

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В КЛЕЕВОМ ШВЕ СОЕДИНЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ВНАХЛЕСТКУ

Предлагаемый метод определения усилий в клеевом шве соединения листовых материалов внахлестку основан на представлении соединения в виде дискретной стержневой системы по расчетной схеме кососимметричной рамы. Определение усилий предлагается вести методом сил.

Листовые материалы как конструктивные элементы широко применяются в транспортных (корабли, самолеты, автомобили и др.), строительных и других конструкциях. Надежность и долговечность работы таких конструкций во многом зависит от прочности соединений листовых материалов. В настоящее время все большее применение в конструкциях находят листовые композиционные полимерные материалы – стеклопластики, углепластики и другие, специфическими свойствами которых является их малая жесткость при высокой прочности.

Имеющиеся предложения, например [1], по расчету соединений внахлестку листовых материалов при растяжении предполагают разрушение клеевого шва внезапно от усилий сдвига без учета отрывающих усилий.

Такой подход к расчету клеевых соединений внахлестку можно считать корректным, если жесткость (EG) соединяемых листов достаточно велика и практически исключает изгиб листов до разрушения.

Проведенные экспериментальные исследования клеевых соединений внахлестку при растяжении тонких листов стеклопластиков [2], имеющих большую прочность, но сравнительно малый модуль упругости (на порядок ниже модуля упругости стали), показали, что разрушение клеевого соединения имеет иную картину, чем предполагается в [1]. Разрушение начинается постепенно ступенями от усилий отрыва по концам нахлестки.

Сначала разрушение образца начинается на небольших участках по концам нахлестки, затем при увеличивающейся нагрузке растяжения образца происходит вторичное разрушение на большей площади нахлестки, затем при дальнейшем увеличении действующей на растяжение нагрузки внезапно разрушается от сдвигающих усилий оставшаяся часть клеевого шва. Такая наблюдавшаяся картина разрушения образцов клеевого соединения листовых материалов, имеющих небольшую жесткость, показывает, с одной стороны, тот факт, что внезапное разрушение клеевого соединения от

сдвигающих усилий происходит не на полной длине нахлестки, как предполагается в [1], а на части ее, составляющей примерно треть длины нахлестки. С этой точки зрения расчет клеевого соединения на прочность по [1, 2] содержит как бы запас прочности.

С другой стороны, разрушение клеевого шва начинается задолго до предельной нагрузки, с чем мириться нельзя, так как в отслоившийся участок клеевого шва могут попадать влага, газы, оказывая расклинивающее на клеевой шов влияние, что может привести к саморазрушению клеевого соединения даже при отсутствии больших нагрузок на него. С этой точки зрения расчет клеевого соединения внахлестку без учета отрывающих усилий направлен в сторону риска, так как начало разрушения соединения от отрывающих усилий происходит при нагрузке примерно втрое меньше расчетной.

Попытка предложить расчет соединения листовых материалов внахлестку с применением математического аппарата теории упругости потерпела неудачу [3], что и следовало ожидать, так как реальная система соединения листовых материалов внахлестку является дискретной с разными упругими характеристиками элементов соединения и не соответствует гипотезе теории упругости о сплошности и изотропности системы.

Имеющиеся в литературе сведения [4, 5] о преобразовании сплошной системы в дискретную позволяют предложить дискретную схему соединения листовых материалов внахлестку, представляя соединяемые листы стержнями, а связь между ними (клей или другие виды соединения) – «стерженьками», соединяющими листы, рисунок 1.

Такая расчетная схема применительно к рисунку 1 представляет собой много раз статически неопределимую кососимметричную раму, внутренние усилия в стержнях которой ($\chi_1 - \chi_{18}$) можно определить от действия силы Р методами сил, перемещений, смешанным методом. Увеличение числа делений нахлестки повышает точность расчета.

Наиболее целесообразно найти эти усилия методом сил, при котором неизвестные являются непосредственно искомыми усилиями. Наличие кососимметричных ($\chi_1 - \chi_6$) и прямосимметричных ($\chi_7 - \chi_{12}, \chi_{13} - \chi_{18}$) неизвестных общую систему канонических уравнений позволяет разделить на две самостоятельные системы неизвестных – кососимметричную ($\chi_1 - \chi_6$) и прямосимметричную ($\chi_7 - \chi_{12}, \chi_{13} - \chi_{18}$).

