

УДК 539.41; 620.17

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
И ПРОЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
Ширинян Р.А.

Ռ. Ա. Շիրինյան

Մնացորդային լարումների բաշխման և շերտավոր  
կառուցվածքների ամրության մասին

Չտոտասածզականության մերողով և ամրության փորձերով հետազոտվել են երկշերտ ստանձային միացությունների լարվածային վիճակը ջերմատիճանային փոփոխության ազդեցության տակ: Ստացվել է փորձնականորեն հաստատվել են միացվող նյութերի ֆիզիկա-մեխանիկական հատկությունները և նրանց եզրերում հարաբերական կոչտությունը հաշվի առնող միացության ամրության տեսակետից գերադասելի լարվածային վիճակ ապահովող պայմաններ:

R.A. Shirinian

On the Distribution of Residual Stresses and Strength of  
Layer Construction

Методом фотоупругости и испытаниями на прочность исследовано напряженное состояние двухслойной клеевой конструкции, подвергнутой действию температурных перепадов. Получены и экспериментально подтверждены условия, обеспечивающие предпочтительное, с точки зрения прочности соединения, напряженное состояние с учетом физико-механических свойств и относительной жесткости на краях соединяемых материалов.

За последние десятилетия слоистые конструкции и детали, полученные методами склеивания, пайки или контактной сварки, нашли широкое и весьма разнообразное применение: от радиоэлектронных деталей до конструкций из композитных материалов. Однако, методы их проектировочного расчета не вполне установились. В частности, расчеты на прочность слоистых конструкций [1-4] не учитывают в полной мере влияние краевых эффектов, хотя многие исследования [2,5,6] показывают, что часто именно характер распределения напряжений в окрестности выхода контактной поверхности на грань изделия определяет прочность соединения. Исследования [6,7,8] характера распределения напряжений около угловых точек края контактной поверхности с получением условий, обеспечивающих малонапряженное состояние, открывают возможность оптимального выбора материалов и геометрии стыка. Но в действительности практические ограничения на выбор материалов и геометрию стыка не всегда дают возможность осуществления оптимального - малонапряженного состояния конструкции стыка. На практике проблема решается с применением менее прочных пластичных клеев или заданием большего запаса прочности, что ведет к утяжелению и удорожанию конструкций.

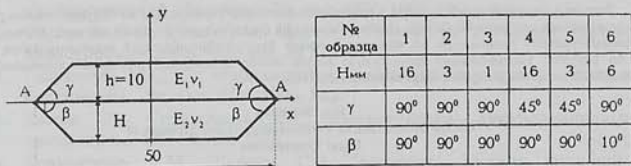
В настоящей работе методом фотоупругости и испытаниями на прочность проведено исследование напряженного состояния двухслойной клеевой конструкции, подвергнутой действию температурных перепадов. Получены и экспериментально подтверждены условия, обеспечивающие предпочтительное, с точки зрения прочности соединения, напряженное состояние с учетом физико-механических свойств соединяемых материалов и приложенной нагрузки.

1. Рассматривается напряженное состояние двухслойной пластинки, составленной из разных материалов склеиванием (фиг.1) при температуре

$T_0$  с рабочей температурой  $T_p$ . В зависимости от разности температур  $\Delta T = T_p - T_0$  и разности  $\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2$  коэффициентов линейного температурного расширения составляющих пластинок материалов в пластинке возникают внутренние напряжения. Особо важное значение имеет характер распределения напряжений на крае стыка соединения, так как по результатам многих исследований [5,6] прочность соединения во многом зависит от напряженного состояния в окрестности выхода контактной поверхности на грань составной пластинки (точки А на фиг.1).

Известно [6], что напряжения в окрестности точки А при незагруженных смежных свободных гранях можно представить как сумму функций вида

$$\sigma = Br^\lambda \quad (1)$$



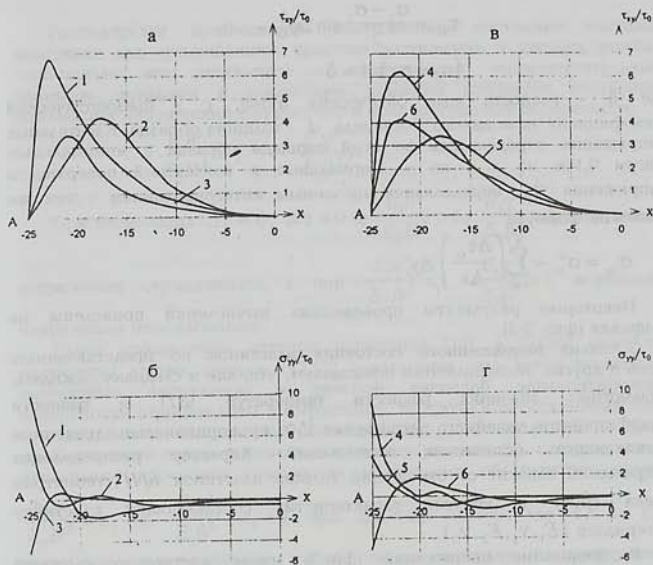
Фиг. 1. Двухслойная пластинка

$$h = 10 \text{ мм}, E_1 = 3 \text{ ГПа}, \nu_1 = 0.38, E_2 = 70 \text{ ГПа}, \nu_2 = 0.3$$

