

ПРОЧНОСТЬ КЛЕВЫХ НАХЛЕСТОЧНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ И ЯВЛЕНИЕ МАЛОНАПРЯЖНОСТИ

ДАВИДЯН Д.Б., ШИРИНЯН Р.А.

Դավիդյան Գ.Բ., Շիրինյան Ռ.Ա., Ստուգմանից վերադիր միացումների  
ամրությունը և թերթարվածության երևույթը:

Davidian D.B., Shirinian R.A. Strength of glued overlap joints and phenomenon  
of low-stress level

Ֆոտոստաճգակացությանց մեթոդով ուսումնասիրվում է լարումների  
վարքը թիթեղների ստուգմանից միացումներում, կախված թիթեղների  
ձայրերի երկրայափոխությունից: Ցույց է տրված լարումների մեծ  
կուտակումները փարագցելու կամ վերացցելու ղեարավորությունը:

Методом фотоупругости изучено поведение напряжений в клеевых нахлесточных  
соединениях в зависимости от геометрии концов нахлестки. Показано, что в угловых  
точках нахлестки подбором соответствующих углов соединяемых материалов и кле-  
евого слоя можно устранить или существенно снизить сильные концентрации  
напряжений.

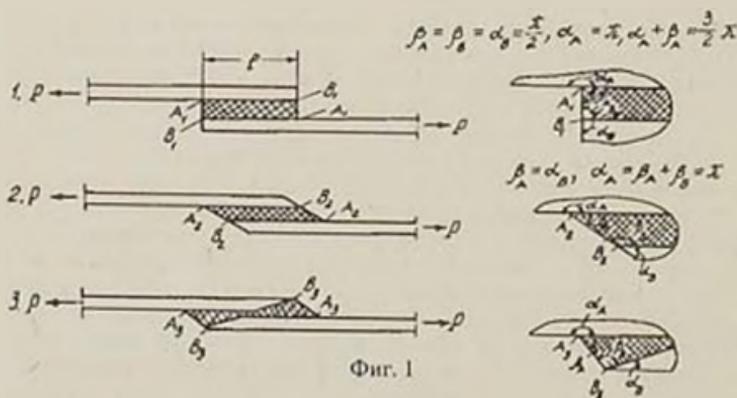
Получение высокопрочных клеевых нахлесточных соединений с по-  
мощью хрупких, относительно прочных (жестких) клеев затруднено тем,  
что на концах нахлестки возникают высокие концентрации напряжений,  
часто превышающие когезионную и адгезионную прочности клея. Из-за  
этого на практике вынужденно применяют пластичные клеи, которые зна-  
чительно снижают общую прочность соединения.

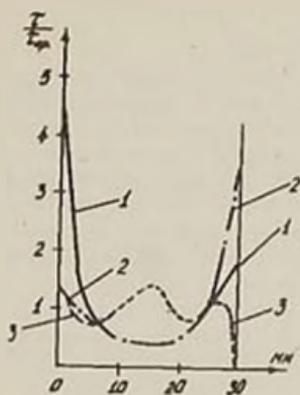
Исследованию напряженно-деформированного состояния клеевых на-  
хлесточных соединений посвящено много теоретических и экс-  
периментальных работ, в числе которых важное место занимают работы  
Фолькерсена, Голанда-Рейснера, Майлонаса [1] и др. [2]. По теории  
Фолькерсена вдоль контактной поверхности учитываются только каска-  
тельные напряжения и полностью игнорируются нормальные  
раздирающие напряжения. По теории Голанда-Рейснера учитываются  
также нормальные напряжения от изгиба. В обоих случаях распределение  
напряжений по толщине клеевого слоя принято постоянным, что и  
приводит, вероятно, к несоответствию с данными эксперимента. Экс-  
периментами, проведенными Майлонасом методом фотоупругости [1], по-  
казана неравномерность распределения напряжений по толщине клеевого  
слоя на концах нахлестки. С другой стороны, клеевой слой имеет ко-  
нечную толщину и заканчивается свободной поверхностью раздела между  
клеем и воздухом и, как показано там же, от формы этой границы за-

зависит распределение напряжений из концах нахлестки. Предположено также, что нерегулярность форм этой границы является причиной большого разброса прочностных показателей.

Установленное К.С.Чобаняном [3] явление малонапряженности края поверхности соединения в составном теле при действии общей нагрузки (открытие N 102) теоретически раскрывает характер поведения напряжений в угловых точках составного тела в зависимости от механических свойств соединяемых материалов и от геометрии края соединения. Это открытие позволяет целенаправленно изменять поведение напряжений на краях поверхности контакта. Целью настоящей работы является получение высокопрочного клевого нахлесточного соединения с помощью жестких клеев с использованием явления малонапряженности, где в качестве составляющих материалов представлены клеевой слой и материал нахлестки.

