

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОТВЕРСТИЙ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЯХ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Ю. А. Вашуков, Е. А. Климов

**ANALYSIS AND MODELING OF THE STRESS-DEFORMED
CONDITION OF HOLES WITH CONNECTION
IN SHEET DETAILS FROM COMPOSITE MATERIALS**

Yu. A. Vashykov, E.A. Klimov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современный летательный аппарат (ЛА) проектируется и производится с учетом чрезвычайно жестких условий эксплуатации. Среди основных параметров эксплуатации – превышение скорости звука, многократно повторяемые пиковые нагрузки, форсированные режимы полетов во всепогодных условиях, резкие перепады температур, силовое воздействие аэродинамических факторов. Создание новых образцов авиационной и ракетно-космической техники с постоянно растущими требованиями к повышению эффективности, ресурса и надежности заставляет аэрокосмические державы разрабатывать новые материалы и технологические процессы, искать нетрадиционные конструктивные решения и методы проектирования. К числу наиболее важных требований, предъявляемых к конструкциям современных летательных аппаратов, относятся минимальная масса, максимальная жесткость и прочность узлов, максимальный ресурс работы конструкций в условиях эксплуатации, высокая надежность. В значительной мере перечисленные требования к конструкции обеспечиваются выбором материала и совершенствованием технологии изготовления конструкции из данного материала. Для аэрокосмической техники наиболее перспективными считаются композиционные материалы, использование которых обеспечивает максимальный рост массового совершенства конструкций ЛА. Однако эффективность использования КМ в аэрокосмической технике во многом зависит от качества соединений в зоне стыка элементов конструкции. Это связано с тем, что большинство разрушений конструкций из КМ происходит в зоне соединений (60...85 %). При этом вес стыков часто составляет 20...30 % от веса конструкции. *Материалы и методы.* Проводился анализ и сравнение существующих методов повышения несущей способности деталей из КМ с отверстиями. Рассматривался разработанный способ образования отверстий с подкреплением в деталях из КМ. Оценка напряженно-деформированного состояния деталей производилась путем конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. *Результаты.* Проверена адекватность конечно-элементной модели путем сравнения полученных результатов с известными аналитическими решениями. *Выводы.* Использование разработанного способа позволяет получить более равномерное распределение напряжений в пластине за счет введения переменного натяга. Это дает возможность управлять напряженно-деформированным состоянием в пластине из КМ по контуру отверстия при эксплуатационных нагрузках.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование, экспериментальное исследование, напряженно-деформированное состояние, подкрепление, граничные условия, растягивающая нагрузка, конечно-элементная модель, анизотропия.

Abstract. Background. Modern aircraft (LA) is designed and produced taking into account harsh operating conditions. Among the main parameters of operation – sound speed excess, repeatedly repeated peak loads, forced flight modes in all-weather conditions, sudden temperature changes, force influence of aerodynamic factors. The creation of new models of aeronautical and rocket and space technology with ever-increasing demands for greater efficiency, resource and reliability makes the aerospace powers develop new materials and technological processes, look for non-traditional design solutions and design methods. Among the most important requirements for the designs of modern aircraft (LA) are: minimum mass; maximum rigidity and strength of knots; maximum service life of structures in the operating condition; high reliability. To a large extent, the listed requirements to the design are provided by the choice of material and the improvement of the technology for producing the structure of this material. Composite materials (CM) are considered to be the most promising for aerospace engineering, the use of which ensures the maximum growth of the mass perfection of aircraft designs. However, the efficiency of using composite materials in aerospace engineering largely depends on the quality of the joints in the connection area of the structural elements. This is due to the fact that most of the destruction of structures made of composite material takes place in the connection zone (60...85 %). The mass of the junction zone is often 20 ... 30 % of the weight of the structure. **Materials and methods.** The analysis and comparison of existing methods of increasing the bearing capacity of composite materials parts with holes were carried out. The developed method for the formation of holes with reinforcement in the details of the composite material was considered. The stress-strain state of the parts was evaluated by finite element simulation using the ANSYS software package. **Results.** The adequacy of the finite element model is checked by comparing the results with known analytical solutions. **Conclusions.** The use of the developed method makes it possible to obtain a more even distribution of stresses in the plate due to the introduction of a variable interference. This makes it possible to control the stress-strain state in a KM plate along the hole contour under operating loads.

Key words: composite materials, modeling, experimental investigation, stress-strain state, reinforcement, boundary conditions, tensile load, finite element model, anisotropy.

Введение

Одной из сложных задач, решаемых в процессе проектирования и изготовления конструкций из композиционных материалов (КМ), является их крепление к силовым элементам и обеспечение прочности в местах крепления. Это объясняется тем, что при наличии силовых элементов появляются локальные сосредоточенные статически неопределимые силы, и оценка напряженно-деформированного состояния материала значительно осложняется. В отличие от металлических композиционные материалы работают в основном в упругой зоне деформаций, у них отсутствует пластическая податливость материала, сглаживающая концентрацию напряжений в зоне установки крепежных элементов. Приведенные в работах [1, 2, 3] исследования показали, что максимальные локальные напряжения на контуре отверстия в несколько раз превышают напряжения в регулярных зонах.

Стыки и соединения значительно увеличивают массу конструкции и в большинстве случаев являются причиной разрушения конструкций из КМ. Это приводит к необходимости применения специальных конструктивно-технологических решений при конструировании зоны соединения, связанных с повышением эффективности силовой работы. Поэтому проблема рациональной организации соединений КМ с другими элементами конструкций всегда занимает особое место в процессе создания конструкций [1].

Главными требованиями, которым должны удовлетворять соединения, являются:

- минимум массы;
- надежность (не ниже, чем у соединяемых деталей);
- возможность реализации в ограниченном объеме пространства;
- технологическая надежность или максимальное исключение влияния субъективных и объективных факторов на качество стыка;
- контролируемость качества на всех этапах изготовления и эксплуатации аппарата.

Кроме этого, в конструкциях стыков и соединений должен найти отражение ряд специальных технологических и эксплуатационных требований: разъемность, подвижность, возможность сборки на традиционном оборудовании [2, 4].

