

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОЛОКНИСТОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ

Гришина О.И. *, Шавнев А.А. *, Филиппов Р.А. **, Серпова В.М. *, Золотова Д.И. ***

* ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, г. Москва, Россия

** ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

*** Московский Авиационный Институт, г. Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Представлены результаты теоретической оценки влияния толщины межфазного слоя на остаточные напряжения в металлическом композиционном материале на основе алюминиевого сплава, армированного волокнами оксида алюминия. Для расчетов привлекается модель двухслойного цилиндрического включения в осесимметричной плоской постановке задачи термоупругости. Показана необходимость теоретического или экспериментального определения оптимальной (максимально допустимой) толщины межфазных слоев в композите, что связано с повышением уровня остаточных напряжений в материале, при увеличении толщины межфазного слоя. В то же время, недостаточная толщина межфазных слоев, состоящих в рассматриваемом композите из шпинелей магния и меди, приводит к снижению прочности контакта оксидных волокон и алюминиевой матрицы, и, следовательно, к снижению всего комплекса эксплуатационных характеристик материала.

Ключевые слова: металлический композиционный материал; предел прочности; модуль упругости; алюминиевый сплав; волокна оксида алюминия

ESTIMATION OF RESIDUAL STRESS IN ALUMINIUM FIBER MATRIX COMPOSITE TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF INTERPHASE LAYER

Grishina O.I. *, Shavnev A.A. *, Serpova V.M. *, Filippov R.A. **, Zolotova D.I. ***

* *Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials" State Research Center of the Russian Federation, Moscow, Russia*

** *Institute of Problems of Mechanical Engineering Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

*** *Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia*

SUMMARY

In this paper the result of theoretical assessment of the interface layer thickness impact on residual stresses in composite material based on aluminum alloy, reinforced with aluminum oxide fiber was presented. The model of two-layer cylindrical inclusion of a plane axisymmetric problem of thermoelasticity was used for the calculation. Liability of theoretical or experimental determination of the optimal (maximum) thickness of interfacial layers in the composite was shown, this is related to increased level of residual stresses in the material, while increased the

interfacial layer thickness. At the same time insufficient thickness of interfacial layers, included magnesium spinel and copper, leads to a reduction of oxide fibers and aluminum matrix contact resistance, and consequently, it reduces all operational characteristics of the material.

Key words: metal-matrix composite; yield strength; young's modulus; aluminum alloy; aluminum oxide fibers

ВВЕДЕНИЕ

Современная авиационная техника предъявляет все более высокие требования к конструкционным материалам. К числу наиболее перспективных конструкционных материалов относятся высокопрочные и высокомодульные однонаправленные волокнистые металлические композиционные материалы (МКМ), отличающиеся от обычных сплавов большими значениями временного сопротивления и предела выносливости (на 50-100%), модуля упругости, коэффициента жесткости и пониженной склонностью к трещинообразованию [1,2].

Одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик, решающих вопрос о применении волокнистых композиционных материалов (КМ) в той или иной конструкции, является сопротивление их растяжению, которое зависит, в первую очередь, от прочности и модуля упругости волокна и матрицы [3-6]. Коэффициенты жесткости и податливости волокнистых однонаправленных МКМ определяются свойствами компонентов композиционного материала и его внутренней структурой. Определение макроскопических характеристик материала по известным характеристикам армирующих волокон и матрицы – задача структурной механики композитов или теории армирования. Для решения указанной задачи предложено значительное число методов [7-12].

