

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОДКРЕПЛЕНИИ ОТВЕРСТИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2005 Ю.А. Вашуков, В.П. Пересыпкин, К.В. Пересыпкин, Н.Н. Никоноров

Самарский государственный аэрокосмический университет

Представлена конечно-элементная модель и методика расчетов для определения напряженного состояния по контуру механического точечного соединения с подкреплением в листовой детали из полимерных композиционных материалов.

При создании высокоэффективных соединений полимерных композиционных материалов (ПКМ) и для передачи значительных сосредоточенных нагрузок в конструкциях используют в основном механические точечные (болтовые, заклепочные) соединения. В работах [1, 3] отмечается, что наибольшая прочность соединения при растяжении достигается в том случае, когда при заданных параметрах механического крепления равновероятны смятие материала стержнем крепежного элемента и его разрыв по ослабленному сечению. Однако исследования [2, 4] показывают, что соотношение между допустимыми напряжениями на смятие, растяжение и срез в соединениях из ПКМ не столь благоприятны, как в соединениях конструкций из однородного материала. Это объясняется спецификой структуры ПКМ и полиморфизмом их разрушения. Наиболее опасным, предшествующим всем остальным типам разрушения, является смятие.

Среди факторов, повышающих прочность соединений ПКМ, важное место принадлежит степени затяжки болта. Увеличение затяжки болта приводит к снижению вероятности разрушения по типу смятия [3, 5]. При увеличении момента предварительной затяжки показатели предельной разрушающей нагрузки значительно увеличиваются, и тип разрушения меняется на растяжение. Однако при механическом креплении пластика в отличие от металлов часто наблюдается ослабление затяжки собранного узла. Это обусловлено деформацией связующего вследствие ползучести материала под действием

усилия затяжки болтов, а также вибрационными нагрузками, повышенной влажностью, колебаниями температур.

Одним из способов повышения несущей способности механического точечного соединения ПКМ является подкрепление стенок отверстий элементами в виде втулок и колец из однородных материалов, устанавливаемых между болтом и стенкой отверстия (рис. 1). Подкрепление предполагает совместную работу подкрепляющего элемента и листовой заготовки по периметру отверстия [6, 7]. При этом на границе их контакта должно выполняться условие сопряжения

$$\sigma_r = \sigma_r^{(1)}; \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}^{(1)}; \varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^{(1)},$$

где  $\sigma_r$  и  $\sigma_r^{(1)}$  – радиальные напряжения соответственно на границе отверстия в листовой заготовке и на внешнем контуре втулки;  $\tau_{r\theta}$  и  $\tau_{r\theta}^{(1)}$  – касательные напряжения;  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_\theta^{(1)}$  – относительные тангенциальные деформации.

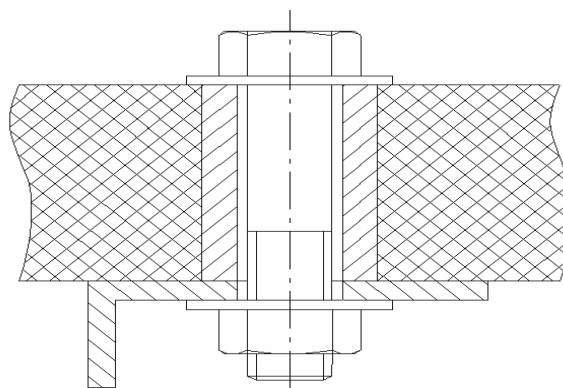


Рис. 1. Конструкция подкрепления стенок отверстий в листовой заготовке из ПКМ

Подкрепляющий элемент позволяет снизить концентрацию напряжений на границе отверстия за счет перераспределения напряжений, повысить разрушающую нагрузку силовой точкой на смятие, обеспечить стабильность осевой затяжки болтового соединения.

Анализ работ [3, 7] по подкреплению стено отверстий в анизотропных пластинках изотропными кольцами показывает, что при наличии подкрепляющего кольца весьма существенно перераспределяются напряжения в пластинке (рис. 2) и снижается коэффициент концентрации напряжений более чем в три раза.

