

Математическое моделирование процесса образования отверстия с подкреплением в композитной конструкции

Ю.А. Вашуков¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. С помощью представленной конечно-элементной модели проведены исследования деформированного состояния процесса постановки подкрепляющей втулки в отверстие детали, изготовленной из полимерного композиционного материала. Для определения усилия и работы процесса постановки, а также зависимости конструктивных параметров на деформированное состояние втулки по контуру отверстия с подкреплением разработана математическая модель.

1. Введение

Использование композиционных материалов (КМ) в конструкциях [1,2] летательных аппаратов и наземного оборудования позволило создать элементы конструкции с заранее заданными свойствами, снизить трудоемкость при обработке и уменьшить их массу на (15 – 30) %, а в отдельных случаях и до 50 %. О перспективности применения КМ свидетельствовало постоянное расширение в нашей стране и за рубежом номенклатуры как сложных технических систем (самолеты, вертолеты, ракеты), так и их элементов (фюзеляж, крыло, стабилизаторы, рули, несущие винты, корпуса ракетных двигателей) [2]. Одной из важных направлений, от которого зависит эффективность использования этих материалов в аэрокосмической технике является формирование мест соединений в конструкциях из КМ [3,4].

2. Постановка проблемы

При обработке изделий из КМ возникают значительные трудности технологического характера. Существенные отличия физико-механических свойств КМ от аналогичных свойств традиционных материалов и сплавов обусловило то, что эти материалы хуже, чем металлы, приспособлены к передаче усилий (особенно сосредоточенных) с одного элемента на другой. Несоответствие между механизмом передачи усилий в соединениях и механизмом включения в работу отдельных слоев элементов композиции вызывали трудности создания механических точечных (заклёпочных и болтовых) соединений из конструкций из материалов, армированных волокнами. Это приводило к тому, что большинство разрушений конструкций из КМ (60 – 85%) происходило в зоне соединений. Одним из способов повышения несущей способности соединений является постановка промежуточной подкрепляющей втулки, позволяющей перераспределить напряжения и снизить концентрацию напряжений на границе отверстия [4].

Автором разработан способ постановки втулки [5], заключающийся во вклеивании и осевом пластическом сжатии подкрепляющего элемента с образованием на границе соединения переменного поля радиальных сжимающих напряжений. Это позволяет значительно снизить

радиальные растягивающие напряжения на границе «подкрепляющий элемент - листовая заготовка» при эксплуатационных нагрузках и сохранить, тем самым, клеевую прослойку между стенкой отверстия в листовой заготовке и подкрепляющей втулкой.

В работе [5] проведены исследования по влиянию деформированного состояния подкрепляющего элемента на напряжённое состояние, возникающее в листовой заготовке после постановки в отверстие крепёжного элемента и в процессе действия растягивающих напряжений. Однако в процессе эксплуатации изделий с подкрепленными отверстиями необходимо знать форму и распределение деформаций в подкрепляющем элементе, величину затраченной работы и усилие, необходимые для осевого сжатия элемента, высоту распространения пластической деформации.

С помощью конечно-элементного моделирования проведены экспериментальные исследования по определению геометрических параметров подкрепляющего элемента и анализ деформированного состояния подкрепляющего элемента. В качестве материала листовой заготовки использовался углепластик марки КМУ-7Т толщиной 4,0 мм, в качестве материала втулки использовались алюминиевый и титановый сплавы. В процессе экспериментальных исследований использовались втулки, геометрические размеры которых указаны на рисунке 1.

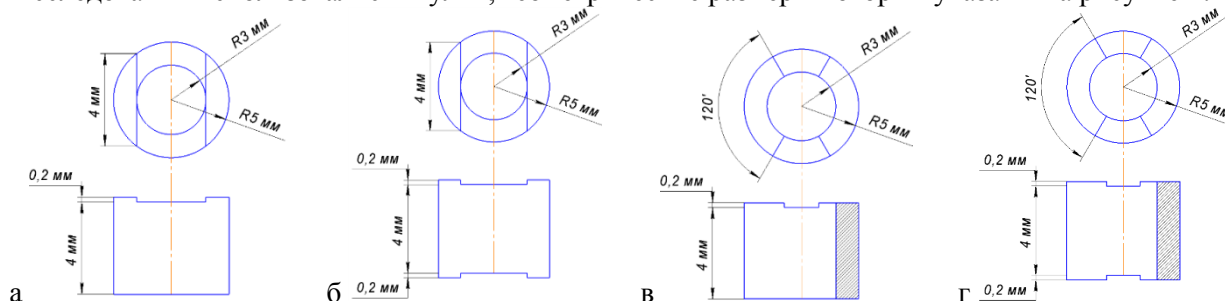


Рисунок 1. Геометрические параметры подкрепляющих втулок, используемых в экспериментальных исследованиях.