Прочностные характеристики волокнистых МКМ в существенной мере зависят от макро- (объемная доля, диаметр, тип укладки и дробленность волокон) и микроструктуры (плотность очагов схватывания на границе раздела «волокно-матрица», дефектность переходного слоя от волокна к матрице, толщина межфазного слоя) [8, 13-18]. Для более точной оценки механических свойств композиционного материала требуется прогнозирование зависимости толщины межфазного слоя на границе раздела «волокно-матрица» от технологических параметров изготовления КМ. На примере МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного непрерывными волокнами Al_2O_3 , в настоящей работе будет рассмотрено влияние толщины межфазного слоя на уровень остаточных напряжений, возникающих в образцах материала. В процессе изготовления композитов на волокнах оксида алюминия образуется межфазные слои шпинели ($MgAl_2O_4$ и/или $CuAl_2O_4$, в зависимости от состава матрицы), которые необходимы для обеспечения хорошей передачи нагрузки между матрицей и волокнами композита. Технологически толщина межфазных зон регулируется путем изменения параметров изготовления КМ (времени выдержки, температуры процесса и давлении компактирования). Оптимальные технологические параметры позволяют получить межфазный слой оптимальной толщины, которая обеспечивает передачу нагрузки от матрицы к волокнам, и не приводит к снижению прочности материала из-за образования хрупких фаз, а также развития остаточных (внутренних) напряжений, возникающих в результате различия коэффициентов температурного расширения компонентов КМ и образующегося межфазного слоя [19,20].

1. ПОСТАНОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В рассматриваемом волокнистом МКМ системы Al-Al₂O₃ важным фактором, определяющим прочность, может являться величина остаточных (внутренних) температурных напряжений, которые сохраняются в материале при остывании в процессе изготовления. На основании модельных расчетов можно оценить величину этих напряжений. Для МКМ на основе алюминиевого сплава температура, начиная с которой в КМ образуются остаточные напряжения, ориентировочно, составляет 150°C.

Для определения величины остаточных напряжений в КМ, содержащем цилиндрические слоистые включения (волокна), предлагается решить модельную задачу определения напряженного состояния объема, состоящего из единственного бесконечного слоистого цилиндра в бесконечной матрице под действием термоусадочных напряжений, формирующихся в процессе производства КМ (рис.1). Индексами 1, 2 и 3 обозначаем величины, относящиеся к волокну, межфазному слою и матрице соответственно.

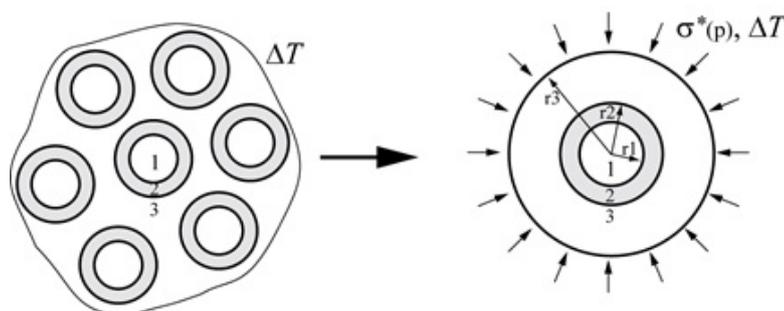


Рис.1. Схема элементарной ячейки МКМ.

Задача решается с использованием линейной теории упругости в предположении малых деформаций и без учета процессов пластической деформации и рекристаллизации [9]. Напряжения определяются законом Гука

$$\sigma_{1,2,3} = C_{1,2,3} : (\epsilon_{1,2,3} - \alpha_{1,2,3} \Delta T E) \quad (1)$$

где $C_{1,2,3}$ – тензор модулей упругости, $\alpha_{1,2,3}$ – коэффициент линейного расширения, $\Delta T = T_0 - T_1$ – разность температур между температурой начала формирования нерелаксирующих термоусадочных напряжений T_0 и температурой, до которой проводится охлаждение образца T_1 , E – единичный тензор второго ранга.

Влияние объемной концентрации цилиндрических слоистых волокон на напряженное состояние друг друга предлагается учитывать с помощью введения дополнительного поля напряжений $\sigma^*(p)$, зависящего от объемного содержания слоистых волокон p и действующего на расстоянии $r_3(p)$, где r_3 вычисляется по формуле

$$r_3 = r_2 \sqrt{\pi / p} \quad (2)$$

Здесь r_2 – радиус многослойного волокна, который равен сумме радиуса волокна и толщины окружающего межфазного слоя. Величина $\sigma^*(p)$ определяется из решения задачи определения остаточных напряжений в системе изолированного

бесконечного слоистого цилиндра в бесконечной матрице и равно напряжениям в бесконечной матрице

$$\sigma^*(p) = \sigma_3^{\infty} \Big|_{r=r_3(p)} \quad (3)$$

при $r = r_3(p)$.

