

Закономерности образования утолщения в зоне скругленного угла композитных деталей, формируемых методом вакуумной инфузии на оснастках негативного типа

Regularities of formation of thickening in the rounded corner of parts made of composites molded by vacuum infusion on negative-type tooling

*В.В. СОКОЛОВ, М.Г. ЛЕВАНОВА, Е.В. ЖУКОВА,
П.Ю. АНТИПОВ, О.А. ГОЛИШЕВ, С.В. ДОЛИНСКИЙ*

*V.V. SOKOLOV, M.G. LEVANOVA, E.V. ZHUKOVA,
P.YU. ANTIPOV, O.A. GOLISHEV, S.V. DOLINSKY*

АО «Кронштадт», г. Москва
Kronshtadt Group, Moscow
skit988@mail.ru

В данной работе установлены закономерности образования утолщения в зоне скругленного угла композитных деталей, изготовленных на основе арамидных и углеродных волокон. Показано влияние геометрии радиусной зоны и типа армирующего материала на массу и габариты формирующегося утолщения.

Ключевые слова: углепластик, органопластик, вакуумная инфузия, геометрия скругленного угла

In this work, the regularities of the formation of a thickening in the zone of the rounded corner of composite parts made on the basis of aramid and carbon fibers are established. The influence of the radius zone geometry and the type of reinforcing material on the mass and dimensions of the forming thickening is shown.

Keywords: carbon fiber, organoplastic, vacuum infusion, geometry of a rounded corner

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-49-51

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в самолетостроении, что объясняется уникальным сочетанием их свойств, таких как высокая прочность и низкая плотность. Одним из наиболее динамично развивающихся методов производства ПКМ является вакуумная инфузия. Вакуумная инфузия – это процесс пропитки армирующих материалов связующим с помощью разряжения, возникающего из-за разницы давлений между окружающей средой и загерметизированной формой, находящейся под вакуумом.

Планер современного самолета, выполненный на основе полимерных композиционных материалов, состоит из множества отдельно формируемых деталей. Соединение этих деталей между собой производится различными способами. Существуют три основных вида соединений, применяемых в самолетостроении: клеевые, механические (болтовые, заклепочные и др.) и комбинированные клеемеханические (клееболтовые, клееклепанные и др.) [1]. Необходимость сборки планера из отдельных деталей обуславливает высокие требования к точности их размеров.

Композитные детали, характеризующиеся наличием сопряженных под прямым углом плоскостных элементов, широко используются в авиационной технике. Достоверно установлено, что при формировании композитного изделия на оснастке негативного типа в области скругления угла детали формируется утолщение [2–5] (рис. 1).

Величину утолщения (h_y) можно рассчитать по следующей формуле:

$$h_y = h_p - h \quad (1)$$

Образование утолщения в области скругленного угла детали приводит к снижению ее геометрической точности, что создает трудности при сборке планера. Также оно способствует увеличению массы детали относительно расчетного значения. В связи с этим определение закономерностей формирования утолщения в зоне скругленного угла является важной задачей, решение которой позволит более точно прогнозировать массу и геометрию детали на стадии ее проектирования.

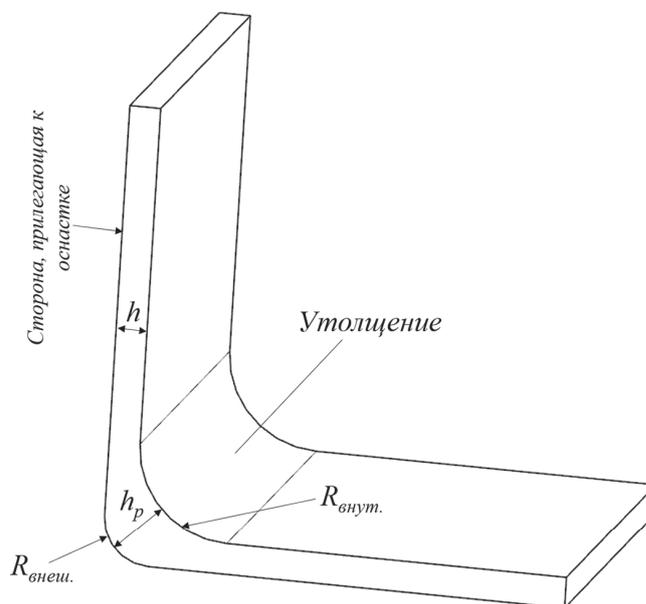


Рис. 1. Схема утолщения, образованного в зоне сопряжения плоскостных элементов детали, где h – толщина детали в области плоскостного элемента, h_p – толщина детали в радиусной зоне, $R_{внеш.}$ и $R_{внут.}$ – внешний и внутренний радиусы дуг скругления.