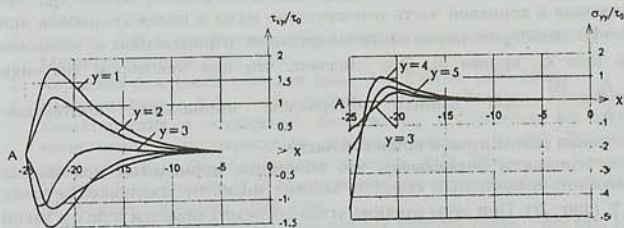
При этом  $\lambda$  определяются геометрией стыка и упругими характеристиками составляющих пластинок материалов, а коэффициенты  $B$  зависят также от всей геометрии детали и приложенной нагрузки. В работе [6] (и в других работах) получены уравнения для определения  $\lambda$  и сформулированы условия, обеспечивающие  $\lambda > 0$  и, тем самым, малонапряженное состояние окрестности точки А. Эти условия накладывают ограничения на геометрию стыка (углы  $\beta, \gamma$ ) и механические характеристики ( $E_1, \nu_1, E_2, \nu_2$ ) соединяемых материалов, что конструктивно и технологически не всегда удается соблюсти. Другим путем повышения прочности соединения может быть обеспечение малости коэффициента  $B$  в (1) при определенных свойствах приложенной внешней нагрузки. Как показывает дальнейшее обсуждение, соблюдение условия малости коэффициента  $B$  оказывается возможным в рассматриваемом случае двухслойной пластинки при описанных выше термоупругих напряжениях вне зависимости от значения нагрузки.

2. Напряженное состояние двухслойной пластинки исследовано методом фотоупругости. Один из слоев пластинки изготовлен из эпоксидного компаунда ЭД-16МА, второй - из дюралюминия Д16. Склеивание реализовано эпоксидным клеем (100 в.ч. ЭД-20, 10 в.ч. ПЭПА) при температуре  $T_0 = 65^\circ \text{C}$  по известной [3] технологии. Форма и размеры образцов приведены на фиг.1. Исследование напряженного состояния проведено при комнатной температуре ( $T_p = 20^\circ \text{C}$ ). Результаты прочностных испытаний получены охлаждением образцов до появления первых трещин или разрушения образца.

Определение напряженного состояния эпоксидного составляющего соединения проведено на поляриметре КСП-5 методом компенсации. Касательные напряжения определялись по известной [9] формуле



Фиг. 2. Распределение контактных напряжений  
а, б - образцы №1, 2, 3; в, г - образцы №4, 5, 6



Фиг. 3. Распределение контактных напряжений в образце №3

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\varphi_{xy}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)cd = \delta$$

где  $\delta$  - разность хода оптических путей,  $c$  - пьезооптический коэффициент эпоксидного компаунда,  $d$  - толщина образца. Касательные напряжения определялись по всей площади образца с минимальным шагом 0,1 см по  $x$  и по  $y$ . Нормальные к контактной поверхности напряжения  $\sigma_{yy}$  определялись численным интегрированием с тем же шагом по формуле

$$\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^0 - \sum_{i=0}^k \left( \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} \right)_i \Delta y_i$$

Некоторые результаты проведенных вычислений приведены на графиках (фиг. 2-3).

3. Анализ напряженного состояния пластинок по представленным здесь и другим экспериментам показывают, что, как и следовало ожидать, абсолютные значения разности температур  $|\Delta T|$  и разности коэффициентов линейного расширения  $|\Delta \alpha|$  пропорциональны значениям возникающих остаточных напряжений. Характер распределения напряжений зависит от отношений толщин пластинок  $h/H$ , геометрии стыка ( $\beta, \gamma$ ) и упругих характеристик составляющих пластинку материалов ( $E_1, \nu_1, E_2, \nu_2$ ).

Распределение напряжений (фиг. 3) имеет достаточно сложный характер, однако, некоторые закономерности могут быть выявлены.

Распределение касательных напряжений вблизи контактной поверхности исследовано многими авторами [5, 10, 11]. Эти исследования, а также результаты, приведенные на фиг. 2-3, показывают, что большие касательные напряжения сосредотачиваются в концевых частях пластинок. В центральной части пластинки касательные напряжения снижаются до нуля.

Распределение нормальных к контактной поверхности напряжений  $\sigma_{yy}$  имеет более сложный характер. Рассматривая изменения  $\sigma_{yy}$  для разных толщин, можно заметить, что при  $h/H = 10/16$  (фиг. 2б, кривая 1) эти напряжения положительны и имеют максимальное значение на концевой части пластинки, при  $h/H = 10/3$  (фиг. 2б, кривая 2) эти напряжения в концевой части относительно малы и положительны, а при  $h/H = 10$ , наоборот, нормальные напряжения отрицательны в концевой части (фиг. 2б, кривая 3). Это означает, что при некотором значении  $\frac{10}{16} < \frac{h_1}{h_2} < \frac{10}{1}$  для данных материалов, нормальные контактные напряжения равны нулю в концевой части.