В ряде работ [8, 9] в качестве технологического способа постановки подкрепляющего элемента (втулки) предполагается клеивание. Однако отмечается, что совместная работа подкрепляющей втулки, клеевой прослойки и стенок отверстия в листовой заготовке происходит только до определенного уровня напряжений, после чего клей перестает выполнять эту функцию и напряженно-деформированное состояние (НДС) пластины изменяется. Исследования показали, что втулка, клеевая прослойка и листовая заготовка работают совместно пока нагрузка не превышает 15-20% от разрушающей. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит разрыв клеевой прослойки между втулкой и пластинкой по линии действия силы, в результате чего появлялся зазор, картина напряженно-деформированного состояния резко меняется и становится близкой к состоянию, полученному для пластины с обычным болтовым соединением.

Разрыв клеевой прослойки происходит в результате воздействия на кромку отверстия радиальных растягивающих напряжений, которые возникают в процессе приложения нагрузки к листовой заготовке. Величину этих напряжений и зону их действия можно уменьшить путем предварительного создания (на этапе установки втулки в отверстие) в зоне их действия переменного поля сжимающих напряжений за счет совместной радиальной раздачи подкрепляющего элемента и стенок отверстия заготовки в локальных зонах.

Следует отметить, что использование клеивания при диаметре чистового отвер-

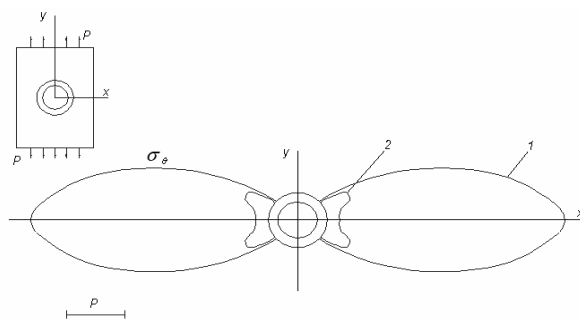


Рис. 2. Влияние подкрепляющего элемента в листовой заготовке из анизотропного материала [9]: 1 – кольцо отсутствует; 2 – подкрепляющим кольцом

стия в листовой заготовке менее 10,0 мм не всегда представляется возможным. Это объясняется тем, что выдержать рекомендуемый зазор, равный 0,23% диаметра отверстия, между втулкой и листовой заготовкой при данных размерах отверстия представляет значительные трудности. Увеличение же зазора ведет к уменьшению стадии совместной работы втулки и листовой заготовки, что в свою очередь приводит к потере эффективности подкрепления.

В работах [10, 11] разработан способ постановки втулки (рис. 3), заключающийся в осевом пластическом сжатии подкрепляющего элемента, который представляет собой цилиндрическое тело с выступами в виде сегментов на верхнем торце. В процессе осуществления сжатия внутренний диаметр втулки остается неизменным, а по его внешнему диаметру осуществляется радиальная раздача совместно с соответствующими участками заготовки с образованием на границе соединения переменного поля радиальных сжимающих напряжений.

В работе [11] разработана математическая модель, определяющая зависимость конструктивных параметров процесса образования отверстий с подкрепленными стенками на деформированное состояние подкрепляющего элемента по внешнему контуру и на границе отверстия листовой анизотропной детали.

