционного материала

Таким образом, композиционные материалы с покрытиями могут до начала их эксплуатации иметь внутри своей структуры термические остаточные напряжения, величина которых зависит от рабочей температуры изготовления композиционного материала и от разницы в значениях коэффициента термического линейного расширения материалов слоев. Этот факт необходимо учитывать при проектировании изделий с покрытиями, так как эксплуатационные напряжения, алгебраически складываясь с термически остаточными напряжениями могут привести либо к отслаиванию покрытия, либо, наоборот, к повышению прочности его сцепления с подложкой.

Следует заметить, что после охлаждения двухслойного композиционного материала как в первом, так и во втором случае в стальном слое будут образовываться ТОН растяжения, а в слое твердого сплава – ТОН сжатия, то есть мы имеем предварительно напряженный композиционный материал.

До сих пор рассматривались слоистые композиты, в которых покрытие и подложка выполнены из одного и того же материала. Если при этом условия (7) и (8) дают неприемлемые для функционирования КМ значения отношения толщин, можно достичь цели проектирования путем введения между ними промежуточного слоя, состоящего из смеси исходных слоев (двухслойного покрытия). Наиболее просто можно изготовить такого рода КМ методами порошковой металлургии. Согласно правилу смесей [7], физико-механические характеристики промежуточного слоя определяются следующим образом:

- предел прочности

$$\sigma_{bc} = \sigma_{b1}v_1 + \sigma_{b2}v_2 = \sigma_{b2} - v_1(\sigma_{b2} - \sigma_{b1});$$

- коэффициент линейного расширения

$$\alpha_c = \alpha_1v_1 + \alpha_2v_2 = \alpha_2 - v_1(\alpha_2 - \alpha_1);$$

- коэффициент Пуассона

$$\mu_c = \mu_1v_1 + \mu_2v_2 = \mu_2 - v_1(\mu_2 - \mu_1);$$

- модуль упругости

$$E_c = E_1v_1 + E_2v_2 = E_2 + v_1(E_1 - E_2),$$

где $v_1 = V_1/V_c$ - объемная доля материала 1 в смеси;

$v_2 = V_2/V_c$ - объемная доля материала 2 в смеси, причем $v_1 + v_2 = 1$.

Подставим эти значения в критерий трещиностойкости (7). Тогда условие отсутствия холодных термических трещин между верхним слоем покрытия и смесью примет вид:

$$\frac{h_1}{h_c} \geq [E_1\Delta T(\alpha_1 - \alpha_c)k - (1 - \mu_1)\sigma_{b1}] \frac{E_c(1 - \mu_c)}{E_1\sigma_{bc}}. \quad (9)$$

То же самое, между смесью и материалом подложки:

$$\frac{h_c}{h_2} = [E_c\Delta T(\alpha_c - \alpha_2)k - (1 - \mu_c)\sigma_{bc}] \frac{E_2(1 - \mu_2)}{E_c\sigma_{bc}} \quad (10)$$

В случае изготовления градиентной композиции по схеме $\alpha_1 \prec \alpha_c \prec \alpha_2$ имеем аналогичные условия обеспечения трещиностойкости, полученные на основе выражения (8):

$$\frac{h_1}{h_c} \leq \frac{\sigma_{bc} E_c}{[\Delta T(\alpha_c - \alpha_1) k E_c - (1 - \mu_c) \sigma_{bc}] E_1 (1 - \mu_1)}; \quad (11)$$

$$\frac{h_c}{h_2} \leq \frac{\sigma_{b2} E_2}{[\Delta T(\alpha_2 - \alpha_c) k E_2 - (1 - \mu_2) \sigma_{b2}] E_c (1 - \mu_c)}. \quad (12)$$

Таким образом, варьируя объемными долями смежных материалов в смеси, с помощью выражений (9) – (12) можно добиться монолитности градиентного КМ с промежуточными слоями многослойного покрытия.

3. ОТСЛАИВАНИЕ ПРИ РАБОЧИХ НАГРУЗКАХ

Если изделие с покрытием работает в условиях термических рабочих нагрузок, подбор соотношения толщин покрытия и подложки можно проводить на основе формул (7) и (8), в которых ΔT представляет собой разницу между температурой синтеза покрытия и рабочей температурой. В случае силовой нагрузки покрытия, например, силами трения, необходимо решать задачи сопротивления материалов в зависимости от схемы нагружения.