Ввиду осевой симметрии геометрии объекта и системы нагрузок будем использовать цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , а также ввиду большой (теоретически бесконечной) длины цилиндра предполагается следующее: радиальные перемещения точек цилиндра в любом его сечении одинаковы и не зависят от угла, т.е.

$$u_r = u_r(r) \quad (4)$$

тангенциальное перемещение точек цилиндра отсутствует $u_\varphi = 0$. Осевое перемещение всех точек сечения цилиндра одинаково и зависит только от продольной координаты z , $u_z = u_z(z)$ – т.е. в процессе деформирования поперечные сечения цилиндра остаются плоскими [9,13].

Вектор перемещений имеет вид

$$\mathbf{u}(r, z) = u_r(r)\mathbf{e}_r + u_z(z)\mathbf{e}_z \quad (5)$$

где $\mathbf{e}_{r,z}$ – базисные векторы.

Выражения компонентов тензора деформаций будут следующими

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}; \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ \gamma_{r\varphi} = \gamma_{rz} = \gamma_{\varphi z} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

В случае изотропии компонентов КМ тензор модулей упругости имеет следующий вид

$$\mathbf{C}_{1,2,3} = k_{1,2,3}\mathbf{E}\mathbf{E} + 2\mu_{1,2,3}\left(\mathbf{I} - \frac{1}{3}\mathbf{E}\mathbf{E}\right) \quad (7)$$

где $k_{1,2,3}$, $\mu_{1,2,3}$ – модули объемного сжатия и модули сдвига компонентов КМ.

$$k = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

где E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона.

Закон Гука для изотропных фаз можно переписать в следующем виде

$$\sigma = \left(\left(k - \frac{2}{3}\mu \right) tr(\boldsymbol{\varepsilon}) - 3k\alpha\Delta T \right) \mathbf{E} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} \quad (10)$$

где

$$tr(\boldsymbol{\varepsilon}) = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz} \quad (11)$$

– первый инвариант тензора малых деформаций.

Уравнение равновесия без учета массовых сил

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (12)$$

Подставляя в уравнение равновесия (12) выражение для напряжений через закон Гука и компоненты вектора перемещений (5) получим два дифференциальных уравнения для $u_r(r)$ и $u_z(z)$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\partial u_r}{r \partial r} - \frac{u_r}{r^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Решением первого дифференциального уравнения является

$$u_r = a_{1,2,3}r + \frac{b_{1,2,3}}{r^2} \quad (14)$$

а второго

$$u_z = G_{1,2,3}z \quad (15)$$

где $a_{1,2,3}$, $b_{1,2,3}$, $G_{1,2,3}$ – константы, относящиеся к волокну, межфазному слою и матрице КМ. Для определения этих констант воспользуемся граничными условиями:

$u_r|_{r=0} < \infty$ – ограниченность перемещений в центре;

$[u_r]_{r=r_1} = 0$ – непрерывность радиальных перемещений на границе волокна и межфазного слоя;

$[u_r]_{r=r_2} = 0$ – непрерывность радиальных перемещений на границе межфазного слоя и матрицы;

$[\sigma_r]_{r=r_1} = 0$ – непрерывность радиальных напряжений на границе волокна и межфазного слоя;

$[\sigma_r]_{r=r_2} = 0$ – непрерывность радиальных напряжений на границе межфазного слоя и матрицы;

$\sigma_r|_{r=r_3} = \sigma_3^\infty|_{r=r_3(p)}$ – радиальные напряжения при $r = r_3$ равные напряжениям из задачи о бесконечной матрице со слоистым цилиндром;

$[u_r]_{r=r_1, \forall z} = 0$ – непрерывность осевых перемещений на границе волокна и межфазного слоя;

$[u_r]_{r=r_2, \forall z} = 0$ – непрерывность осевых перемещений на границе межфазного слоя и матрицы;

$2\pi \left(\int_0^{r_1} \sigma_{z_1} dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{z_2} dr + \int_{r_2}^{r_3} \sigma_{z_3} dr \right) = 0$ – интегральное условие равновесия для осевых напряжений.