Композиционные материалы обладают рядом специфических особенностей, отличающих их от металлов. К таким особенностям относятся низкие прочностные свойства на смятие, срез и межслоевой сдвиг, хрупкий характер разрушения, отсутствие пластичности и высокая абразивность. Однако механические соединения деталей из композиционных материалов осуществляются с помощью тех же крепежных элементов и теми же способами, что и из металлов, и это не позволяет добиться такой же эффективности соединений, как для традиционных материалов. Поэтому при разработке конструктивно-технологических решений, обеспечивающих повышение несущей способности соединения, необходимо выполнить следующие условия: повысить прочность на смятие и срез, снизить коэффициенты концентрации напряжений возле отверстий под крепежные элементы, предотвратить преждевременное расслоение композиционного материала, исключить микроподвижность на границе контакта «композиционный материал – металл», ограничить развитие трещин и др.

Наиболее распространенными конструктивными способами повышения несущей способности деталей из КМ с отверстиями является местное усиление материала в зоне отверстий [2, 5]. Местное усиление материала получают путем утолщения материала и изменением жесткости слоев в зоне отверстий, армированием изотропной высокопрочной фольгой или релаксационной прокладкой, а также формированием высокомодульных и низко модульных стоперов трещин.

Однако местное усиление обладает рядом недостатков [5]: невозможность применения серийного листового материала для изготовления деталей, сложная технология производства, сложность контроля качества склейки КМ с металлической лентой, наличие значительных температурных напряжений в зоне стыка при тепловой обработке и при эксплуатации в условиях повышенных температур.

Одним из самых эффективных и доступных способов повышения несущей способности композиционных материалов на смятие и срез является уменьшение диаметра крепежных элементов. Например, замена одного болта четырьмя болтами меньшего диаметра позволяет повысить несущую способность на смятие в 2 раза, а на срез – в 4 раза [2]. Вместе с тем увеличение количества болтов увеличивает массу и трудоемкость изготовления конструкций из композитов.

Односрезные соединения отличаются тем, что в КМ возникают значительные межслойные напряжения, вызванные реакцией детали на нагружение болта (рис. 1,а). Для восприятия этих напряжений и рассредоточения их по большей площади к КМ приклеивают или приформовывают специальные шайбы (рис. 1,б), снабженные заостренными шипами.

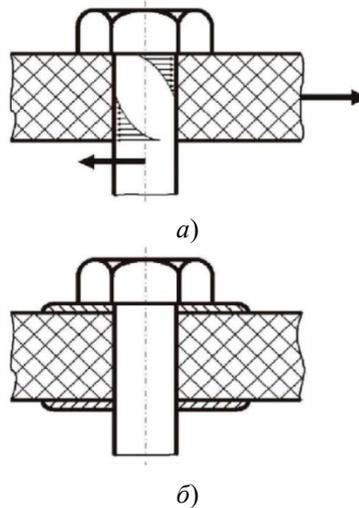


Рис. 1. Конструктивно-технологические решения по повышению прочности на смятие болтовых соединений: а – реакция детали на смятие; б – болтовое соединение с приклеенной шайбой

Вместе с тем постановка таких шайб имеет существенный недостаток. Так, при изменении температуры в клеевом слое возникают термические напряжения, которые с одной стороны детали обязательно суммируются с реакцией крепежа. Кроме того, эти конструкторско-технологические решения увеличивают трудоемкость и стоимость, поэтому применяются только для ответственных соединений.

Для повышения эффективности соединений используют установку специальных болтов и гаек (рис. 2), снабженных шипами для повышения прочности их взаимодействия с КМ, рассредоточения усилий и увеличения межслойной несущей способности. Однако для применения этих конструкторско-технологических решений необходимо довести до серийного уровня технологию интегрального формования композитных деталей с такими крепежными элементами.

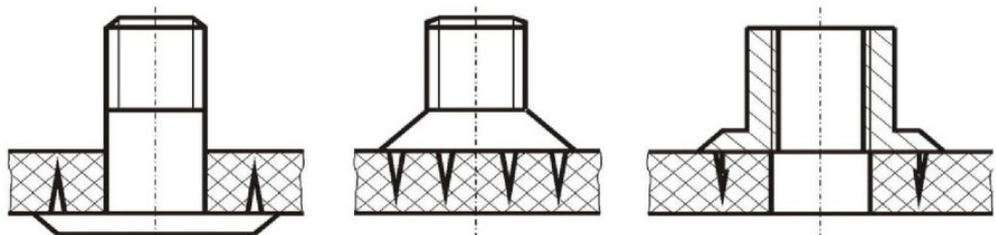


Рис. 2. Специальные крепежные элементы, приформовываемые к композитной детали

Получение отверстий под постановку болтов, как правило, осуществляют сверлением. После сверления стенка отверстия представляет собой микроворсистую поверхность из-за различного характера разрушения волокон и связующего при резании. Установка крепежного элемента в такое отверстие приводит в процессе эксплуатации к двум явлениям. Во-первых, вибрации и знакопеременные нагрузки разрушают ворс и соединение становится микроподвижным, а во-вторых, мельчайшие частицы волокон, будучи сильными абразивами, усиливают разрушение как композита, так и крепежного элемента.

Для минимизации влияния ворсистости поверхности отверстия применяют втулки (рис. 3), устанавливаемые на клеевых композициях [2]. В этом случае крепежный элемент контактирует с металлической втулкой, склеивание которой с КМ детали резко снижает ее микроподвижность, а значит, и «выделение» ворса со стенок отверстия. При этом несколько увеличивается несущая способность КМ на смятие, поскольку диаметр втулки больше диаметра крепежного элемента. Кроме того, металлическая втулка позволяет снизить концентрацию напряжений на границе отверстия за счет перераспределения напряжений, повысить разрушающее напряжение соединения на разрыв, обеспечить стабильность осевой затяжки болтового соединения, защитить стенки отверстия от действия агрессивных сред.