Предварительные расчеты показали, что неизвестные $\chi_{13} - \chi_{18}$ мало влияют на значение $\chi_7 - \chi_{12}$ и в расчетах могут не учитываться, таким образом, для определения сдвигающих и отрывающих усилий достаточно решить две самостоятельные системы канонических уравнений.

$$\begin{cases} \delta_{11}\chi_1 + \delta_{12}\chi_2 + \delta_{13}\chi_3 + \delta_{14}\chi_4 + \delta_{15}\chi_5 + \delta_{16}\chi_6 = -\Delta_{1p} \\ \delta_{21}\chi_1 + \delta_{22}\chi_2 + \delta_{23}\chi_3 + \delta_{24}\chi_4 + \delta_{25}\chi_5 + \delta_{26}\chi_6 = -\Delta_{2p} \\ \delta_{31}\chi_1 + \delta_{32}\chi_2 + \delta_{33}\chi_3 + \delta_{34}\chi_4 + \delta_{35}\chi_5 + \delta_{36}\chi_6 = -\Delta_{3p} \\ \delta_{41}\chi_1 + \delta_{42}\chi_2 + \delta_{43}\chi_3 + \delta_{44}\chi_4 + \delta_{45}\chi_5 + \delta_{46}\chi_6 = -\Delta_{4p} \\ \delta_{51}\chi_1 + \delta_{52}\chi_2 + \delta_{53}\chi_3 + \delta_{54}\chi_4 + \delta_{55}\chi_5 + \delta_{56}\chi_6 = -\Delta_{5p} \\ \delta_{61}\chi_1 + \delta_{62}\chi_2 + \delta_{63}\chi_3 + \delta_{64}\chi_4 + \delta_{65}\chi_5 + \delta_{66}\chi_6 = -\Delta_{6p} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \delta_{77}\chi_7 + \delta_{78}\chi_8 + \delta_{79}\chi_9 + \delta_{710}\chi_{10} + \delta_{711}\chi_{11} + \delta_{712}\chi_{12} = -\Delta_{7p} \\ \delta_{87}\chi_7 + \delta_{88}\chi_8 + \delta_{89}\chi_9 + \delta_{810}\chi_{10} + \delta_{811}\chi_{11} + \delta_{812}\chi_{12} = -\Delta_{8p} \\ \delta_{97}\chi_7 + \delta_{98}\chi_8 + \delta_{99}\chi_9 + \delta_{910}\chi_{10} + \delta_{911}\chi_{11} + \delta_{912}\chi_{12} = -\Delta_{9p} \\ \delta_{107}\chi_7 + \delta_{108}\chi_8 + \delta_{109}\chi_9 + \delta_{1010}\chi_{10} + \delta_{1011}\chi_{11} + \delta_{1012}\chi_{12} = -\Delta_{10p} \\ \delta_{117}\chi_7 + \delta_{118}\chi_8 + \delta_{119}\chi_9 + \delta_{1110}\chi_{10} + \delta_{1111}\chi_{11} + \delta_{1112}\chi_{12} = -\Delta_{11p} \\ \delta_{127}\chi_7 + \delta_{128}\chi_8 + \delta_{129}\chi_9 + \delta_{1210}\chi_{10} + \delta_{1211}\chi_{11} + \delta_{1212}\chi_{12} = -\Delta_{12p} \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты при неизвестных в системах (1), (2) находятся по формулам

$$\delta_{ir} = \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{M}_i \bar{M}_k}{E_n G_n} dx + \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{N}_i \bar{N}_k}{E_{ct} F_{ct}} dx + \sum_1^n \int_0^l \frac{1, 2 \bar{Q}_i \bar{Q}_k}{G_{ct} F_{ct}} dx, \quad (3)$$

$$\delta_{ir} = \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{M}_i \bar{M}_p}{E_n G_n} dx + \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{N}_i \bar{N}_p}{E_{ct} F_{ct}} dx + \sum_1^n \int_0^l \frac{1, 2 \bar{Q}_i \bar{Q}_p}{G_{ct} F_{ct}} dx, \quad (4)$$

где E_n, G_n – параметры склеиваемых материалов; E_{ct}, F_{ct}, G_{ct} – параметры клеевого слоя.

