

Расчет напряженно-деформированного состояния двухслойного металлополимерного композита

К. Ю. ЗЕРЩИКОВ, канд. техн. наук
ООО "Константа-2", г. Волгоград, Россия

А. С. КРАЕВ

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

Разработан метод расчета остаточных напряжений и деформаций в двухслойных металлополимерных композитах. Согласованность расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод об основных факторах, определяющих напряженно-деформированное состояние композитов. Это различие теплофизических характеристик компонентов. Приведенная модель позволяет использовать ее в дальнейшем для составления конечно-элементных расчетов в 3D-моделировании для прогнозирования поведения полимерных покрытий на металлических подложках.

Ключевые слова: остаточные напряжения и деформации, металлополимерные композиты, антикоррозионные и антифрикционные покрытия, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэфирэфиркетон.

Растущие требования к эксплуатационным характеристикам оборудования, используемого при бурении, добыче и переработке полезных ископаемых, сжижении газа, обуславливают применение полимерных материалов и композиций на их основе, обладающих лучшими по сравнению с металлами и сплавами свойствами. Широко распространена технология нанесения на металл покрытий на основе термопластичных полимеров, таких, как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полифениленсульфид (ПФС), сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Использование этой технологии позволяет получать слоистые металлополимерные композиты, к преимуществам которых относятся высокие значения коррозионной стойкости и антифрикционных свойств в сочетании с жестким недеформируемым металлическим каркасом, невысокий расход полимерного материала и, следовательно, невысокая стоимость данного технического решения.

Поскольку процесс формирования слоистого металлополимерного композита определяется кинетикой возникновения адгезионных связей на границе раздела компонентов, их прочность и устойчивость являются основными факторами, определяющими работоспособность композиционных материалов (КМ) и конструкций из них [1, 2].

Кроме того, из-за различия теплофизических характеристик компонентов процесс образования композита сопровождается возникновением внутренних напряжений, которые являются остаточными, поскольку сохраняются и после изготовления композита. В работах [3—5] показано, что внутренние остаточные напряжения образуются в полимерных покрытиях за счет усадки, возникающей вследствие испарения растворителя, протекания химических реакций отверждения, процессов физического структурообразования, различия коэффициентов линейного теплового расширения (КЛТР). Величина и распределение остаточных напряжений являются важными показателями, определяющими работоспособность слоистого КМ, поэтому исследование остаточных напряжений и возможность их регулирования важны для прогнозирования долговечности и эксплуатационных характеристик композитов.

Слоистые металлополимерные композиты изготавливали посредством напыления или напрессовки полимерного слоя на предварительно подготовленную металлическую пластину в оптимальных для каждого сочетания компонентов режимах в целях получения адгезионного соединения с максимально возможной прочностью. Свойства материалов, использованных при изготовлении композитов, приведены в таблице. Выбор композитных систем для изучения диктовался соображениями не только теоретического, но и в основном практического характера в силу востребованности данных систем покрытий в промышленности.

Зершиков Константин Юрьевич, генеральный директор.

E-mail: om@constanta-2.ru

Краев Александр Семенович, доцент.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2018 г.

© Зершиков К. Ю., Краев А. С., 2019

Механические и теплофизические свойства материалов, принятые при расчетах

Материал	Модуль упругости E , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Коэффициент линейного теплового расширения L , 10^{-5} град $^{-1}$	Температура плавления $T_{\text{плав}}$, °С	Относительное удлинение ϵ , %	Коэффициент Пуассона μ
СВМПЭ	700	20	20	140	350—450	0,46
Фторопласт Ф-4Д	300	10	20	327	250—330	0,4
ПЭЭК	4000	100	5	343	10—35	
Сталь 3	200000	130	1,2	—	50	0,25
Алюминий Д-16	70000	330	2,3	—	18	0,31
Медь	120000	70	1,65	—	40—50	0,17

Изучение процесса формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в пластинах из двухслойных металлополимерных композитов начнем с рассмотрения линейного напряженного состояния, подчиняющегося условию $a > 5b$, где a — длина, b — ширина исследуемой пластины.