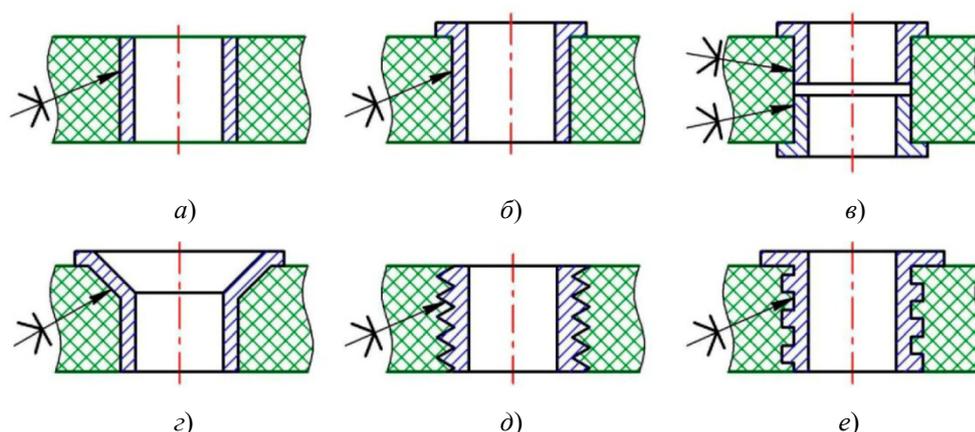


Рис. 3. Типы металлических втулок, используемых для повышения контактной прочности: *a* – цилиндрическая втулка; *б* – втулка с фланцем; *в* – составные втулки; *г* – втулка под потайное соединение; *д* – втулка с заостренными шипами; *е* – втулка с цилиндрическими шипами

В работе [6] приведены исследования влияния жесткости клея и зазора между втулкой и листовой заготовкой на уровень напряжений вокруг отверстия. Результаты, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что с увеличением жесткости клея G с 3000 до 30 000 МПа окружные напряжения снижаются приблизительно на 10 % (со 110,7 до 101,6 МПа). С увеличением зазора наблюдается увеличение концентрации напряжений. Наличие клея позволяет существенно сгладить концентрацию напряжений, связанную с наличием зазора при установке втулки, и приближает уровень напряженно-

деформированного состояния к уровню при установке втулки без зазора, т.е. к идеальному случаю. Вместе с тем, как отмечается в работе, совместная работа подкрепляющей втулки, клеевой прослойки и стенок отверстия в листовой заготовке происходит только до определенного уровня напряжений, равного 15–20 % от разрушающей нагрузки, после чего клей перестает выполнять эту функцию и напряженно-деформированное состояние изменяется. Исследования показали, что участок совместной работы втулки, клеевой прослойки и листовой заготовки не превышает 15–20 % от разрушающей нагрузки для образцов с $h/d = 1,0$ и 7–12 % для образцов с $h/d = 3,0$ (h – высота детали; d – диаметр отверстия). При дальнейшем увеличении нагрузки происходил разрыв клея между втулкой и пластиной по линии действия силы, в результате чего появлялся зазор, картина напряженно-деформированного состояния резко менялась и была близка к состоянию, полученному для пластины с обыкновенным болтовым соединением.

Разрушение клеевой прослойки происходит в результате действия на контуре отверстия в заготовке радиальных напряжений (рис. 4), возникающих в процессе действия растягивающих напряжений [7]:

$$\sigma_r = \left[\kappa - \nu_{12} + N(\sin^2 \varphi + \kappa \cos^2 \varphi) \right] \frac{U_r}{Rq},$$

$$k = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}, \quad N = \sqrt{2(\kappa - \nu_{12}) + \frac{E_1}{G_{12}}}, \quad q = \frac{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{E_2 + G_{12}},$$

где U_r – величина радиального перемещения; R – радиус отверстия в листовой заготовке; E_1 и E_2 – модули упругости материала листовой заготовки во взаимно-перпендикулярных направлениях; ν_{12} , ν_{21} – коэффициенты Пуассона; G_{12} – модуль сдвига.

Таблица 1

Влияние наличия зазора и жесткости клея на коэффициент концентрации напряжений (результаты численного эксперимента)

Способ установки клея	σ_r^{\max}		σ_θ^{\max}	
	МПа	%	МПа	%
С зазором 0,23 %	173,8	106,6	169,4	168
На клею с жесткостью G , МПа				
3000	170	101,37	110,7	109,8
10 000	168,9	100,7	103,7	102,9
20 000	168,6	100,55	102,1	101,3
30 000	168,5	100,5	101,6	100,8
Без зазора	168,3	100	100,8	100

В работе С. Г. Лехницкого [7] рассматривается задача о подкреплении стенок отверстий в ортотропной пластине абсолютно жестким и упругим яд-

рами. Результаты теоретических исследований сопоставляются с результатами для аналогичной пластины со свободным отверстием. На рис. 4 показаны результаты исследований для одностороннего и двухстороннего растяжений. Из графиков видно, что при наличии жесткого ядра наибольшим является напряжение σ_r на концах диаметра, параллельного растягивающим усилиям; оно равно $\sigma_r = 1,237P$. При отсутствии ядра наибольшим является напряжение σ_θ . Оно равно $\sigma_\theta = 5,453P$ и действует на концах диаметра, перпендикулярного к направлению растягивающих усилий. В случае упругого ядра величина наибольшего тангенциального напряжения равна $\sigma_\theta = 1,684P$ и действует на концах диаметра, нормального к направлению усилий. Отмечается, что при растяжении пластины в направлении, для которого модуль упругости E_1 является наименьшим, качественная картина распределения напряжений не меняется.