Из условия непрерывности осевых перемещений на границах при любом z следует, что $u_{z_1} = u_{z_2} = u_{z_3} = Gz$, при этом σ_{z_1} , σ_{z_2} , σ_{z_3} – константы по r и z , но $\sigma_{z_1} \neq \sigma_{z_2} \neq \sigma_{z_3}$ из-за наличия температурной деформации.

Для определения $\sigma_3^\infty|_{r=r_3(p)}$ решается задача об изолированном бесконечном слоистом цилиндре в неограниченной матрице при следующих граничных условиях:

$u_r|_{r=0} < \infty$ – ограниченность перемещений в центре системы;
 $[u_r]_{r=r_1} = 0$ – непрерывность радиальных перемещений на границе волокна и межфазного слоя;
 $[u_r]_{r=r_2} = 0$ – непрерывность радиальных перемещений на границе межфазного слоя и матрицы;
 $[\sigma_r^\infty]_{r=r_1} = 0$ – непрерывность радиальных напряжений на границе волокна и межфазного слоя;
 $[\sigma_r^\infty]_{r=r_2} = 0$ – непрерывность радиальных напряжений на границе межфазного слоя и матрицы;
 $\sigma_r|_{r \rightarrow \infty} = 0$ – радиальные напряжения на бесконечности затухают;
 $[u_r]_{r=r_1, \forall z} = 0$ – непрерывность осевых перемещений на границе волокна и межфазного слоя;
 $[u_r]_{r=r_2, \forall z} = 0$ – непрерывность осевых перемещений на границе межфазного слоя и матрицы;
 $\sigma_{z_3}^\infty = 0$ – равенство осевых напряжений в матрице.

Кроме оценки напряженного состояния так же необходимо оценить интенсивность напряжений по Мизесу – σ_i

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}{2}} \quad (16)$$

Для волокнистого МКМ на основе алюминиевой матрицы, армированной волокнами оксида алюминия диаметр волокон составляет 12 мкм ($r_1 = 6$ мкм). Объемное содержание волокон в образцах КМ – 40 и 55 % ($p=0,4 : 0,55$). Толщина межфазного слоя из шпинели $MgAl_2O_4$ составляет 0,2 мкм или 1,5 мкм. Температурой начала формирования нерелаксирующих напряжений принимается $T_1 = 150^\circ C$ (температура отпуска алюминия). Далее проводится равномерное охлаждение всего образца МКМ до температуры $T_0 = 20^\circ C$, $|\Delta T| = 130^\circ C$.

Свойства компонентов композиционного материала, использованные для расчетов, представлены в Табл.1.

Таблица 1.

Свойства алюминиевых матриц и армирующих волокон.

Свойства/Материал			Д16	Al ₂ O ₃	MgAl ₂ O ₄ (межфазный слой из шпинели)
Свойства	Обозначение, единица измерения	T°С			
Модуль упругости	E, ГПа	20	72	380	440(250)
		350	48	380	440
Плотность	ρ , г/см ³	20	2,77	3,9	3,61
Коэффициент Пуассона	ν	20	0,33	0,22	0,3 (0,26)
		350	0,33	0,22	0,3
КТР	α , 1/К*10 ⁻⁶	20	22,9	8	5,9 (8,4)
		350	26,5	8	5,9

Предел текучести/прочности при растяжении	$\sigma_{в}$, МПа	20	400/470	2550	130
		350	10	2250	–
Предел текучести/прочности при сжатии	$\sigma_{всж}$, МПа	20	630/650	3100	590
		350	15	3000	
Предельные деформации, %		20	15	<1	<1
		350		<1	<1

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Ниже представлены графики зависимостей радиальных σ_r (рис.2), окружных σ_ϕ (рис.3) и осевых σ_z (рис.4) напряжений и их интенсивности по Мизесу σ_i (рис.5) от радиуса в области близкой к межфазному слою. Зависимости напряжений построены для двух значений объемной доли волокон: $p=0,4$ (штрихпунктирные линии) и $p=0,5$ (штриховые линии).