При охлаждении от температуры формирования до нормальной температуры в слоистой пластине за счет разницы КЛТР полимера и металла возникнут внутренние напряжения, которые вызовут ее изгиб (рис. 1): полимерная полоса 1, имеющая больший коэффициент L_1 , будет изгибаться и растягиваться, а металлическая полоса 2 с коэффициентом $L_2 < L_1$ будет изгибаться и сжиматься.

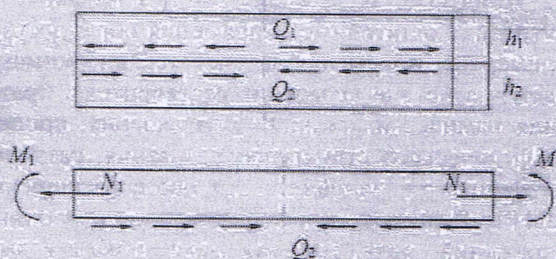


Рис. 1. Схема для расчета параметров напряженно-деформированного состояния пластины из двухслойного металлополимерного композита

В композите формируется НДС, описываемое следующими параметрами: радиусом изгиба R , величинами максимальных (σ_{\max}) и минимальных (σ_{\min}) остаточных напряжений и картиной их распределения по слоям. При условии, что полимерные и металлические слои жестко связаны за счет сил адгезионного взаимодействия и отсутствует проскальзывание, между полимером и металлом формируется прочное, недеформируемое соединение. Предполагается, что теплофизические и механические характеристики материалов сохраняются неизменными, материалы являются твердыми телами с кривыми деформирования упругопластического типа. Поскольку модуль упругости полимера E_1 значительно ниже модуля

упругости металла E_2 , изгибную жесткость полимера можно не учитывать при соотношении толщин полимерного и металлического слоев h_1/h_2 , соответствующем условию $E_1 J_1 < E_2 J_2$, где J_1 и J_2 — осевые моменты инерции полос. В этом случае, пользуясь методом сечений, заменим действие полимерной полосы на металлическую сдвигающим усилием Q_1 и рассмотрим равновесие металлической полосы, приведя сдвигающее усилие Q_2 к центру тяжести сечения подложки. Рассматривая условие равновесия системы, получаем зависимости, связывающие параметры линейного НДС с геометрическими, теплофизическими и физико-механическими характеристиками компонентов, входящих в композит:

$$\frac{Q_1 h_2}{2} = \frac{N h_2}{2} = M_2;$$

$$\frac{h_1}{2R} + L_1 \Delta T + \frac{N}{E_1 h_1 b} = L_2 \Delta T - \frac{N}{E_2 h_2 b} - \frac{h_2}{2R},$$

$$R = \frac{E_2 h_2^3}{6 E_1 h_1 (L_1 - L_2) \Delta T};$$

$$\sigma_{\max 1} = \Delta L \Delta T E_1 + \frac{E_1 h_1}{2R};$$

$$\sigma_{\min 1} = \Delta L \Delta T E_1 - \frac{E_1 h_1}{2R};$$

$$\sigma_{\max 2} = \frac{-\Delta L \Delta T E_1 h_1}{h_2} + \frac{E_2 h_2}{2R};$$

$$\sigma_{\min 2} = \frac{-\Delta L \Delta T E_1 h_1}{h_2} - \frac{E_2 h_2}{2R}.$$

где Q — сдвигающее усилие, действующее в слоях;

ΔT — разница между температурой формирования соединения и нормальной температурой.

Для оценки достоверности предложенной расчетной модели исследуем влияние на НДС двух-

слойных металлополимерных композитов их состава, физико-механических характеристик компонентов и основных конструктивно-технологических факторов.