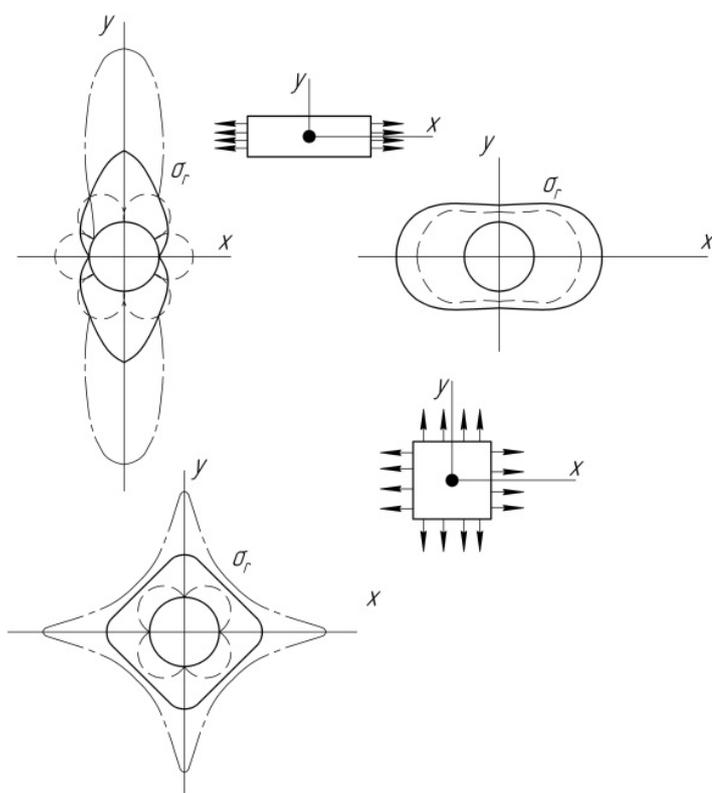


Рис. 4. Влияние подкрепляющего ядра на напряженное состояние по периметру отверстия: _____ упругое ядро; _____ жесткое ядро; ядро отсутствует

Проведенный анализ показывает, что подкрепление стенок отверстий втулками является эффективным способом повышения несущей способности механических точечных соединений. Вместе с тем работ по исследованию технологии постановки подкрепляющих втулок в настоящее время очень мало. Предлагаемые в работах способы постановки втулки не обеспечивают

эффективность подкрепления. Это говорит о том, что для широкого промышленного использования данного способа повышения несущей способности соединений требуется разработка новых, более эффективных способов постановки подкрепляющей втулки и проведение исследований в этой области.

Одним из путей увеличения этапа совместной работы соединения с подкрепляющей втулкой является уменьшение (или устранение) поля радиальных растягивающих напряжений по периметру отверстия при эксплуатационных нагрузках. Величину радиальных напряжений можно уменьшить путем предварительного (на этапе постановки втулки в отверстие) создания в зоне их действия переменного поля радиальных сжимающих напряжений.

Разработан способ [5] постановки подкрепляющего элемента в отверстие листовой заготовки из КМ. Способ постановки втулки заключается в осевом пластическом сжатии подкрепляющего элемента, в процессе осуществления которого его внутренний диаметр остается неизменным, а по внешнему диаметру осуществляется преимущественная радиальная раздача совместно с соответствующими участками листовой заготовки с образованием на границе отверстия переменного поля радиальных сжимающих напряжений (рис. 5).

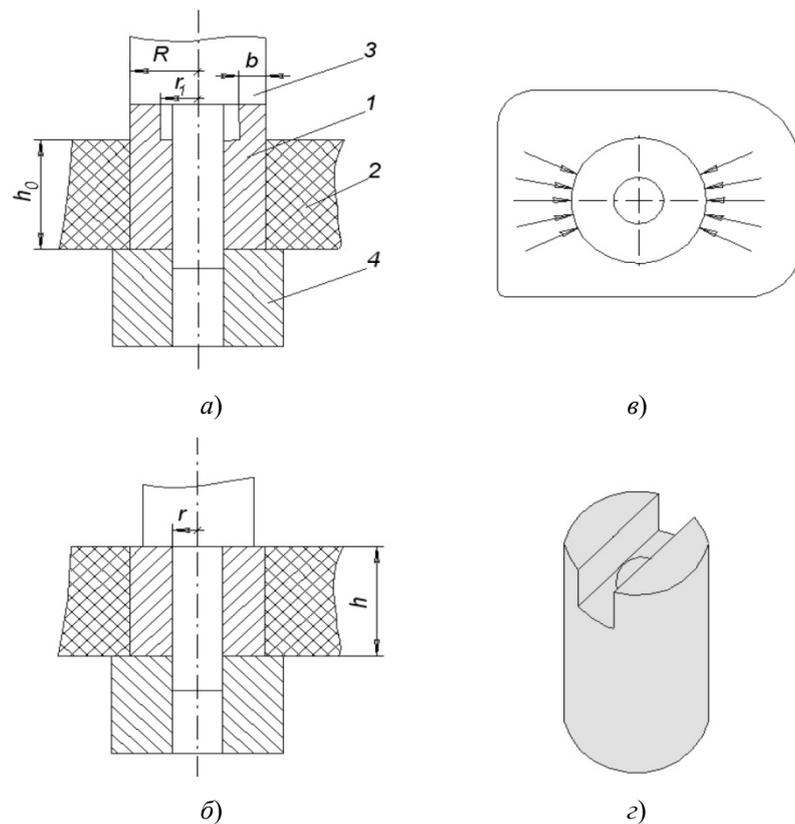


Рис. 5. Способ постановки подкрепляющего элемента: *a, б* – процесс осадки подкрепляющего элемента; *в* – поля радиальных сжимающих напряжений; *г* – подкрепляющий элемент; *1* – подкрепляющий элемент; *2* – листовая заготовка; *3* – пуансон; *4* – подпирательный элемент

Радиальные перемещения по внешнему контуру подкрепляющей втулки определяются из соотношений, полученных в работе [4]:

$$U_r = \frac{1}{2} a R \left(1 - \frac{r^2}{R^2 \cos(\phi)^2} \right), \quad (1)$$

где r – внутренний радиус подкрепляющей втулки; R – внешний радиус подкрепляющей втулки.