Ввиду того, что параметры клеевого слоя и склеиваемых материалов могут отличаться на порядок, пренебрегать вторым и третьим слагаемыми в формулах (3, 4) не следует.

Единичные коэффициенты δ_{ik} при неизвестных канонических уравнений χ_i и грузовые коэффициенты Δ_{ip} не трудно найти, решая интегралы графически по методу Верещагина, учитывая сравнительно простое очертание эпюр, рисунок 2, 3.

Решение систем линейных алгебраических уравнений может быть выполнено на ЭВМ по программе SIMQ и другим.

В качестве примера в таблице 1 и на рисунке 4 приведены результаты расчета сдвигающих усилий в клею шве вдоль нахлестки соединения полиэфирных стеклопластиков по деформированной схеме, при внешней статической неопределимости схемы, с геометрическими параметрами рисунка 2. Приняты модуль упругости листов стеклопластика $E_d = 2 \times 10^5 \text{ кгс/см}^2$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$, площадь листа при ширине 1 см $F_d = 0,2 \text{ см}^2$, площадь стерженька $F_{cm} = \frac{2}{7} \text{ см}^2$,

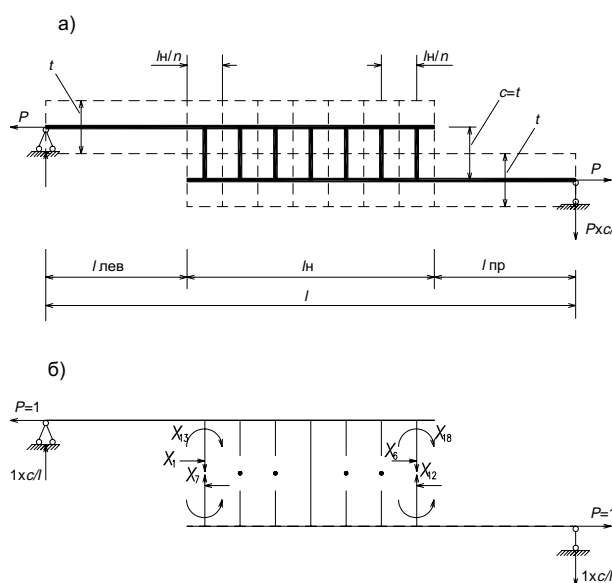


Рисунок 1. Предлагаемая расчетная схема:
 а) схема выделения дискретной системы из сплошной;
 б) расчетная схема методами сил.
 l – длина образца; l_n – длина нахлестки;
 $l_{лев}$ – расстояние от левой опоры до нахлестки;
 $l_{пр}$ – расстояние от правой опоры до нахлестки;
 t – толщина листов; c – эксцентриситет;
 P – растягивающая сила; n – число делений нахлестки;
 - - - контур соединения листов внахлестку и деление нахлестки на участки;
 — схема предлагаемой дискретной системы;
 χ_1 по χ_6 – сдвигающие усилия; χ_7 по χ_{12} – отрывающие усилия; χ_{13} по χ_{18} – моменты.

Таблица 1. Значения единичных и грузовых коэффициентов системы канонических уравнений (1), подсчитанные по данным примера

3077	1852	1205	612	612	612	1528
1852	2460	1230	612	612	612	1226
1205	1230	1942	612	612	612	920
612	612	612	1942	1230	1205	920
612	612	612	1203	2460	1852	1226
612	612	612	1205	1852	3077	1528

Примечание: коэффициенты увеличены в 10^4 раз для удобства ввода данных в ЭВМ.