На рис. 2 представлена расчетная и экспериментальная температурная зависимость радиуса изгиба двухслойной полосы медь—СВМПЭ. Как видно из рис. 2, при температуре выше температуры плавления СВМПЭ наблюдается несогласованность расчетных и экспериментальных значений. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для композитов на основе различных полимеров показало, что при формировании композитов, включающих аморфно-кристаллические полимеры, необходимо принимать $\Delta T = T_{\text{плав}} - T_{\text{нор}}$. Полученные экспериментальные данные позволяют сформулировать критерий выбора температуры в расчетных формулах. Это температура, ниже которой релаксационные процессы в полимерном материале резко замедляются, т. е. ниже которой подвижность структурных элементов макромолекул резко снижается. Для кристаллизующихся полимеров это температура плавления $T_{\text{плав}}$, для аморфных — температура текучести $T_{\text{тек}}$, для отверждаемых — температура отверждения $T_{\text{от}}$.

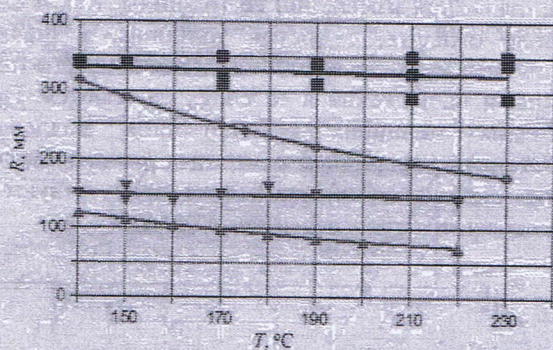


Рис. 2. Зависимость радиуса изгиба пластины из металлополимерного композита медь—СВМПЭ от температуры формирования соединения:

▲, ▼ — толщина медной подложки 0,5 мм; ■, + — толщина медной подложки 0,8 мм; ▼, ■ — экспериментальные данные; ▲, + — расчет

Подтверждением высказанных предположений является представленная на рис. 3 температурная зависимость радиуса изгиба сформированной двухслойной пластины медь—СВМПЭ. Как и следовало ожидать, при температуре, близкой к температуре плавления СВМПЭ, полоса распрямляется, т. е. радиус изгиба стремится к бесконечности. Скорректировав на основании полученных данных расчетную модель, проверим влияние геометрических и физических параметров композитов на их остаточную деформацию, описываемую радиусом изгиба R .

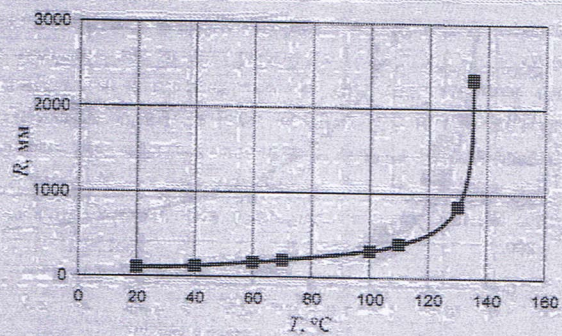


Рис. 3. Температурная зависимость радиуса изгиба пластины из металлополимерного композита медь—СВМПЭ ($h_1 = 0,8$ мм; $h_2 = 4,6$ мм)

Для проверки достоверности предложенной модели исследуем влияние свойств и толщины подложки и покрытия на радиус изгиба полос. Выбор радиуса изгиба в качестве критерия оценки НДС объясняется простотой обработки данных эксперимента, однако некоторого разброса экспериментальных данных не удастся избежать в силу сложности воспроизведения строго одинаковых условий эксперимента. На рис. 4 показана расчетная и экспериментальная зависимость радиуса изгиба пластин различных металлополимерных композитов от толщины полимерного покрытия и металлической подложки.

Как и предсказывалось в рамках теоретической модели, радиус изгиба снижается с ростом толщины полимерного покрытия и увеличивается при увеличении толщины металлической подложки. Хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений подтверждает правильность положений, заложенных в основу теоретической модели.

В рамках проведенных исследований показано также, что радиус изгиба пластин из металлополимерных композитов со слабой адгезией, т. е. в условиях проскальзывания слоев, значительно выше расчетного. Этот факт является подтверждением ранее установленного положения о возможности регулирования НДС в композитах за счет воздействия на прочность связи в соединении [6]. Таким образом, рост адгезионной прочности в металлополимерной системе может приводить к росту остаточных напряжений до достижения ими максимальных величин, определяемых свойствами компонентов, конструктивными и технологическими факторами. Но возрастание их, в свою очередь, ограничено деформационно-прочностными характеристиками компонентов и величиной исходной адгезионной прочности. Отсюда вытекает, что рост адгезионной прочности приводит к возрастанию остаточных напряжений лишь в случае, если имеющийся уровень прочности соединения обеспечивает достижение их максимальной величины.