На основании проведенных расчетов были сделаны следующие выводы:

1. Все радиальные напряжения – сжимающие, и не влияют на трещиностойкость МКМ;
2. Растягивающие напряжения σ_ϕ и σ_z в матрице ниже предела прочности, но могут способствовать зарождению и росту радиальных трещин;
3. В межфазном слое все напряжения сжимающие и зависят от толщины слоя;
4. С ростом толщины межфазного слоя от 0,2 мкм до 1,5 мкм интенсивность напряжений по Мизесу в межфазном слое увеличивается на 20%;
5. Повышение объемного содержания волокон практически не влияет на величины радиальных и окружных напряжений в межфазном слое и матрице, а также на величину осевых напряжений и интенсивности напряжений по Мизесу в матрице;

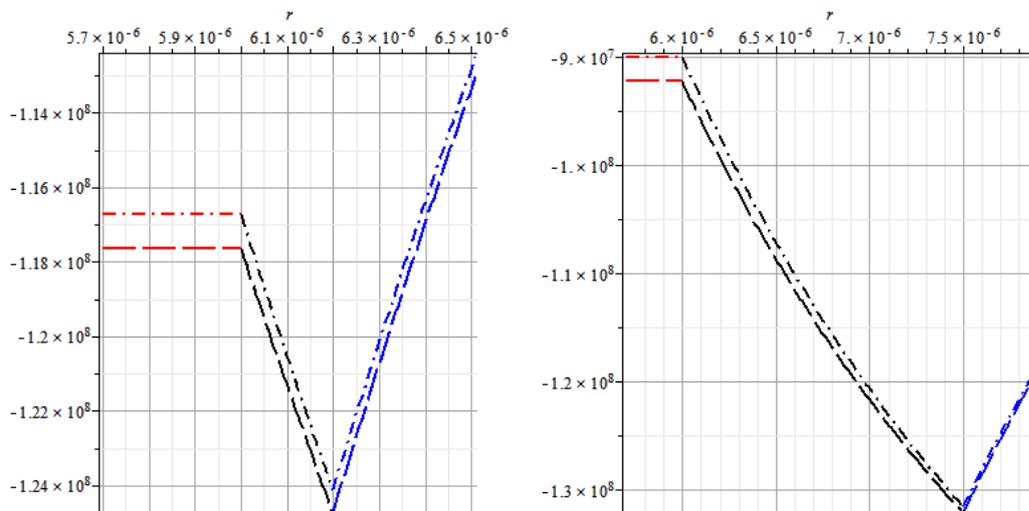


Рис.2. $\sigma_r(r)$ для различных толщин межфазного слоя и объемного содержания волокон в МКМ на основе алюминиевого сплава ($p=0,4$ – штрихпунктирные линии, $p=0,55$ – штриховые линии).

6. Повышение объемного содержания волокон с 40 до 55% снижает по модулю величину осевых напряжений на 20% и интенсивность напряжений по Мизесу на 25% в межфазном слое.