Варьируемый параметр a определяется из выражения

$$a = \left[\frac{\sqrt{3}(E_t)^{1-n} \sigma_b (1+n) \psi_1 B_1}{\sigma_b h_0 B_2 + 0,433(E_z)^{1-n} h B_3 SLM} \right]^{1-n}, \quad (2)$$

где σ_b – предел прочности материала втулки; E_t – относительное сужение, отвечающее образованию устойчивой шейки [8]; $n = \frac{E_t}{(1+E_t)}$; h – высота листовой заготовки; h_0 – первоначальная высота подкрепляющей втулки; $E_z = (h_0 - h) / h_0$;

$$B_1 = 2,66[R^3 - (r_1)^3] - 4(r_1)^2(R - r_1) + \frac{Sh^2 B_4}{\pi \psi_1}; S = \frac{\pi[R^2 - (r_1)^2]}{2F_{сесм}}; L = E_t^n(1+n);$$

$$B_2 = 3[R^2 - (r_1)^2] - \frac{r^4}{[R^2 - (r_1)^2]}; B_3 = \frac{k - v_{12} + N(\sin(\psi)^2 + k \cos(\psi)^2)}{qt},$$

$$B_4 = \frac{\pi R}{t} - r_1 \ln \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{t} + \frac{\pi}{2t} \right) \right); M = \left[\left[R^2 + 2(r_1)^2 - \frac{(r_1)^4}{R^2} \right] + 2\psi_2 h \left[R - \frac{(r_1)^2}{R} \right] \right];$$

ψ_1 – эмпирический коэффициент, учитывающий состояние трущихся поверхностей и форму очага деформации, $\psi_1 = \mu_1 + \frac{1}{8} \frac{b}{h} (1 - \mu) \sqrt{\mu_1}$; μ_1 – коэффициент трения; $\psi_2 = \mu_2 + \frac{1}{8} \frac{b}{h} (1 - \mu_2) \sqrt{\mu_2}$; μ_2 – коэффициент трения в контакте между втулкой и стенкой отверстия листовой заготовки; $t = \frac{180^\circ}{\alpha}$; α – угол охвата выступа; r_1 – минимальное расстояние от центра втулки до внутренней стенки сегмента.

Таким образом, зная варьируемый параметр a из соотношения (1), можно определить зависимость деформированного состояния подкрепляющего элемента по внешнему контуру подкрепляющей втулки от ее конструктивных параметров.

Следует отметить, что величина радиальной раздачи отверстия в листовой заготовке должна быть строго ограничена и не превышать максимальной величины натяга для данного КМ. В работе [5] представлена методика опре-

деления максимального радиального натяга для листовых заготовок из КМ на основе использования критерия прочности Дж. Марина.

Для определения напряженно-деформированного состояния изотропной пластины с подкрепленным отверстием использовались аналитические соотношения, полученные в работах [9, 10]. С учетом граничных условий (рис. 6) по контуру подкрепляющей втулки с пластиной ($r = R_1$)

$$\sigma_r = \sigma_r^1, \tau_{r\phi} = \tau_{r\phi}^{(1)} = 0; \quad (3)$$

$$V_r = V_r^1 = \frac{pR}{\mu}(q + \varepsilon \cos \theta),$$

$$q \geq 0, \varepsilon \geq 0; \quad (4)$$

напряжения и деформации по контуру отверстия и в «полевых точках» определялись из следующих выражений:

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[\left(1 - \frac{1}{2\rho^2} \beta_{-1} \right) + \left(1 - \frac{2\alpha_{-1}}{\rho^2} - \frac{3}{2\rho^4} \beta_{-3} \right) \cos 2\theta \right];$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[\left(1 + \frac{\beta_{-1}}{2\rho^2} \right) - \left(1 - \frac{3}{2\rho^4} \beta_{-3} \right) \cos 2\theta \right];$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2} \left[1 + \frac{\alpha_{-1}}{\rho^2} + \frac{3}{2\rho^4} \beta_{-3} \right] \sin 2\theta; \quad (5)$$

$$V_r = \frac{pR}{8\mu} \left\{ \left[(\chi - 1)\rho + \frac{\beta_{-1}}{p} \right] + \left[2\rho + (\chi + 1) \frac{\alpha_{-1}}{\rho} + \frac{1}{\rho^3} \beta_{-3} \right] \cos 2\theta \right\};$$

$$V_\theta = \frac{pR}{8\mu} \left[-2\rho - (\chi - 1) \frac{\alpha_{-1}}{\rho} + \frac{1}{\rho^3} \beta_{-3} \right] \sin 2\theta,$$

где σ_r и $\sigma_r^{(1)}$ – радиальные напряжения (индекс сверху в скобках у составляющих напряжений и перемещений указывает на принадлежность к подкрепляющей втулке, эта же величина без индексов относится к заготовке); $\tau_{r\phi}$ и $\tau_{r\phi}^1$ – касательные напряжения; v_r и $v_r^{(1)}$ – радиальные перемещения точек контура; g и ε – малые величины порядка упругих перемещений.