Проектирование механических точечных соединений с подкреплением производится с учетом нагрузок, действующих при эксплуатации. При этом наиболее часто встречается растягивающая нагрузка, дей-

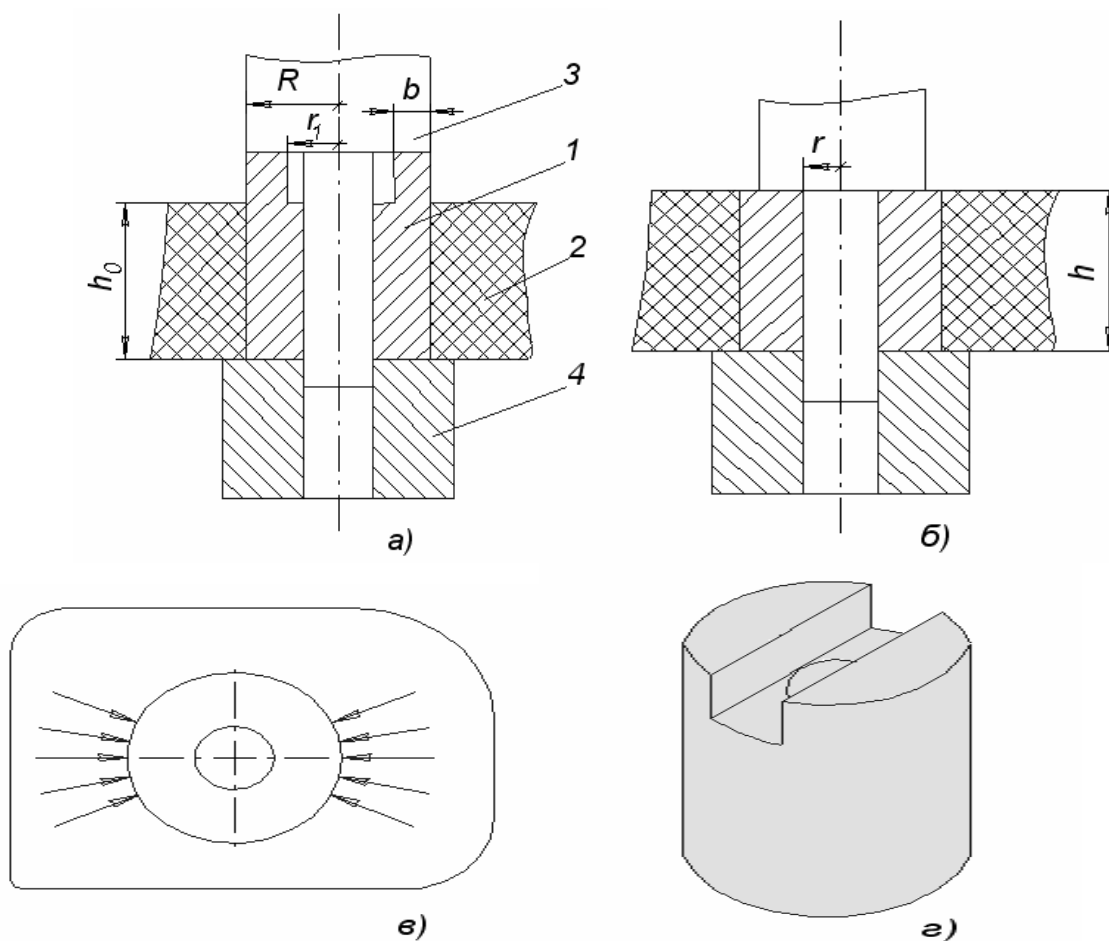


Рис. 3. Способ осадки подкрепляющего элемента:

а, б – процесс осадки подкрепляющего элемента; в – поля радиальных сжимающих напряжений; г – подкрепляющий элемент; 1 – подкрепляющий элемент; 2 – листовая заготовка; 3 – пуансон; 4 – подпирательный элемент

ствующая на деталь и силовую точку. Поэтому раздача по внешнему контуру подкрепляющего элемента должна быть выбрана таким образом, чтобы сохранить клеящую прослойку, а с ней и эффект подкрепления.