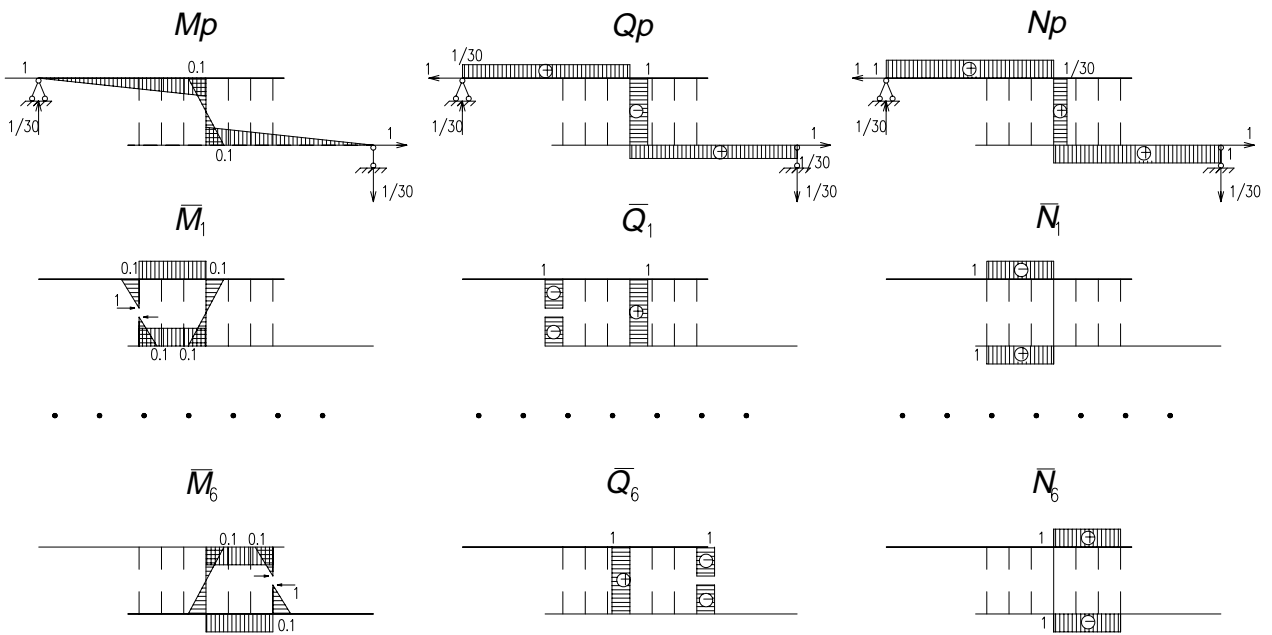


Рисунок 2. Грузовая и единичные эпюры для коэффициентов при неизвестных X_1, X_6 системы уравнений (1) при параметрах $n=7, l_n=l_{лев}=l_{пр}=2\text{см}, t=0,2\text{см}, P=1, b=1\text{см}$.
Остальные единичные эпюры для вычисления коэффициентов при неизвестных $X_2 - X_5$ строятся аналогично.