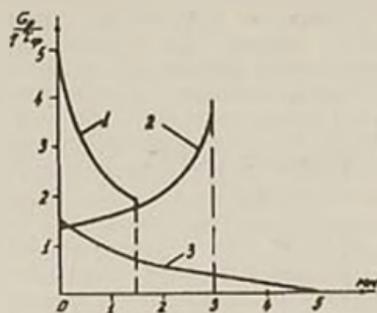
**Методика эксперимента.** Рассмотрены шесть типов клеевых нахлесточных соединений дюралюминиевых листов, соединенных эпоксидным клеем и отличающихся геометрией концов нахлестки. В настоящей работе приведены три типа соединения, как наиболее характерные (фиг.1). Исследовался характер напряженного состояния нахлестки методом фотоупругости на моделях клевого слоя и сопоставлялся с результатами испытаний на прочность аналогичных конструкций. Для проведения фотоупругих исследований минимальная толщина клевого слоя принята 1,5 мм, а остальные размеры соединения подобраны так, чтобы обеспечивались условия подобия расчетной схемы нахлесточного соединения. Разделка поверхностей нахлестки выполнялась по соответствующим шаблонам, а модели для клевого слоя изготовлялись из оптически чувствительного материала эпоксидного компаунда соответственно форме разделки нахлестки. При склеивании, во избежание внесения начальных напряжений склеивание проводилось без давления. Для всех типов соединений осевое усилие равно  $P = 25$  кг, длина и ширина нахлестки соответственно равны  $l = 30$  мм,  $a = 5$  мм, а общая длина  $L = 228$  мм. Фотоупругие исследования проводились на установке КСП-5 методом компенсации. Определялись касательные напряжения по контактным поверхностям нахлестки и нормальные раздирающие напряжения на сво-





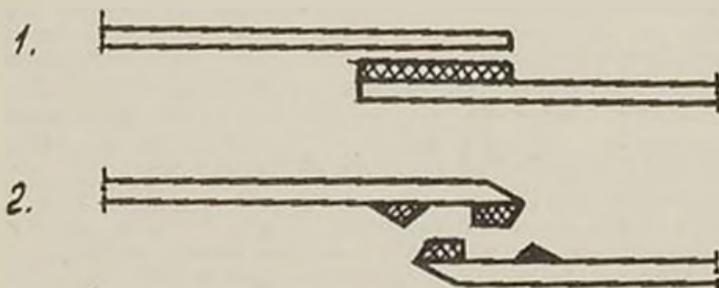
Расстояние от  $A_1$  по контактной поверхности

Фиг. 2



Расстояние от  $A_1$  по свободному контуру

Фиг. 3



Фиг. 4

бодном контуре. Для анализа поведения касательных и раздирающих напряжений введены коэффициент концентрации касательных напряжений  $K_1 = \tau/\tau_{cp}$  и коэффициент концентрации раздирающих напряжений  $K_0 = \sigma/(2\tau_{cp})$ , где  $\tau_{cp} = P/a$ .

Типы нахлесточных соединений представлены на фиг. 1 и обозначены номерами: 1-стандартный, 2-со скошенным концом, 3-с переменным сечением клевого слоя. Поскольку распределение напряжений симметрично относительно центра нахлестки, то эквивалентные угловые точки обозначим одинаковыми буквами с индексами, соответствующими типу нахлестки.

Образцы для испытаний на прочность клевого дюралюминиевого листа при сдвиге изготовлены по размерам согласно ГОСТ [4], с соответствующей геометрией разделки концов нахлестки.

Для отношения модулей упругости дюралюминия и эпоксидного композита, равного 17, из [3] определены области малонапряженности, исходя из которых выбраны формы разделки.

#### Проведение эксперимента и анализ результатов

1 На кривой 1 фиг.2 представлен график распределения касательных напряжений вдоль контактной поверхности для стандартного образца. На крае нахлестки, в угловой точке  $A_1$ , где общий угол дюралюминия и клея составляет  $3/2\pi$  и клеевой слой примыкает к растягиваемым элементам под прямым углом, имеет место сильная концентрация напряжений ( $K_t = 4.6$ ), а на другом конце нахлестки, в точке  $B_1$ , где общий угол равен  $\pi$  и линия раздела делит его пополам, концентратор находится в разгруженной области и коэффициент концентрации равен  $K_t = 1.9$ . Середина нахлестки, примерно  $2/3l$ , не работает.