Эксперименты показывают, что поведение нормальных контактных напряжений аналогичным образом зависит также от соотношения углов  $\beta$  и  $\gamma$  (фиг. 2г). При этом влияние углов сосредотачивается в более узкой зоне концевой части контактной поверхности.

Испытания на прочность проведены охлаждением образцов до разрушения или появления трещины на контактной поверхности. Некоторые образцы разрушались до достижения комнатной температуры. Относительная прочность образцов оценивалась значением  $|\Delta T|$ , при котором наступало разрушение с интервалом  $5^\circ C$ .



Рассматривая приближенно напряженное состояние составной пластинки как суперпозицию простого растяжения и чистого изгиба и сопоставляя эти результаты с полученными экспериментальными данными, приходим к следующим условиям минимума нормальных контактных напряжений в окрестности края контактной поверхности:

$$\frac{E_1 h^3}{E_2 H^3} = 1, \quad \frac{E_1 \gamma^3}{E_2 \beta^3} = 1 \quad (2)$$

При этом, когда  $\Delta T < 0$ ,  $\Delta \alpha > 0$  и  $\frac{E_1 h^3}{E_2 H^3} > 1$ ,  $\frac{E_1 \gamma^3}{E_2 \beta^3} > 1$ , нормальные напряжения отрицательны, а при  $\frac{E_1 h^3}{E_2 H^3} < 1$ ,  $\frac{E_1 \gamma^3}{E_2 \beta^3} < 1$  нормальные напряжения положительны.

Ранее проведенные автором испытания [14], а также некоторые результаты других авторов [12,13] показывают, что когда нормальные контактные напряжения в опасной концевой зоне контактной поверхности отрицательны (сжимающие), то прочность соединения выше, чем когда эти напряжения растягивающие. Учитывая это, а также приближенный полумпирический характер условий (2), следует, что для повышения прочности соединения необходимо обеспечивать условия

$$\frac{E_1 h^3}{E_2 H^3} > \varepsilon_1 + 1, \quad \frac{E_1 \gamma^3}{E_2 \beta^3} > \varepsilon_2 + 1 \quad \text{при } \Delta T < 0, \quad \Delta \alpha > 0, \quad \text{где } \varepsilon_1, \text{ и } \varepsilon_2 -$$

некоторые положительные малые числа, величину которых можно выработать конструктивно или определить экспериментально.

В случае пластинок, имеющих более двух слоев, характер поведения напряжений качественно усложняется. Для конкретных материалов удается получить некоторые результаты и аналогичная к двухслойному ситуация наблюдается и в трехслойном случае. Однако, в общем случае результаты зависят от  $|\Delta \alpha|$  и  $|\Delta T|$ , вследствие чего аналогичные к (2) условия для трех и более слоев невозможно получить и возникает необходимость отдельного рассмотрения каждой конкретной задачи для определенных материалов и условий нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прочность, устойчивость, колебания. Т.2. -М.: Машиностроение, 1968. 464с.
2. Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. -М.: Машиностроение, 1980. 231с.
3. Кардашев Д.А. Синтетические клеи. -М.: Химия, 1976. 504с.
4. Благонадежин В.Л., Инденбаум В.М. Расчет термоупругих характеристик и остаточных напряжений в оболочках из слоистых композитов с перекрестным армированием. - В кн.: Расчеты на прочность. Вып. 20. М.: Машиностроение, 1979. 209с.
5. Ушаков Б.Н., Фролов И.П. Напряжение в композитных конструкциях. - М.: Машиностроение, 1979. 134с.
6. Чобанян К.С. Напряжения в составных упругих телах. - Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1987. 338с.
7. Хачикян А.С., Шириян Р.М. Об устойчивости малонапряженного состояния к некоторым геометрическим дефектам. - Изв. АН АрмССР, сер. техн. наук, 1983, т.36, №2, с.49-52.
8. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. -М.: Наука, 1974. 640с.
9. Адгезия, клеи, цементы, припои. Под ред. Н.Дебройна и Р.Гувинка. -

- М.: Изд-во ИЛ, 1954. 584с.
10. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. - М.: Наука, 1973. 576с.
  11. Сумцов В.С., Туровский М.Л. и др. Исследование напряжений вблизи кромки стяжной втулки. -Тр. VII Всесоюзной конференции по поляризационно-оптическому методу исследования напряжений. -Таллин, 23-26 ноября 1971, т.3, с. 261-263
  12. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. -М.: Мир, 1991. 484с.
  13. Миленин В.Н. и др. Расчет остаточных напряжений в сварных соединениях твердых сплавов со сталями методом граничных элементов. Новосибирск. - ПМТФ, 1993, №1, с.150-154.
  14. Чобанян К.С., Ширинян Р.А. Исследование явления малонапряженности края стыка соединения из разнородных материалов. -Материалы VIII Всесоюзной конференции по методу фотоупругости. -Таллин, 1979, т. III, с.291-296.

Институт механики  
НАН Армении

Поступила в редакцию  
08.09.1997