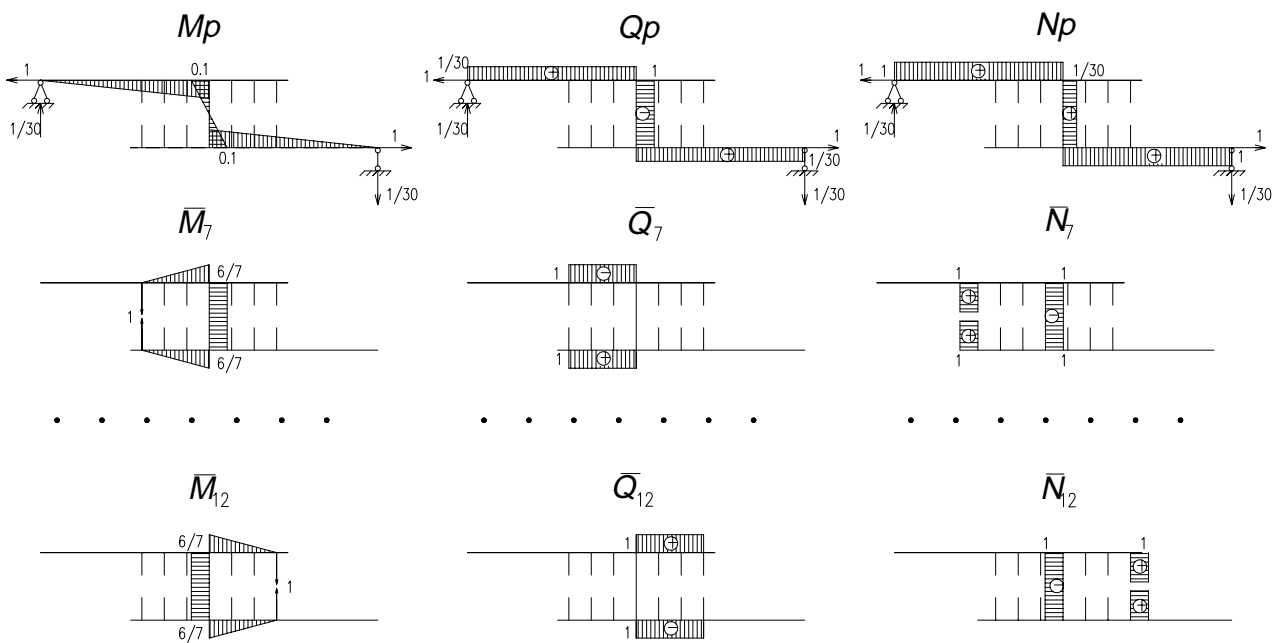


Рисунок 3. Грузовая и единичные эпюры для коэффициентов при неизвестных X_7, X_{12} системы уравнений (2) при параметрах $n=7, l_n=l_{лев}=l_{пр}=2\text{см}, t=0,2\text{см}, P=1, b=1\text{см}$.
Остальные единичные эпюры для вычисления коэффициентов при неизвестных $X_8 - X_{11}$ строятся аналогично.

$G_n = \frac{bh^3}{12} = 1 \times \frac{0,4^3}{12}$, толщина клею шва считается пренебрежимо малой.

Предложенный метод расчета клею швов может быть распространен на заклепочные и сварные соединения.

Данный метод расчета удобен для анализа распределения усилий в клею шве при разных видах опорных закреплений и внешней нагрузке, так как при одинаковых геометрических параметрах нахлестки и упругих характеристиках материала матрица единичных коэффициентов канонических уравнений остается без изменений, достаточно изменить лишь матрицу-столбец грузоу коэффициентов.

Расчет по предложенному методу может быть выполнен для других схем клею шва соединения листовых материалов (встык с односторонней накладкой, с двухсторонними накладками, на «ус»). С небольшими дополнительными вычислениями может быть произведен расчет листовых соединений криволинейного очертания, а также учтено влияние толщины клею шва.

Выводы:

– критерием прочности клею шва соединения листовых материалов внахлестку согласно предложенной методике может быть равнодействующая R сдвигающих и отрывающих усилий на конце нахлестки;

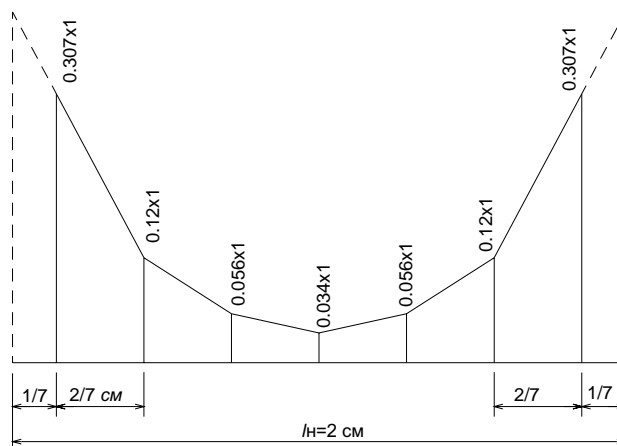


Рисунок 4. Эпюра распределения сдвигающих усилий в клею шве соединения полиэфирного стеклопластика вдоль нахлестки при действии на образец растягивающей силы P=1, подсчитанная по схемам рисунка 2 и данным таблицы 1

– предложенный метод, основанный на теоремах строительной механики, позволяет сравнительно просто определять перемещения по длине клею шва, а следовательно, определять усилия и по деформированной схеме соединения.

Список использованной литературы:

1. Сажин А.М. Расчет напряжений в клею швах металлических пластин при сдвиге // Вестник машиностроения, 1964, № 11, с. 43.
2. Норкин С.П. Прочность и деформативность клею шва соединения полиэфирных стеклопластиков. Кандидатская диссертация, 1968.
3. Бернштейн С.А. Очерки по истории строительной механики. М.: Гос. изд. лит. по стр. и арх. 1957.
4. Жемочкин Б.Н. и Синицин А.П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. М.: Стройиздат. 1947.
5. Смирнов В.А. и др. Строительная механика. Учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1984.