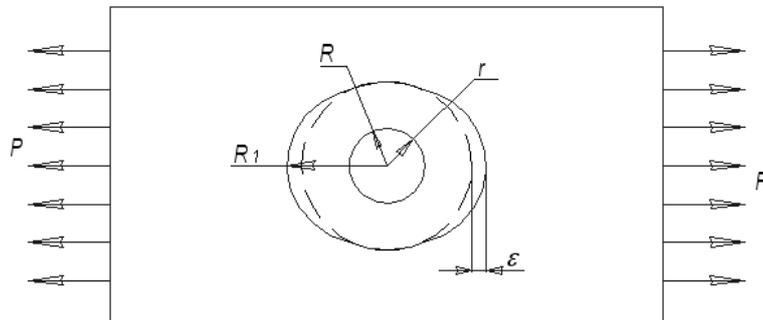


Рис. 6. Граничные условия при решении контактной задачи

При этом неизвестные параметры уравнений (5) определялись из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
 a_{-1} &= \frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 [\delta_2 + n^6 \delta_3] - \varepsilon [2\delta_2 - 6\delta_4 n^4 + 2(\delta_3 + 3\delta_4) n^6] \right\}; \\
 a_1 &= \frac{n^2}{D_0} (\delta_1 - 8q); \\
 a_3 &= -\frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 n^4 (n^2 - 1) \delta_2 + \varepsilon [2\delta_2 + 2n^2 (\delta_3 - \delta_4) + 2n^4 (\delta_4 - 1)] \right\}; \\
 b_{-3} &= -\frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 [\delta_2 + n^4 \delta_3] \delta_2 + \varepsilon [2(\delta_3 - \delta_4) + 8n^2 \delta_4 - 2n^4 (3\delta_4 + \delta_3)] \right\}; \\
 b_{-1} &= \frac{2}{D_0} (\delta_1 - 8q); \\
 \beta_{-1} &= \frac{2}{D_0} [\delta_4 + \delta_2 + n^2 (\delta_3 - \delta_4) + 8(n^2 - 1)q]; \\
 b_1 &= \frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 [\delta_2 (4 - 3n^2) + n^6 \delta_3] n^2 - \varepsilon [8\delta_2 + 6n^2 (\delta_3 - \delta_4) + 2n^6 (\delta_3 + \delta_4)] \right\}; \\
 \alpha_{-1} &= 2 - \frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 [\delta_2 (3n^6 - 6n^4 + 4n^2 - 1) + n^6 (n^2 - 1) \delta_3] - \varepsilon [2(n^8 - 4n^4) \delta_3 + \right. \\
 &\quad \left. + 6n^4 (\delta_3 - \delta_2) + 2(4n^2 - 1) \delta_2] \right\}; \\
 \beta_{-3} &= -2 + \frac{2}{D_1} \left\{ \delta_1 [(4n^6 - 7n^4 + 4n^2 - 1) \delta_2 + n^4 (n^4 - 1) \delta_3 + \varepsilon [2(n^8 - 4n^6) \delta_3 + \right. \\
 &\quad \left. + 6n^4 (\delta_3 - \delta_2) + 2(4n^2 - 1) \delta_2] \right\} \\
 D_1 &= n^2 \delta^4 [\delta_2 (3n^4 - 6n^2 + 4) + n^6 \delta_3] + (\delta_3 - \delta_1) [\delta_2 + n^2 \delta_3]; \\
 D_0 &= 2\delta_2 - n^2 [\delta_2 - \delta_3],
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$n = \frac{R}{R_1}$, $\rho = \frac{r}{R}$ – безразмерный полярный радиус;

$$\delta_1 = 1 + \chi, \delta_2 = \frac{\mu}{\mu_1} - 1, \delta_3 = 1 + \chi_1 \frac{\mu}{\mu_1}, \delta_4 = \chi + \frac{\mu}{\mu_1},$$

где $\chi = \frac{3-\nu}{1+\nu}$, $\chi_1 = \frac{3-\nu_1}{1+\nu_1}$; ν и ν_1 – коэффициенты Пуассона материала пластины и втулки соответственно; μ и μ_1 – модули сдвига материала пластины и втулки соответственно.

Для проверки возможности конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния по контуру соединения с подкреплением пластинки из КМ была проведена проверка точности численного расчета, полученного с использованием программного продукта – Ansys Workbench (расчетный модуль – Static structural) (рис. 7), с достаточно простой моделью из этого класса, к которой применимо аналитическое решение.

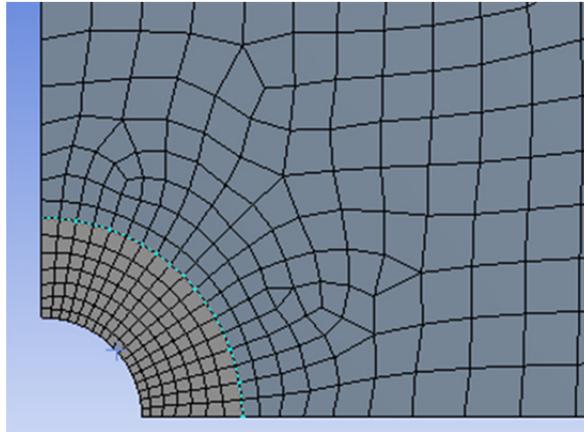


Рис. 7. Конечно-элементная модель пластинки с втулкой

В качестве упрощенной модели рассматривалась задача на одноосное растяжение изотропной пластинки с отверстием, в которое впаяно жесткое ядро (рис. 8). При этом усилие растяжения P составляло 1000 Н, что обеспечивает напряжения в пластине 30 МПа. Для аналитического определения радиальных напряжений по контуру отверстия с подкреплением использовалось [6] следующее аналитическое выражение:

$$\sigma_r = p(1/1 + \nu + 2/3 - \nu \cos 2\varphi),$$

где ν – коэффициенты Пуассона изотропного материала.

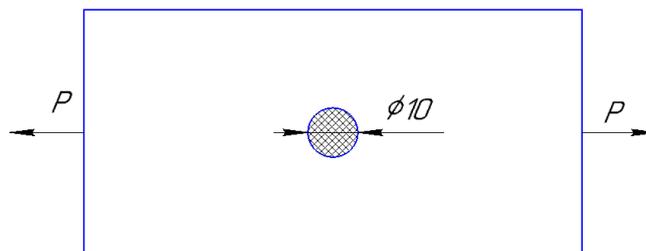


Рис. 8. Одноосное растяжение изотропной пластинки с отверстием, в которое впаяно жесткое ядро

Проведенные исследования показали, что программный продукт – Ansys Workbench (расчетный модуль – Static structural) – качественно и с достаточно высокой точностью (в пределах 1–2 %) дает результат, совпадающий с рассмотренной упрощенной моделью. Увеличение погрешности чис-

ленных расчетов для углов $(70...90)^\circ$ (рис. 9) связано с выбором размера конечного элемента и, как показывает расчет, может быть уменьшено с уменьшением его размера.