На кривой 1 фиг.3 приведен график распределения раздирающих напряжений на свободном контуре клеевой прослойки. Как видно из графика, раздирающие напряжения в основном сконцентрированы в угловой точке  $A_1$ , где коэффициент концентрации раздирающих напряжений равен  $K_\sigma = 4.6$ . Напряжения от точки  $A_1$  к точке  $B_1$  сильно убывают и коэффициент концентрации в точке  $B_1$  имеет значение  $K_\sigma = 1.9$ . На кривой 1 фиг.4 из представленной картины разрушения видно, что разрушение носит адгезионный характер и очагом возникновения трещины является точка  $A_1$ , где коэффициенты концентрации и касательных и раздирающих напряжений имеют максимальные значения.

2. Второй тип соединения, приведенный на кривой 2 фиг.1, представляет собой нахлестку со скошенными концами. В этом случае клеевой слой в точке примыкания ( $A_2$ ) к дюралюминиевой основе составляет угол  $\beta = 30^\circ$ , где коэффициент концентрации касательных напряжений равен  $K_t = 1.4$ , который значительно меньше значения этого коэффициента в соответствующей угловой точке образца стандартного типа. На кривой 2 фиг.2 из графика касательных напряжений видно, что на другом конце нахлестки, в точке  $B_2$ , где  $\alpha = 30^\circ, \alpha + \beta = \pi$ , имеет место сильная концентрация напряжений ( $K_t = 3.8$ ). Из анализа графиков следует, что изменение геометрии концов нахлестки существенно сказывается на перераспределении напряжений. В этом случае середина нахлестки также не работает. Раздирающие напряжения для данного типа соединения, график распределения которых представлен кривой на кривой 2 фиг.3, имеют максимальные значения в точке  $B_2$  ( $K_\sigma = 3.8$ ). Из приведенной картины разрушения (рис. 2 фиг.4.) видно, что разрушение хрупкое и носит когезионный характер. Разрушение начинается в точке  $B_2$  и вызвано, в основном, раздирающими напряжениями.

3. Третий тип соединений (рис. 3 фиг.1) представляет собой нахлестку с переменным сечением клевого слоя. В данном случае, в угловой точке  $A_3$ , где клеевой слой примыкает к дюралюминию под углом  $\beta = 40^\circ$ , коэффициент концентрации касательных напряжений относительно невелик и равен  $K_t = 1.5$ . На кривой 3 фиг.2 из представленного графика распределения касательных напряжений видно, что несмотря на наличие в угловой точке  $A_3$  относительно слабого концентратора и конструктивно внесенного в середину нахлестки слабого внутреннего концентратора ( $K_t = 1.4$ ), распределение касательных напряжений по всей

поверхности контакта близко к равномерному, причем в восприятии передаваемого усилия активно участвует середина нахлестки. Напряжения в точке  $B_3$  согласно условию малонапряженности равны нулю. Из графика (кривая 3 фиг.3) видно, что максимальное раздирающее напряжение достигается в точке  $A_3$  ( $K_\sigma = 1.5$ ).

В нижепредставленной таблице приведены результаты прочностных испытаний и вариационные коэффициенты соединений указанных типов.

№	Тип соединения	Прочность в МПа	Вариационный коэф.
1	Стандартный	7.3	13.8
2	Скошенный	13.1	28.3
3	С переменным сеч. кл. слоя	20.4	11.2

3. Из таблицы видно, что прочности рассмотренных соединений хорошо согласуются с общим характером распределения напряжений (фиг.2 и 3) и теоретически полученным поведением напряжений в угловых точках [3]

Выводы

1. Стандартный тип образца (первый тип), применяемый для испытания прочности клеев при сдвиге [4], непригоден для жестких клеев, так как касательные напряжения распределены неравномерно и доминирующими напряжениями при разрушении являются раздирающие напряжения.

2. Используя условие малонапряженности, подбором соответствующих комбинаций углов из краев нахлестки можно снизить или вовсе устранить сильные концентрации напряжений.

3. Из рассмотренных типов соединений наилучшей конструкцией нахлесточного клеевого соединения из жестких клеев является третий тип соединения, в котором касательные напряжения распределены более равномерно и прочность которого превышает прочность стандартного образца почти в три раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адгезия, клеи, цементы, припои. Под редакцией Н.Дебройна и Р.Гувинка. - Пер. с англ. Изд-во иностр., М., 1954. 584 с.
2. Баркер Р.М., Хетт Ф. Расчет клеевых соединений в конструкциях летательных аппаратов. Ракетная техника и космонавтика. Пер. с англ., т.2, N 12, с. 60-65 (1973).
3. Чобанян К.С. Напряжения в составных упругих телах. - Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1987. 338 с.
4. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. - М.: Химия, 1976. 504 с.

Институт механики АН Армении  
Поступила в редакцию 25.05.1991