При запрессовке подкрепляющего элемента клей находится в жидкой фазе и поэтому взаимодействие происходит только по нормали к поверхности контакта, поскольку жидкий клей сильно снижает коэффициент трения. Так как клей образует тонкую пленку в зоне контакта то после его полимеризации втулка и пластинка превращаются в сплошное тело, обеспечивающее взаимодействие по всей поверхности склейки и по всем компонентам напряжений. В теле втулки и в окружающей ее зоне пластинки фиксируется самоуравновешенное напряженное состояние. Приращение напряжений, вызванное последующим внешним нагружением, в предположении об упруго-линейном поведении материала втулки и пластинки, не зави-

сит от перемещений и напряжений конструкции, обусловленных запрессовкой. Благодаря этому НДС, вызванное нагрузкой, и НДС, обусловленное запрессовкой, можно рассчитать независимо одно от другого, а общее решение получить суммированием этих двух решений.

Решение этих задач выполнялось с помощью метода конечных элементов [12]. Использовалась система MSC/NASTRAN [13]. Конечно-элементная модель включает в себя квадратную ортотропную пластинку размером  $48R$ , в центре которой располагается отверстие радиусом  $R$ . Втулка имеет внутренний радиус  $r$  и внешний контур, определяемый функцией  $R + v_r(\varphi)$ , где  $v_r(\varphi)$  - величина раздачи при запрессовке, зависящая от угловой координаты  $\varphi$ . Рассматривался случай симметрии механических свойств ортотропной пластинки, внешних нагрузок и формы запрессованной втулки относительно од-

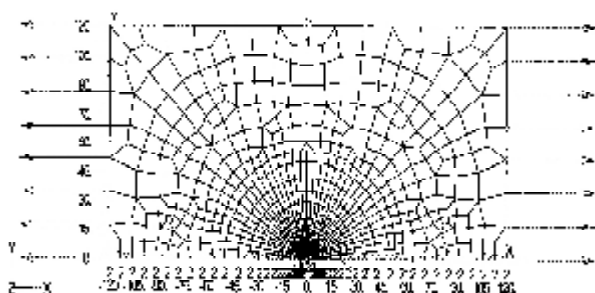


Рис. 4. Конечно-элементная модель пластинки с втулкой

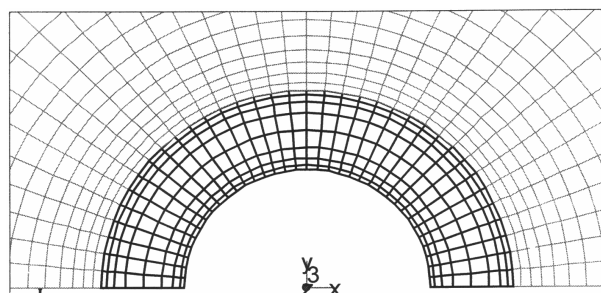


Рис. 5. Фрагмент конечно-элементной модели ортотропной пластинки с запрессованной втулкой: втулка выделена

ной из плоскостей - XOZ, перпендикулярной плоскости пластинки. Поэтому конечно-элементная модель (рис. 4, 5), строилась для половины пластинки с использованием соответствующих условий симметрии.

Между втулкой и пластинкой, при расчете НДС от запрессовки, располагались контактные элементы. Коэффициент трения в контакте задавался равным нулю. Решение находилось с помощью алгоритма нелинейной статики. Контактные усилия образуют самоуравновешенную систему, поэтому в качестве кинематических граничных условий использовались статически определимые закрепления.

При расчете НДС от внешних сил конечно-элементные сетки для втулки и пластинки были объединены в одну. Решение находилось с помощью алгоритма линейной статики. Рассматривался случай одноосного нагружения растяжением пластинки с втулкой, установленной с преимущественной раздачей. Для этого случая нагружения кинематические граничные условия соответствовали