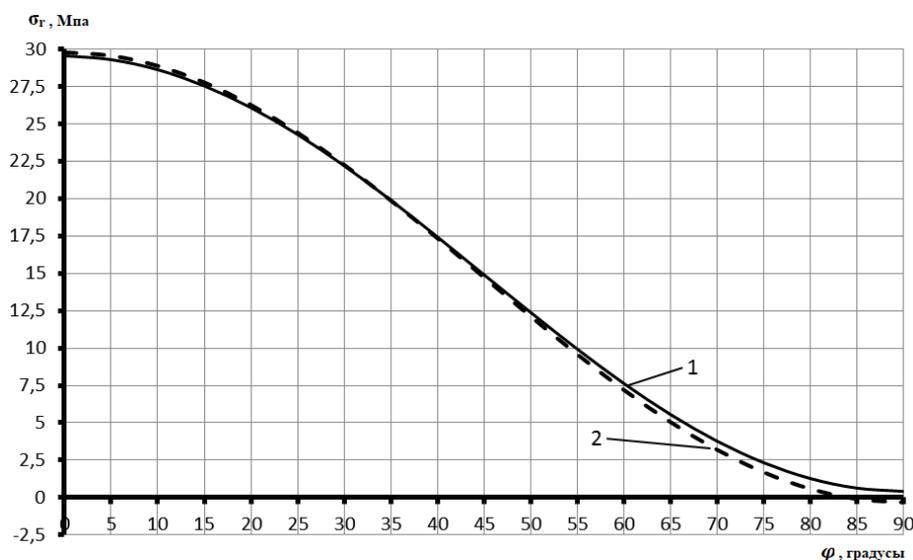


Рис. 9. Радиальные напряжения по контуру отверстия с подкреплением в изотропной пластине: 1 – аналитический расчет; 2 – конечно-элементное моделирование

Таким образом, доказана возможность применения использованного программного продукта к поставленной модели с точным осесимметричным исполнением отверстия. Это открывает возможность применения программного продукта Ansys Workbench (расчетный модуль – Static structural) для анализа влияния погрешности неосесимметричного исполнения таких отверстий в реальных производственных технологиях на распределение напряжений в системе и, как следствие, на долговечность эксплуатации таких сборных конструкций, что позволяет впервые расчетным путем обосновать допуски на их исполнение.

В процессе исследования напряженно-деформированного состояния при одноосном растяжении пластинки рассматривались два случая:

1. Напряженно-деформированное состояние в пластине с вклеенной втулкой от действия внешней одноосной растягивающей нагрузки $P = 1000$ Н, что обеспечивает напряжения в пластине 30 МПа;

2. Напряженно-деформированное состояние от суммы монтажных напряжений по контуру отверстия с подкреплением с напряжениями и деформациями, обусловленными преимущественной раздачей подкрепляющей втулки и внешней нагрузкой растяжения пластины.

В процессе экспериментальных исследований использовалась изотропная пластина толщиной 4,0 мм. При этом наружный диаметр втулки был равен 10,0 мм, внутренний диаметр 5,0 мм. Материал пластины имел следующие характеристики: $E_1 = 44\,700$ МПа, $E_2 = 44\,700$ МПа, $G_{12} = 16\,000$ МПа, $\nu_{12} = 0,35$, $\nu_{21} = 0,35$. Материал втулки – алюминиевый сплав с характери-

ками: $E = 70\,000$ МПа, $\nu = 0,3$. В процессе установки втулки в пластину внешняя поверхность втулки покрывалась клеем, затем втулка вставлялась в отверстие пластины и запрессовывалась. При запрессовке клей находился в жидкой фазе. Диаметр запрессованной втулки изменяется от 10 до 10,2 мм, от 0 до 90° и обладает формой эллипса. Результаты исследований, представленные на рис. 10 и 11, дают возможность оценить напряженное состояние по контуру отверстия с подкреплением и в «полевых» точках.

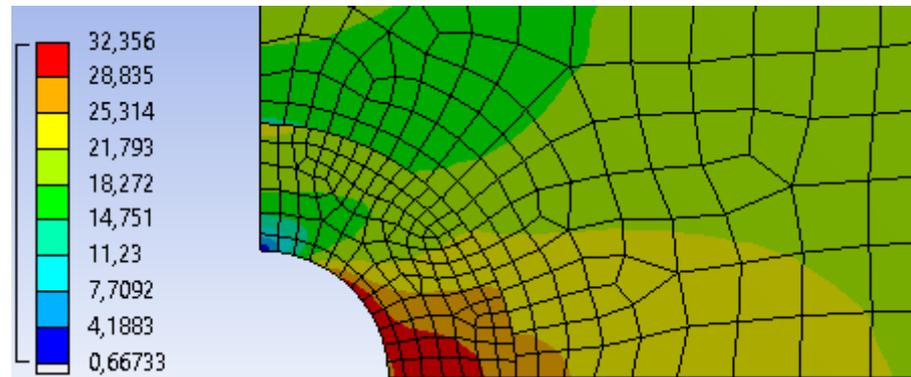


Рис. 10. Эквивалентные напряжения (по критерию Мизеса), возникающие в пластине с клеенной втулкой от действия внешней растягивающей нагрузки

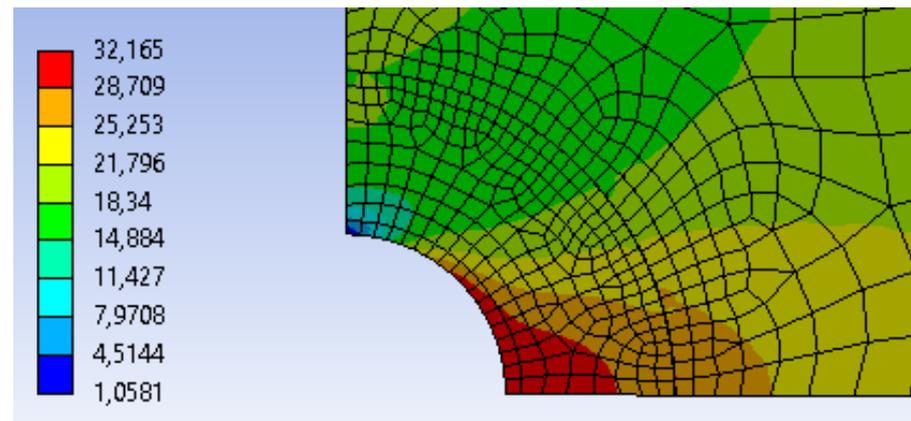


Рис. 11. Эквивалентные напряжения (по критерию Мизеса), возникающие в пластине с клеенной и запрессованной втулкой от действия внешней растягивающей нагрузки

На рис. 12 представлены результаты сравнения напряженного состояния на границе отверстия с подкреплением, полученным путем клеивания и путем клеивания с преимущественной раздачей подкрепляющего элемента.