Рассмотрим двухслойный композит прямоугольного сечения шириной b , синтезированный при разнице температур $\Delta T = T_H - T_O$ и нагруженный как растягивающей силой P , так и ТОН. Верхний материал толщиной h_1 имеет КЛР α_1 , модуль упругости E_1 и коэффициент Пуассона μ_1 , а нижний материал толщиной $h_2 - \alpha_2$, E_2 и μ_2 , причем $\alpha_1 \prec \alpha_2$. В результате действия силы P в брус возникнут напряжения растяжения

$$\sigma_p = \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b} \quad (13)$$

Для нашего случая формула (7) позволяет рассчитать максимальную величину ТОН на верхней границе нижнего слоя, а формула (8) – на нижней границе верхнего слоя двухслойного композита. Если к этим остаточным напряжениям добавить рабочие растягивающие нагрузки согласно (13), то суммарные напряжения на границе раздела слоев будут равны:

$$\text{для слоя 1} - \sigma_{\Sigma 1} = \frac{\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2)}{1 - \mu_2} \cdot \frac{h_1}{E_2} + \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b}; \quad (14)$$

$$\text{для слоя 2} - \sigma_{\Sigma 2} = \frac{\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{1 - \mu_2} \cdot \frac{h_2}{E_1(1 - \mu_1)} + \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b}. \quad (15)$$

В формуле (14) первое слагаемое будет отрицательным ($\alpha_1 \prec \alpha_2$), в (15) – положительным. Таким образом, сжимающие ТОН в покрытии при силовой нагрузке будут компенсироваться напряжениями растяжения от внешней силы. Наоборот, в слое 2 (подложке) эти напряжения будут складываться, что вероятнее всего приведет к возникновению трещины на границе раздела слоев. Тогда условие трещиностойкости двухслойного КМ с покрытием, остывшего на разницу температур ΔT и нагруженного растягивающей силой P , примет следующий вид:

$$\frac{\sigma_{b2}}{k} \geq \frac{\Delta T(\alpha_2 - \alpha_1)}{1 - \mu_2} \cdot \frac{h_2}{E_1(1 - \mu_1)} + \frac{P}{(h_1 + h_2) \cdot b}. \quad (16)$$

В случае сжатия композиционного материала с покрытием критическим становится выражение (14), на основе которого можно вывести условие трещиностойкости, аналогичное неравенству (16).

ВЫВОДЫ

1. При проектировании изделий с износостойкими покрытиями необходимо учитывать вероятность появления отслаивания покрытия, причиной которого являются термические остаточные напряжения, возникающие между покрытием и подложкой при технологическом нагреве при нанесении покрытия и последующим охлаждением полученного композита.
2. Для покрытий, имеющих четкую границу раздела с изделием, термические остаточные напряжения зависят от физико-механических характеристик материалов покрытия и подложки (коэффициент линейного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределов прочности), температуры нагрева изделия при синтезе покрытия и соотношения толщин материалов.
3. Полученные условия отсутствия трещин позволяют на стадии проектирования композиционных материалов с покрытием согласовать толщину покрытия и технологию его нанесения.
4. Решена задача расчета трещиностойкости слоистых композиционных материалов при нагружении их тепловыми и силовыми рабочими нагрузками, решение которой зависит от вида нагружения изделия с покрытием (растяжение, сжатие, изгиб и т.п.).

Литература.

1. Л.Н. Тялина, Новые композиционные материалы: учебное пособие / Л.Н. Тялина, А.М. Минаев, В.А. Пручкин. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 80с.
2. В.М. Бузник, Металлополимерные композиты (получение, свойства, применение)/ В.М. Бузник, В.М. Фомин, А.П. Алхимов и др.– Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. – 260 с.
3. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. - М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
4. Петрушин С. И., Сапрыкин А. А., Дуреев В. В. Проектирование и производство изделий из инструментальных композиционных материалов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 205 с.
5. Petrushin S. I. Calculation of residual stresses in multilayer composite materials. // Applied Mechanics and Materials. vol. 379 (2013). pp. 95-100.
6. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 1, Кн. 2. Инженерные расчеты в машиностроении. – М.: Машгиз, 1948. – 457 с.
7. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.П. Родзевич, к.ф.-м.н., доц., Л.В. Кузьмина, д.ф.-м.н., проф., Е.Г. Газенаур*, к.ф.-м.н., доц., В.И. Крашенинин*, д.ф.-м.н., проф.*

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451)77761*

**Кемеровский государственный университет
650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел. (3842)580605
E-mail: nimez@tpu.ru, specproc@kemsu.ru**

В последние годы не ослабевает интерес к проблемам управления физико-химическими свойствами материалов посредством различных обработок, оказывающих воздействие на их дефектную структуру. Что касается полупроводниковых и энергетических материалов, то это связано с возможностью интенсификации химических процессов, а также улучшения некоторых эксплуатационных свойств – например стабильности и реакционной способности. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния комплексного воздействия механического напряжения и электромагнитного поля на дефектную структуру энергетических материалов.

В качестве объекта исследования выбран типичный представитель энергетических материалов – азид серебра, который является модельным объектом в химии твердого тела. В азиде серебра достаточно хорошо изучена дефектная структура. Азид серебра дефектен по Френкелю с преимущественно подвижными междоузельными катионами серебра (Ag^+). Поверхность кристаллов азид серебра заряжена положительно, а приповерхностная область обогащена отрицательно заряженными катионными вакансиями (V_k^-). Известен качественный и количественный состав примесей положи-