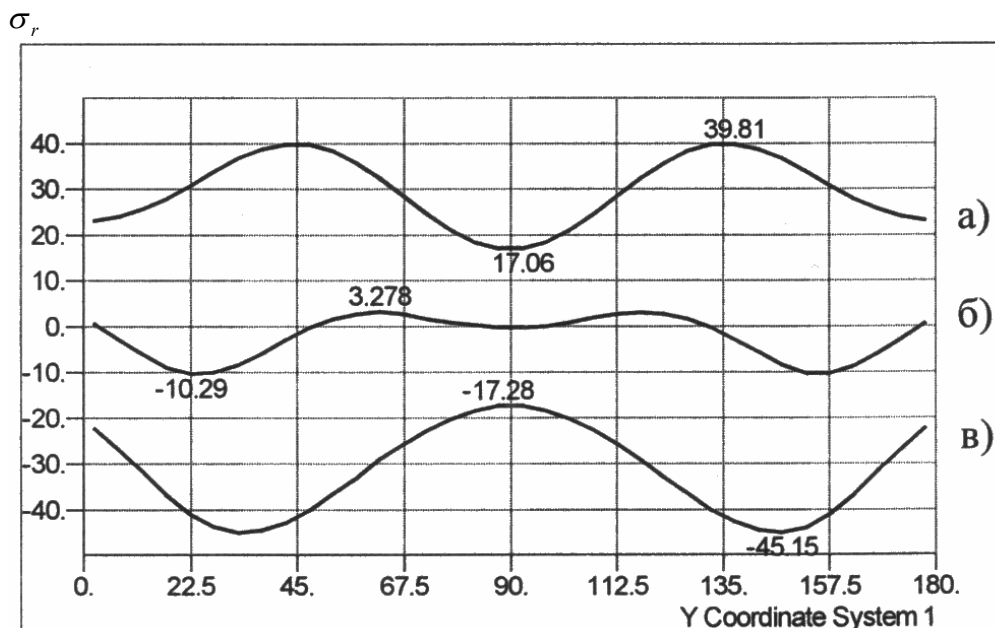
статически определимому закреплению.

Адекватность разработанной конечно-элементной модели проверялась путем сравнения результатов КЭ-расчетов с аналитическим решением для тестового случая. Поскольку для рассматриваемой задачи аналитическое решение неизвестно, в качестве тестового случая рассматривались задача о растяжении ортотропной пластины с жестким круговым включением [7]. При тестировании использовалась одна и та же конечно-элементная модель пластинки, в которой в качестве подкрепляющего элемента использовались абсолютно жесткое тело и втулка, выполненная из упругого материала. Во всех случаях пластинка нагружена одноосным растяжением под углом  $\theta=0$  с единичным напряжением на бесконечности. Результаты сравнения в характерных точках приведены в таблице. Анализ результатов КЭ - расчетов и аналитического решения показал высокую сходимость результатов.

Исследования напряженного состояния по контуру отверстия с подкреплением про-

Таблица. Сравнение радиальных напряжений в характерных точках, для растянутой пластинки с абсолютно жесткой втулкой

$\theta$ , град	Материал пластинки - ортотропный: $E_1=120$ ГПа, $E_2=8$ ГПа, $G_{12}=4$ ГПа, $\mu_{21}=0,3$ , $\mu_{12}=0,02$		Материал пластинки - ортотропный: $E_1=E_2=70$ ГПа, $G_{12}=27$ ГПа, $\mu_{21}=\mu_{12}=0,3$	
	аналитическое решение	КЭ-расчет	Аналитическое Решение	КЭ-расчет
0	1,172	1,171	1,510	1,512
90	0,0133	0,0121	0,028	0,005



**Рис. 6.** Радиальные напряжения по контуру отверстия в пластинке:  
 а) напряжения только от внешней нагрузки;  
 б) результирующие напряжения от внешней нагрузки и преимущественного натяга;  
 в) напряжения от запрессовки с преимущественным натягом подкрепляющей втулки

водились на углепластике с однонаправленной укладкой волокон. Исходные данные для расчетов принимались следующими:  $E_x = 120 \text{ ГПа}$ ,  $E_y = 8 \text{ ГПа}$ ,  $G_{xy} = 4 \text{ ГПа}$ ,  $\mu_{nc} = 0,3$ ;  $\mu_{cn} = 0,02$ . Наружный диаметр втулки – 10,0 мм; внутренний диаметр – 6,0 мм. При этом материал втулки имел следующие свойства:  $E = 70 \text{ ГПа}$ ;  $\mu = 0,3$  (алюминиевый сплав). Пластинка нагружалась растяжением вдоль оси X, соответствующим напряжению на ее внешнем контуре  $\sigma_x = 100 \text{ МПа}$ .