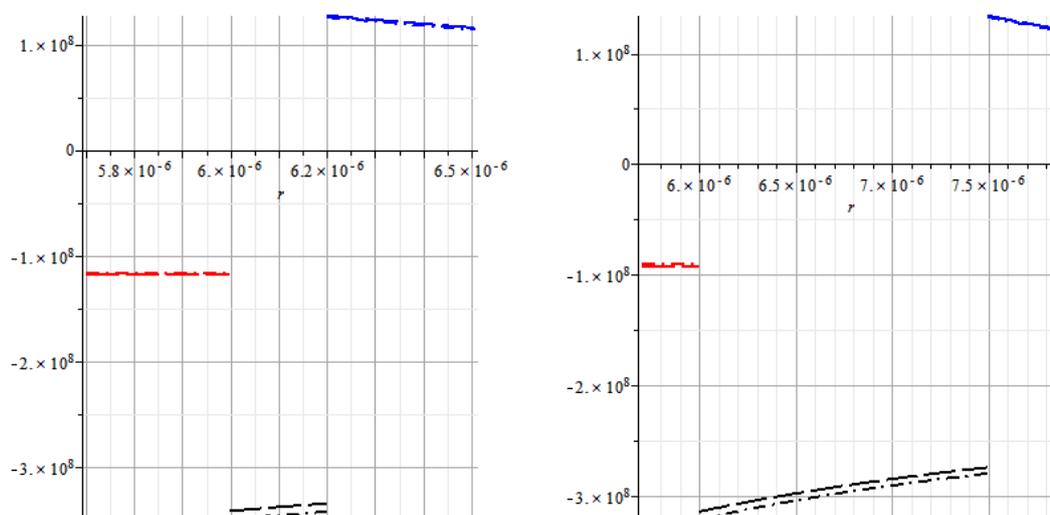


Рис.3. $\sigma_{\varphi}(r)$ для различных толщин межфазного слоя и объемного содержания волокон в МКМ ($p=0,4$ – штрих-пунктирные линии, $p=0,55$ – штриховые линии).

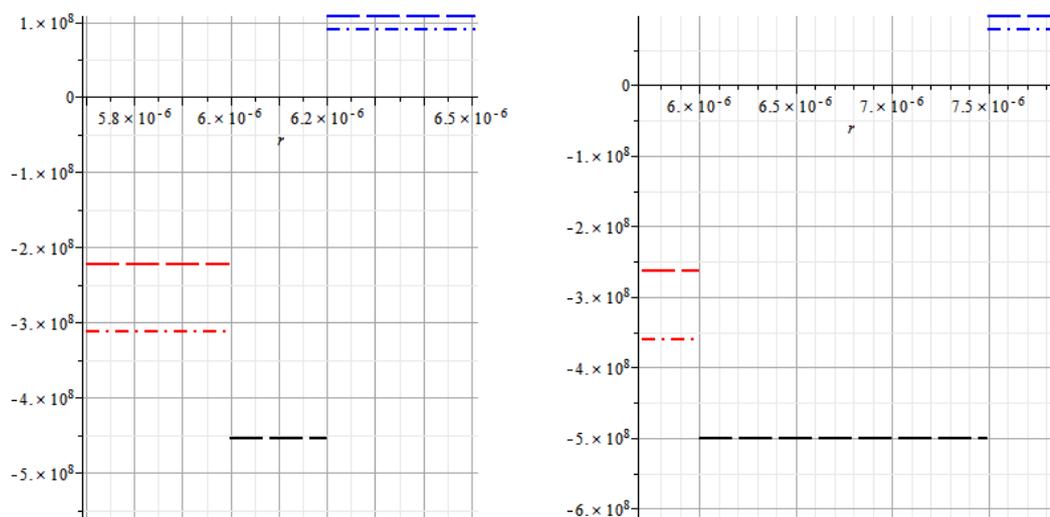


Рис.4. $\sigma_z(r)$ для различных толщин межфазного слоя и объемного содержания волокон в МКМ ($p=0,4$ – штрих-пунктирные линии, $p=0,55$ – штриховые линии).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты теоретического прогноза уровня остаточных напряжений в структуре волокно – межфазный слой – матрица в образцах композиционного материала на основе алюминиевого сплава. В рамках расчетов по модели термоупругости изолированного двухслойного цилиндрического включения показано, что увеличение толщины межфазного слоя

шпинели может значительно влиять на уровень опасных растягивающих остаточных напряжений, действующих в радиальном и осевом направлении в структуре однонаправленного композиционного материала, а также на уровень интенсивности напряжений.