Анализ деформированного состояния запрессованных втулок, указанных на рисунке 1 а, б показал неравномерность деформации по высоте пластины, что недопустимо, так как это приводит к неравномерности поля напряжений по высоте пластины из ПКМ. С учётом указанных недостатков был опробован тип втулки, представленный на рисунке 4в. Анализ деформированного состояния показал, что ситуация в целом улучшается, однако равномерной деформации не наблюдается. Исследование деформированного состояния осажённой втулки с двухсторонними выступами (рисунок 1г) показало, что в зонах радиальной раздачи деформации по внешнему контуру втулки равномерны по высоте (рисунок 2), что позволяет получить равномерное поле напряжений по высоте в пластине.

3. Постановка математической модели

Для нахождения усилия, необходимого для осадки втулки с сегментами, использовался энергетический метод [3]. Работа внешних сил $A\sigma$, нормальных к торцу сегмента, записывалась в виде

$$A\sigma = \iint_F \sigma_z U dS = UP, \quad (1)$$

где U - величина деформирующего хода.

Из условия равенства работ внешних сил $A\sigma$ и сил деформирования втулки A_D получим

$$P = A_D / U. \quad (2)$$

Для определения A_D задавались граничные условия на внешнем контуре втулки. На верхнем и нижнем (под сегментом) торцах втулки, а также по её внешней поверхности действуют силы трения. В плоскости контакта пластической зоны A и жесткой зоны B возникают силы среза. Со стороны листовой заготовки действуют силы противодействия, которые по отношению к

втулке являются внешними, однако работа этих сил может быть отнесена к работе сопротивлений. Втулка принималась пластическим телом с нелинейным упрочнением, а листовую заготовку анизотропной средой, подчиняющейся обобщенному закону Гука.

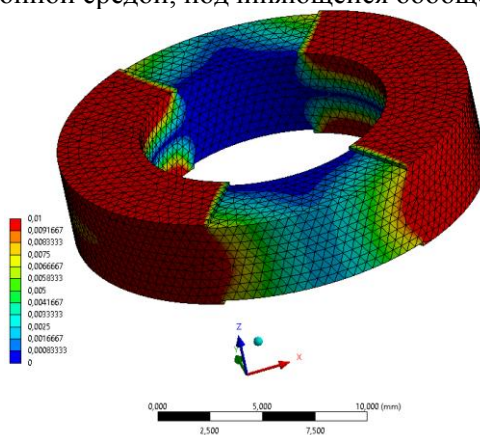


Рисунок 2. Деформированное состояние подкрепляющей втулки с двухсторонними выступами.

Полная работа деформации A_D складывается из работы внутренних сил $A_{вн}$, идущих на изменение формы втулки, работы сил трения $A_{ТР,Т}$, по торцам сегмента, работы сил среза $A_{СР}$ между пластической и жесткой зонами, а также работы сил сопротивления листовой заготовки $A_{сопр}$.

$$A_D = A_{вн} + A_{ТР} + A_{СР} + A_{сопр}. \quad (3)$$

Учитывая суммируемые силы (3) полная работа деформации подкрепляющей втулки имела следующий вид

$$A_D = \frac{\sigma_6 U^{1+n} R}{(1-\varepsilon_t) \varepsilon_t^n} \left[\frac{RD_1}{h^n (1+h)} + \frac{2\psi R^2 D_2}{\sqrt{3} h^{1+n}} + \frac{h^{1-n} D_3}{\sqrt{3}} \right] + \frac{U^2 R \left[k - \nu_{12} + \frac{N}{2}(k+1) + \frac{N}{\pi}(k-1) \right]}{4g} \left[\frac{RD_4}{h} + \Psi_2 D_1 \right] \quad (4)$$