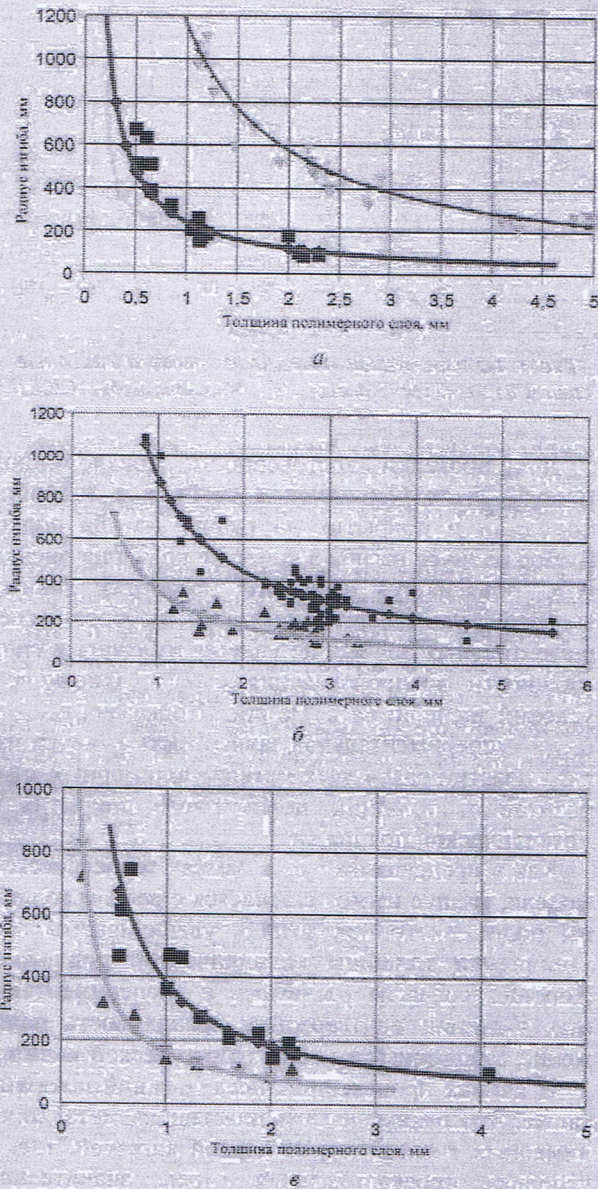


Рис. 4. Зависимость радиуса изгиба пластин из двухслойных металлополимерных композитов от толщины полимерного покрытия и металлической подложки:
 а — Д-16 + СВМПЭ: ▲, ■ — расчетные и экспериментальные данные при толщине алюминиевой подложки 1,1 мм; ♦, ■ — то же при толщине алюминиевой подложки 0,5 мм;
 б — медь + СВМПЭ: ▲, ■ — расчетные и экспериментальные данные при толщине медной подложки 0,5 мм; ♦, ■ — то же при толщине медной подложки 0,8 мм;
 в — Ф-4Д + Ст3: ♦, ■ — расчетные и экспериментальные данные при толщине стальной подложки 0,5 мм; ПЭЭК + Ст3: ♦, ▲ — расчетные и экспериментальные данные при толщине стальной подложки 0,5 мм

Полученные данные позволяют рассчитать напряжения, формирующиеся в слоях в процессе создания покрытия на металлической подложке. На рис. 5 схематично изображено распределение напряжений в слоях металлополимерного композита медь + СВМПЭ при наличии изгиба полосы.

Как видно, в полимерном покрытии действуют растягивающие напряжения, а в металлической подложке — напряжения переменного знака. Сравнивая полученные результаты с данными табл. 1, видим, что напряжения в полимерном и металлическом слоях не превосходят пределов текучести. Следовательно, работоспособность металлополимерного композита в данном сочетании обеспечена.