Из приведенных графиков видно, что в случае запрессованной втулки напряжения на границе отверстия существенно выравниваются. Это позволяет в известных пределах управлять напряжениями на границе отверстия, что особенно важно для композиционных материалов с анизотропными свойствами.

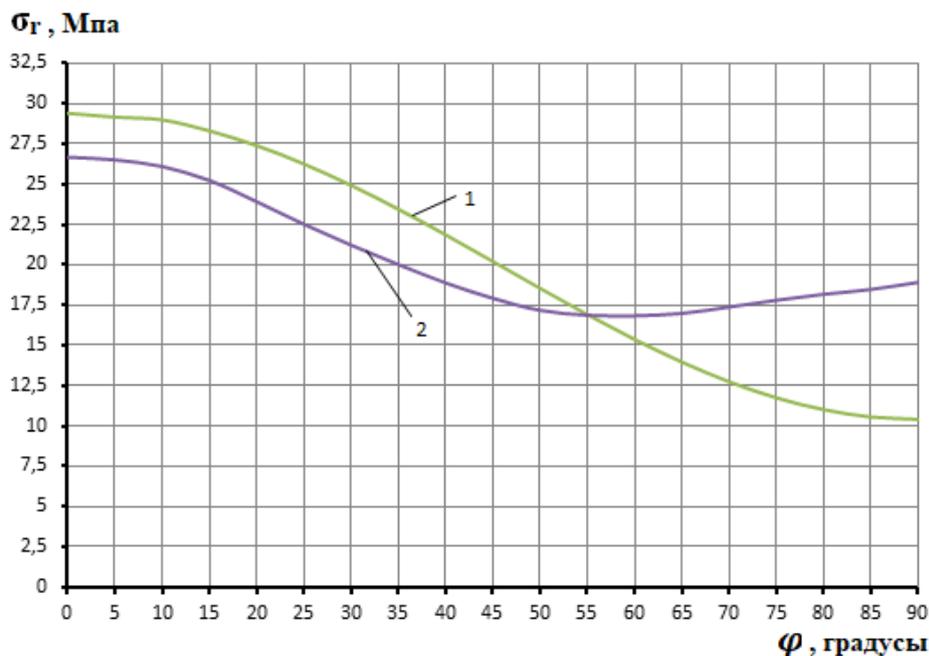


Рис. 12. Напряженное состояние на границе отверстия с подкреплением, полученным путем вклеивания (1) и путем вклеивания с преимущественной раздачей подкрепляющего элемента (2)

Проведенные исследования показали:

1. Разработанный способ постановки втулки значительно снижает напряженное состояние по периметру отверстия с подкреплением.

2. С использованием разработанного способа появилась возможность получения более равномерного распределения напряжений в пластине за счет введения переменного натяга. Это позволяет моделировать и управлять напряженно-деформируемым состоянием в пластине и подкрепляющем элементе при эксплуатационных нагрузках.

3. Разработанная конечно-элементная модель и методика расчета показали хорошее согласование результатов с известными аналитическими решениями и позволяют с высокой точностью определять напряженное состояние по контуру силовой точки в анизотропных композиционных материалах.

Библиографический список

1. Ендогур, А. И. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композиционных материалов / А. И. Ендогур, В. А. Кравцов, В. Н. Солошенко // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – № 72.
2. Гагауз, П. М. Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика : учебник / П. М. Гагауз, Ф. М. Гагауз, Я. С. Карпов, С. П. Кривенда ; под общ. ред. Я. С. Карпова. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиац. ин-т», 2015. – 672 с.
3. Вашуков, Ю. А. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов : учеб. пособие / Ю. А. Вашуков. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 67 с.

4. Радченко, С. Г. Математическое моделирование прочности болтовых соединений композиционных материалов типа углепластиков / С. Г. Радченко, С. Н. Лапач, А. З. Двейрин, Е. Т. Василевский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 63.
5. Вашуков, Ю. А. Моделирование деформированного состояния подкрепляющего элемента при его постановке в отверстие листовой детали из композиционного материала / Ю. А. Вашуков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004. – № 2.
6. Сироткин, О. С. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники / О. С. Сироткин, В. И. Гришин, В. Б. Литвинов // Машиностроение. – 2006.
7. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – М. : Наука, 1977. – 415 с.
8. Семин, М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность / М. И. Семин, Д. В. Стреляев. – М. : МГАТУ «ЛИАТМЭС», 1996. – 288 с.
9. Вашуков, Ю. А. Напряженно-деформированное состояние изотропной пластинки с подкрепленным отверстием при растяжении / Ю. А. Вашуков // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения : материалы и доклады Международной науч.-техн. конф. – Комсомольск на Амуре, 2013. – Ч. 2. – С. 278–282.
10. Савин, Г. Н. Пластинки, подкрепленные составными кольцами и упругими накладками / Г. Н. Савин, В. И. Тульчий. – Киев : Наука думка, 1971. – С. 268.

Вашуков Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра производства летательных
аппаратов и управления качеством
в машиностроении,
Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева
E-mail: vashukov@ssau.ru

Vashukov Yuri Alexandrovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of production
of aircraft and quality management
in mechanical engineering,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolyov

Климов Егор Андреевич

магистрант,
Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С. П. Королева
E-mail: wenzelw@yandex.ru

Klimov Yegor Andreyevich

undergraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolyov

УДК 621.961.2

Вашуков, Ю. А.

Анализ и моделирование напряженно-деформированного состояния отверстий с подкреплением в листовых деталях из композиционных материалов / Ю. А. Вашуков, Е. А. Климов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 89–104.