$$D_1 = \left(\frac{\pi}{t} \operatorname{tg} \frac{\pi}{t} \right);$$

$$D_2 = \frac{\pi}{3t} + \frac{\sin \frac{\pi}{t}}{3 \cos^2 \frac{\pi}{t}} + \frac{1}{3} \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2k} \right) \right| - \operatorname{tg} \frac{\pi}{k}.$$

$$D_3 = \frac{\pi}{t} - \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2k} \right) \right|;$$

$$D_4 = \frac{\pi}{t} - 2 \operatorname{tg} \frac{\pi}{t} + \left(\operatorname{tg} \frac{\pi}{t} + \frac{\operatorname{tg}^3 \frac{\pi}{t}}{3} \right);$$

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{2} \varepsilon_z \cdot r \left(1 - \frac{r^2}{r^2 \cos^2 \varphi} \right); \\
 \varepsilon_z &= (h - h_0) / h; \\
 n &= \varepsilon_t / (1 - \varepsilon_t); \\
 \Psi &= \mu + \frac{1}{8} \frac{\sigma}{h_0} (1 - \mu) \sqrt{\mu}; \\
 \sigma &= R - r; \\
 \sigma_r &= \left[k - \nu_{12} + N (\sin^2 \varphi + k \cos^2 \varphi) \right] \frac{Ur}{Rg}; \\
 k &= \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}; \\
 N &= \sqrt{2(k - \nu_{12}) + (E_1 / G_{12})}; \\
 g &= (1 - \nu_{12} \nu_{21}) / E_2 + k / G_{12}; \\
 \psi_2 &= \mu_2 + \frac{1}{8} \frac{R}{h} (1 - \mu_2) \sqrt{\mu_2}.
 \end{aligned}$$

где σ_g - предел прочности материала втулки; h - первоначальная высота втулки с сегментами; h_0 - высота втулки после деформации (без выступов); ε_t - относительное сужение, отвечающее образованию устойчивости шейки; R - внешний радиус втулки; r - внутренний радиус втулки; Ψ - эмпирический коэффициент, учитывающий состояние трущихся поверхностей и форму очага деформации; μ - коэффициент трения; σ_r - радиальные напряжения на контуре отверстия в заготовке [39]; E_1 и E_2 - соответственно модули упругости материала листовой заготовки во взаимно перпендикулярных направлениях; ν_{12} и ν_{21} - коэффициенты Пуассона; G - модуль сдвига; μ_2 - коэффициент трения в контакте между втулкой и стенкой отверстия листовой заготовки.

Зная работу внешних сил A_D , по формуле (2) определяется величина усилия осадки подкрепляющей втулки.

4. Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая по конструктивным параметрам процесса постановки подкрепляющего элемента в отверстие определить работу и усилие осадки вкладыша, а также определить деформированное состояние его материала по внешнему контуру. Модель адаптирована для реализации в стандартном конечно-элементном программном продукте ANSYS Mechanical. Такая постановка позволяет выбрать технологическое оборудование, необходимое для осуществления технологического процесса образования отверстий с подкреплением в изделиях из полимерных композиционных материалов, существенно снижает сложность анализа результатов при разработке технологического процесса образования соединения.

5. Литература

- [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. – Т. 72.

- [2] Гагауз, П.М. Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика / П.М. Гагауз, Ф.М. Гагауз, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда – Харьков: издательство Харьковского национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского, 2015. – 672 с.
- [3] Воробей, В.В. Соединение конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, О.С. Сироткин – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
- [4] Сироткин, О.С. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники / О.С. Сироткин, В.И. Гришин, В.Б. Литвинов – М: Машиностроение, 2006. – 331 с.
- [5] 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. – С. 89-104.

Mathematical modeling of hole formation with reinforcement in composite construction

Yu.A. Vashukov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. With the help of the presented finite element model, studies of the deformed state of the process of setting the reinforcing sleeve in the hole of the part made of a polymer composite material are carried out. A mathematical model was developed to determine the force and operation of the setting process, as well as the dependence of the design parameters on the deformed state of the sleeve along the contour of the hole with reinforcement.