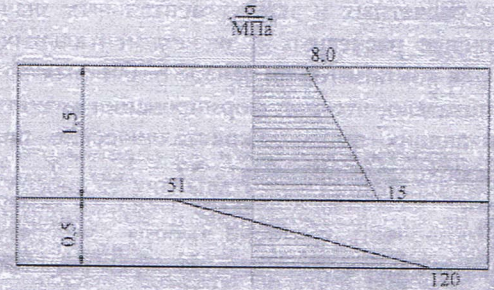


Рис. 5. Распределение напряжений в полимерном и металлическом слоях металлополимерного композита при изгибе пластины металлополимерного композита

На рис. 6 представлены результаты расчета по приведенным формулам остаточных напряжений в слоях полимерного покрытия и металлической подложки при изменении ее толщины. Как и следовало ожидать, с ростом толщины, а значит, жесткости металлической подложки кривизна пластины и напряжения в ее слоях снижаются. При больших толщинах металлической подложки остаточная деформация композита равна нулю, но напряжения в полимерном слое присутствуют и определяются произведением $\Delta T \Delta L E_1$.

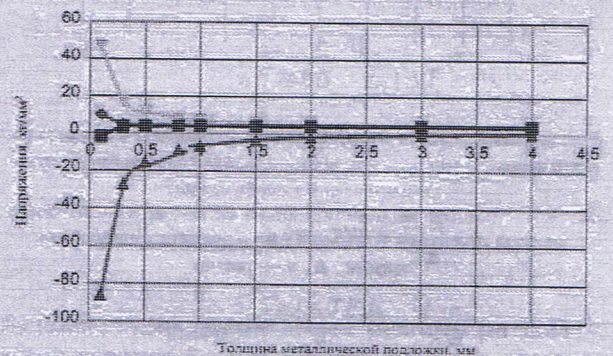


Рис. 6. Зависимость остаточных напряжений в пластине из металлополимерного композита медь + СВМПЭ от толщины металлической подложки:
 ■ — σ_{1max} ; □ — σ_{1min} ; ▲ — σ_{2max} ; ▼ — σ_{2min}

Таким образом, можно считать доказанным, что остаточные напряжения в двухслойных композитах, состоящих из термопластичного полимера и металлической подложки, формируются за счет различия теплофизических характеристик, в первую очередь КЛТР. Основополагающим усло-

вием является получение прочного адгезионного соединения. Напряжения в пластине из металлополимерных композитов формируются за счет наличия сдвигающих и касательных напряжений между слоями. В этом выводе содержатся важные сведения для практических приложений. Так, известно, что введение в полимеры наполнителей с низкими КЛТР снижает линейное расширение металлополимерного композита и таким образом может способствовать снижению напряжений. Однако их введение, как правило, сопровождается ростом модуля упругости, а значит, может не только не снизить, но и увеличить напряжения в полимере и на границе раздела. Введение пластификаторов в полимеры, как известно, сопровождается снижением их модуля упругости, что и объясняет известный факт снижения уровня напряженного состояния металлополимерных композитов, что приводит к увеличению их рабочих характеристик. Однако при этом необходимо отслеживать, чтобы пластифицирующие добавки обеспечивали достаточный уровень адгезионной прочности в системе металл—полимер.

Определив основные факторы, задающие НДС в линейном приближении, проведем его расчет для плоского напряженного состояния, которое присутствует в фактически существующих системах. Расчетная схема показана на рис. 7.