Полученные в результате КЭ - расчетов радиальные напряжения  $\sigma_r$  по контуру отверстия при постановке втулки путем вклеивания без натяга показаны на рисунке 6а. По всему контуру отверстия действуют растягивающие напряжения, величина которых меняется в пределах 17 – 40 % от внешней растягивающей нагрузки, что может привести к разрушению клеевой прослойки.

Для случая, когда запрессованная втулка имеет форму внешнего контура, обеспечивающую натяг, определяемый функцией

$$v_r(\varphi) = a + b \cdot \cos(4\varphi - \pi),$$

где  $a = 0,0175 \text{ мм}$ ,  $b = 0,0025 \text{ мм}$ , эпюра ради-

альных напряжений показана на рисунке 6в. Результирующие напряжения от растягивающей нагрузки, действующей на пластинку с запрессованной и вклеенной втулкой, показаны на рисунке 6б, из которого видно, что максимальные результирующие напряжения существенно снижены.

Таким образом, разработанный способ постановки втулки значительно снижает напряженное состояние по периметру отверстия с подкреплением и увеличивает несущую способность силовой точки. Разработанная конечно – элементная модель и методика расчета показала высокую сходимость результатов и позволяет с высокой точностью определять напряженное состояние по контуру силовой точки в анизотропных композиционных материалах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединение конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1985.
2. Некрасов Ю.А. Исследование прочности болтовых соединений пластин из металлов с композитными пластинами // Машиноведение. 1985. №3.

3. *Комаров Г.В.* Способы соединения деталей из пластических масс. М.:Химия, 1979.
4. *Ушаков А.Е.* Выбор рационального подкрепления конструктивных вырезов в углепластиковых панелях // Механика композитных материалов. 1989. №4.
5. *Taylor W.S., Adams J.R., Vinson J.R.* On mechanical fastening in graphite epoxy composite.-"ProgrSci and Eng." Compos. Proc. 4<sup>th</sup> ent. Conf., TCCM-IV, Tokyo, Oct. 25-28. 1982. Vol.1. Tokyo, 1982.
6. *Савин Г.Н., Тульчий В.И.* Пластинки, подкрепленные составными кольцами и упругими накладками. Киев: Наукова думка, 1971.
7. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977.
8. *Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р.* Новые композиционные материалы. Киев: Вища школа, 1977.
9. *Литвинов В.Б.* Технология выполнения высокопрочного соединения лопасти из композиционных материалов со втулкой несущего винта вертолета. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: МАИ, 1986.
10. *Барвинок В.А., Ващуков Ю.А., Желтов И.Н.* Разработка технологического процесса подкрепления поверхности отверстия в деталях из полимерных композиционных материалов // Межотраслевой сборник "Технология". Серия "Конструкции из КМ". 1991. Вып. 4.
11. *Ващуков Ю.А.* Определение деформированного состояния втулки, подкрепляющей отверстие, в деталях из композиционных материалов // Вестник СГАУ. Серия "Проблемы и перспективы развития двигателестроения". 1998. Вып. 2. Часть 1.
12. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике // М.: Мир, 1975.
13. MSC/NASTRAN for Windows Users Guide. Файл документации MSC/N4W.

## ELEMENT SIMULATION OF STRESSED STATE WHEN STRENGTHENING HOLES IN STRUCTURAL ELEMENTS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

© 2005 Yu. A. Vashukov, V.V. Peresyarkin, K.V. Peresyarkin, N.N. Nikonorov

Samara State Aerospace University

The paper presents a finite – element model and a procedure of calculations to determine stressed state along the outline of a mechanical sport Welded joint with strengthening in a sheet component made of polymer composite materials.