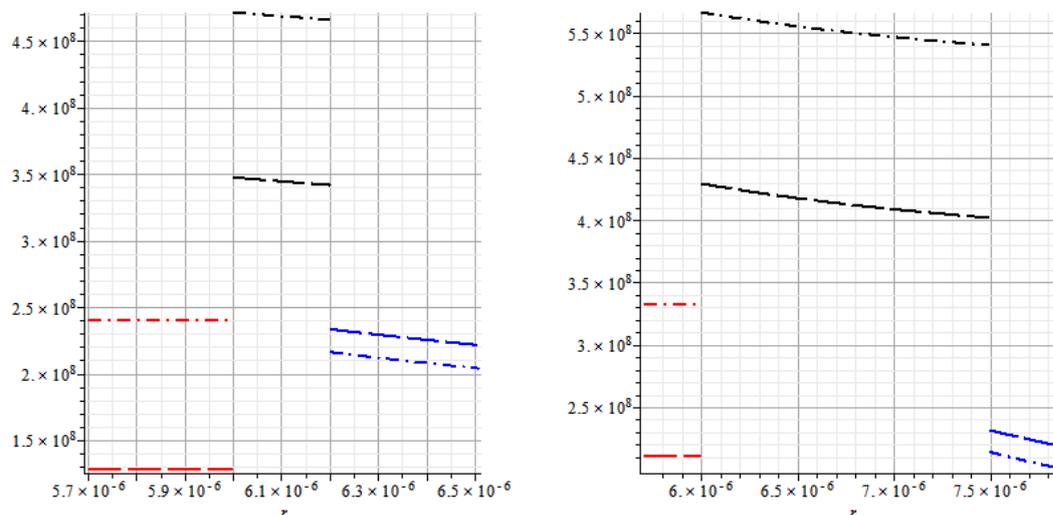


Рис.5. $\sigma_i(r)$ для различных толщин межфазного слоя и объемного содержания волокон в МКМ ($p=0,4$ – штрих-пунктирные линии, $p=0,55$ – штриховые линии).

Задача теоретических исследований заключается в определении предельной толщины межфазного слоя, которая обеспечит наилучшую передачу нагрузки от матрицы к волокнам, но в то же время не будет приводить к разрушению какой-либо фазы в композиционном материале (в фазах композиционного материала напряжения не будут достигать пределов прочности). Проблема заключается в том, что свойства известны достоверно только для материалов матрицы и волокон, но свойства межфазной зоны теоретически могут быть оценены лишь приближенно. В настоящей работе для расчетов были использованы стандартные значения характеристик шпинели на основе магния, и в будущем они требуют уточнения на основе экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С.5-6.
2. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С.6-8.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №5. – С.7-17.
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. – 2012. – №3. – С.10-15.

5. *Каблов Е.Н.* Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. – 2010. – №4. – С.31-33.
6. *Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В.* Эволюция материалов для лопастей вертолетов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С.16-18.
7. *Алюминиевые сплавы* / В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди. – М.: ВИАМ, 2012. – С.143-156.
8. *Кристенсен Л.М.* Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
9. *Черепанов Г.П.* Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1983. – 296 с.
10. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
11. *Власов А.Н.* Усреднение характеристик деформационных свойств структурно неоднородных сред с неидеальными условиями на контактах // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2006. – Т.12. – №2. – С.200-218.
12. *Власов А.Н.* Определение прочностных характеристик структурно-неоднородных сред // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т.13. – №2. – С.209-218.
13. *Мэттьюз Ф., Ролингс Р.* Композиционные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
14. *Басаргин О.В., Щеглова Т.М., Никитина В.Ю., Свистунов В.И.* Способ определения прочности при растяжении монокристаллических волокон Al_2O_3 при температуре $1400^{\circ}C$ // Труды ВИАМ. – 2014. – №4. – Ст.03 (viam-works.ru).
15. *Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенюк В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И.* Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С.14-16.
16. *Ковтунов А.И., Мямин С.В.* Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – №1. – С.9-12.
17. *Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф.* Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №3. – С.31-36.
18. *Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А.* Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Труды ВИАМ. – 2013. – №2. – Ст.05 (viam-works.ru).
19. *Беляев М.С., Горбовец М.А., Комарова Т.И.* Способ испытаний и расчетное определение предела выносливости для горизонтального участка кривой усталости // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №3. – С.50-55.
20. *Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А.* Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для

рабочих сопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011. – №SP2. – С.26-37.

Поступила в редакцию 12 августа 2014 года.

Сведения об авторах:

Гришина Ольга Ильинична – инж.2 кат., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, г. Москва, Россия; e-mail: ol4ikgrishina@gmail.com

Шавнев Андрей Александрович – к.т.н., нач.лаб. 26, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, г. Москва, Россия; e-mail: as151@mail.ru

Филиппов Роман Александрович – асп., Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: rmnfilippov@gmail.com

Серпова Виктория Михайловна – инж.2 кат., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, г. Москва, Россия; e-mail: nikasvm@yandex.ru

Золотова Дарья Игоревна – асп., Московский Авиационный Институт, г. Москва, Россия; e-mail: darjall@mail.ru