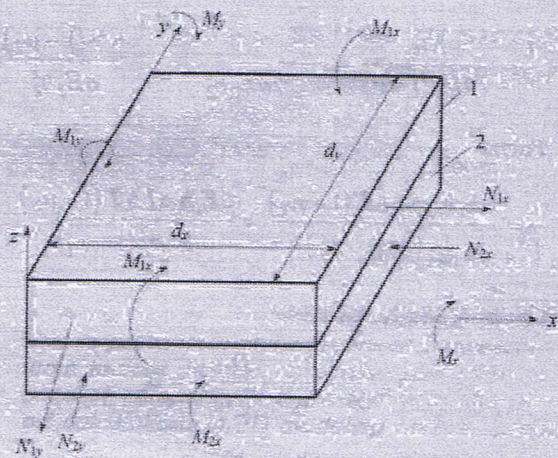


Рис. 7. Схема для расчета параметров плоского напряженно-деформированного состояния пластин из двухслойного металлополимерного композита

По аналогии с предыдущим рассмотрим с учетом сделанных допущений плоское НДС пластин двухслойного металлополимерного композита длиной a , шириной b и толщиной $h_0 = h_1 + h_2$, где h_1 — толщина полимерного слоя, h_2 — толщина металлического. Согласно расчетной схеме, полимерная пластина, имеющая больший КЛТР, чем металлическая пластина (L_1), будет изгибаться и

растягиваться в двух направлениях, x и y , а металлическая пластина, имеющая КЛТР $L_2 < L_1$, будет изгибаться и сжиматься. В промежуточном слое возникнут сдвигающие усилия Q_x и Q_y , которые можно привести к растягивающим (сжимающим) усилиям N_x , N_y и моментам M_x , M_y в каждой из пластин. Уравнения равновесия для данной системы имеют вид

$$\begin{aligned} \Sigma Y = 0, \quad N_{1y} = -N_{2y} = N_y; \\ \Sigma X = 0, \quad N_{1x} = -N_{2x} = N_x; \\ \Sigma M_y = 0, \quad N_x \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) = M_{1y} + M_{2y}; \\ \Sigma M_x = 0, \quad N_y \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) = M_{1x} + M_{2x}. \end{aligned} \quad (1)$$

Поскольку $E_1 \ll E_2$, то при небольших h_1 имеем $E_1 J_1 \ll E_2 J_2$. Следовательно, $M_1 = 0$ и можно принять, что усилие N_1 будет действовать по границе раздела слоев. Тогда уравнения (1) примут вид

$$N_x \frac{h_2}{2} = M_{2y}; \quad N_y \frac{h_2}{2} = M_{2x}. \quad (2)$$

Преобразуем уравнения равновесия, исходя из теории изгиба пластин. Известно, что по закону Гука напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E_z}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{r_x} + \mu \frac{1}{r_y} \right); \\ \sigma_y &= \frac{E_z}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{r_y} + \mu \frac{1}{r_x} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Составляя уравнения моментов, имеем

$$\begin{aligned} \int_0^b dy \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dy dz = M_{1y} dy; \\ \int_0^a dx \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dx dz = M_{1x} dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя уравнение (3) в (4) и интегрируя, имеем

$$Db \left(\frac{1}{r_x} + \mu \frac{1}{r_y} \right) = M_y; \quad Da \left(\frac{1}{r_y} + \mu \frac{1}{r_x} \right) = M_x,$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость пластин.

Поскольку $D_1 = 0$, $M_{1y} = 0$, $M_{1x} = 0$, уравнения (2) примут вид

$$N_x \frac{h_2}{2} = D_2 b \left(\frac{1}{r_x} + \mu_2 \frac{1}{r_y} \right);$$

$$N_y \frac{h_2}{2} = D_2 a \left(\frac{1}{r_y} + \mu_2 \frac{1}{r_x} \right).$$

Составим уравнения совместности деформаций слоя:

по оси x имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0x1} &= \frac{1}{E_1} (\sigma_{x1} - \mu_1 \sigma_{y1}) + L_1 \Delta T = \\ &= -\frac{1}{E_2} (\sigma_{x2} - \mu_2 \sigma_{y2}) + L_2 \Delta T. \end{aligned}$$

где $\sigma_{x1} = \frac{N_x}{hb}$; $\sigma_{y1} = \frac{N_y}{ha}$; $\sigma_{x2} = \frac{N_x}{h_2 b} + \frac{h_2 E_2}{2r_x}$;

$$\sigma_{y2} = \frac{N_y}{h_2 a} + \frac{h_2 E_2}{2r_y};$$

по оси y имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0y1} &= \frac{1}{E_1} (\sigma_{y1} - \mu_1 \sigma_{x1}) + L_1 \Delta T = \\ &= -\frac{1}{E_2} (\sigma_{y2} - \mu_2 \sigma_{x2}) + L_2 \Delta T, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\sigma_{y1} = \frac{N_y}{ha}; \quad \sigma_{x1} = \frac{N_x}{hb}; \quad \sigma_{y2} = \frac{N_y}{h_2 a} + \frac{h_2 E_2}{2r_y};$$

$$\sigma_{x2} = \frac{N_x}{h_2 b} + \frac{h_2 E_2}{2r_x}.$$

Итак, имеем два уравнения равновесия и два уравнения совместности деформаций. Учитываем, что $D_1 = 0$, $M_{1y} = 0$, $M_{1x} = 0$.

После преобразования имеем четыре уравнения с четырьмя неизвестными, из которых можно рассчитать величины остаточных деформаций r_x и r_y :

$$\begin{aligned} N_x \frac{h_2}{2b} - \frac{D_2}{r_x} - \frac{D_2 \mu_2}{r_y} &= 0; \\ N_y \frac{h_2}{2a} - \frac{D_2}{r_y} - \frac{D_2 \mu_2}{r_x} &= 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$N_x \left(\frac{1}{E_1 h_1 b} \right) - N_y \left(\frac{\mu_1}{E_1 h_1 a} \right) + \frac{1}{r_x} \frac{h_2}{2} - \frac{1}{r_y} \frac{\mu_2 h_2}{2} = \Delta L \Delta T;$$

$$N_y \left(\frac{1}{E_1 h_1 a} \right) - N_x \left(\frac{\mu_1}{E_1 h_1 b} \right) + \frac{1}{r_y} \frac{h_2}{2} - \frac{1}{r_x} \frac{\mu_2 h_2}{2} = \Delta L \Delta T.$$

Рассмотрим два важных частных случая.

• Пусть $a \gg b$, т. е. рассматривается, как и ранее, полоса.

Из (6) имеем $\frac{-D_2}{r_y} = \frac{D_2 \mu_2}{r_x}$. (7)

Подставляя (7) в уравнение (5), получим

$$\frac{N_x h_2}{2b} = \frac{D_2}{r_x} - \frac{D_2 \mu_2^2}{r_x} = \frac{D_2 (1 - \mu_2^2)}{r_x} = \frac{E_2 h_2^3 (1 - \mu_2^2)}{12 (1 - \mu_2^2) r_x}, \quad (8)$$

или $\frac{N_x h_2}{2} = \frac{b h_2^3 E_2}{12 r_x}$.

Отсюда $\frac{1}{r_x} = \frac{N_x h_2}{6 E_2 J_2}$.

Поскольку $E_2 \gg E_1$, из (8) имеем $N_x = E_1 h_1 b \Delta L \Delta T$ и $\frac{1}{r_x} = \frac{6 E_1 h_1 \Delta L \Delta T}{E_2 h_2^2}$, что соответствует полученному ранее соотношению для радиуса изгиба полосы.

• Пусть $a = b$. Тогда $N_x = N_y = N$, $r_x = r_y = r$.

Из (6) имеем $\frac{N h_2}{2a} = \frac{1}{r} D_2 (1 - \mu_2)$.

откуда

$$\frac{1}{r} = \frac{N h_2}{2a D_2 (1 + \mu)} = \frac{N h_2 \cdot 12 (1 - \mu_2^2)}{2a E_2 h_2^3} = \frac{6 N (1 - \mu_2)}{a E_2 h_2^2}.$$

Тогда

$$\frac{1}{r} = \frac{6 E_1 h_1 a \Delta L \Delta T (1 - \mu_2)}{E_2 h_2^2 a (1 - \mu_1)} = \frac{6 E_1 h_1 \Delta L \Delta T (1 - \mu_2)}{E_2 h_2^2 (1 - \mu_1)}.$$

Окончательно получим

$$N_x \frac{h_2}{2b} - \frac{D_2}{r_x} - \frac{D_2 \mu_2}{r_y} = 0;$$

$$N_y \frac{h_2}{2a} - \frac{D_2}{r_y} - \frac{D_2 \mu_2}{r_x} = 0;$$

$$N_x \frac{1}{E_1 h_1 b} - N_y \frac{\mu_1}{E_1 h_1 a} = \Delta L \Delta T;$$

$$N_y \frac{1}{E_1 h_1 a} - N_x \frac{\mu_1}{E_1 h_1 b} = \Delta L \Delta T.$$

На рис. 8 представлена расчетная зависимость радиуса изгиба плоской квадратной пластины (размера 70×70 мм) металлополимерного компо-

зита от толщины полимерного слоя. Сравнение с результатами экспериментов показало хорошую согласованность расчетных и экспериментальных данных и подтвердило справедливость заложенных в расчетную методику положений.

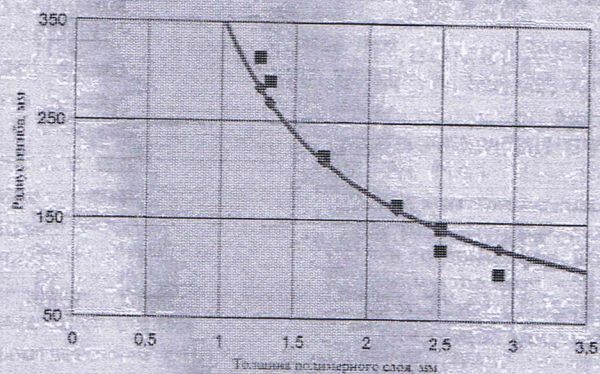


Рис. 8. Зависимость радиуса изгиба квадратной пластинки из металлополимерного композита Ст3 + СВМПЭ от толщины полимерного слоя ($h_2 = 0,5$ мм):
 * — расчетные и экспериментальные данные

Ранее авторы не учитывали изгибную жесткость полимера, поскольку толщина полимерных покрытий, как правило, невелика и выполняется условие $E_1 J_1 < E_2 J_2$. Тем не менее влияние жесткости полимерного слоя нетрудно учесть, введя в

расчетные формулы соответствующие поправки, что может быть важно при расчете НДС при металлизации пластмасс.

Отметим также, что несмотря на то, что в расчетах теплофизические и физико-механические характеристики материалов принимались постоянными, полученное решение позволяет учитывать их изменение под воздействием тех или иных факторов среды или технологического процесса путем введения в расчетные зависимости уточненных значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров В. Б. Полимерные покрытия в атомной технике. — М.: Атомиздат, 1965. — 276 с.
2. Улиханова О. Л., Савин В. А., Титова К. Д., Плещков Л. В. Связь остаточных напряжений в стеклопластике с эффективностью поверхностной обработки стекловолокна замасливателями // Пластмассы. 1989. № 1. С. 83—84.
3. Сухарева Л. А. Долговечность полимерных покрытий. — М.: Химия, 1984. — 240 с.
4. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. — М.: Химия, 1978. — 183 с.
5. Якусевич В. И. Исследование ОН в полимерной матрице композиционных материалов с целью нахождения путей их снижения. Дисс. ... канд. техн. наук. — М., 1976. — 250 с.
6. Поверхности раздела в полимерных композитах / под ред. Плюдемана Э. — М.: Мир, 1978. — 294 с.

The calculation of stress-strain state in double layered metal-polymer composites

K. Yu. ZERSCHIKOV
 Constanta-2 Ltd, Volgograd, Russia

A. S. KRAEV
 Volgograd Technical University, Volgograd, Russia

A method to calculate of residual stresses and strains in double layered metal-polymer composites is presented. The agreement between calculations and experimental data allows to conclude on main factors that define stress-strain state of double layered metal-polymer composites — the difference of component's thermophysical characteristics. The model can be used for finite element method calculations in 3D modeling and the prediction behaviour of polymer coatings on metal substrates.

Keywords: residual stresses and strains, metal-polymer composites, friction and corrosive protective coatings, super-high-molecular polyethylene, polyetheretherketone.