Целью работы являлось установление закономерностей образования утолщения в зоне скругленного угла угле- и органопластиковых деталей, формируемых на оснастках негативного типа, а также оценка влияния утолщения на весовые характеристики детали.

Экспериментальная часть

Для исследования механизма формирования утолщений в зоне скругленного угла методом вакуумной инфузии были изготовлены композитные образцы в виде «коробов» и «уголков» с толщиной 1,25 мм (рис. 2).

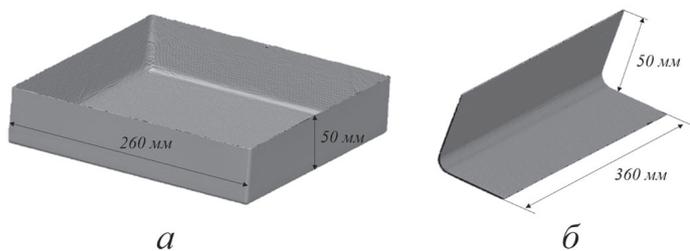


Рис. 2. Полигональные модели углепластиковых «короба» (а) и «уголка» (б).

Формование образцов осуществлялось на металлической оснастке негативного типа. В качестве материалов для их изготовления использовали равнопрочные ткани:

- на основе углеродного волокна Tenax HTA40 саржевого 22502 переплетения;
- на основе арамидного волокна Русар-НТ полотняного переплетения.

В качестве связующего были выбраны эпоксидные смолы.

Измерение и анализ геометрических параметров сформованных образцов осуществлялись при помощи сканерной платформы Romer 7530 SEI-2540-FA и программного обеспечения PolyWorks. Микрофотографии срезов композиционных материалов были получены при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 приведены микрофотографии радиусных зон углепластиковых уголков.

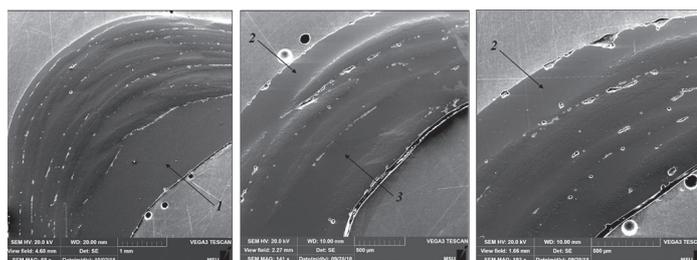


Рис. 3. Микрофотографии радиусных зон углепластиковых уголков, в которых избыточное связующее находится со стороны $R_{внут.}$ (1), $R_{внеш.}$ (2), между слоями преформы (3).

Анализ фотографий показал, что утолщение в зоне скругленного угла формируется по причине избыточного содержания связующего, которое концентрируется со стороны внешнего или внутреннего радиусов скругления, а также может быть распределено между слоями преформы.

Сосредоточение избытка связующего со стороны внешнего радиуса скругления, а также между слоями преформы объясняется следующим: уложенная в радиусной зоне под действием внешней изгибающей силы ткань стремится к восстановлению первоначальной формы и при недостаточном усилии прижатия не касается поверхности оснастки. По той же причине может отсутствовать контакт между слоями преформы, уложенными в зоне скругленного угла. В связи с этим при вакуумировании давление уплотнения в данной области меньше, чем на плоскостные элементы (стенки) будущей детали, где площадь поверхности оснастки совпадает с площадью уложенного тканого материала и вакуумного пакета. Это, наряду с тангенциальным сопротивлением, возникающим в области плоскостных элементов между слоями ткани, а также трением между преформой и поверхностью матрицы, препятствует уплотнению преформы в радиусной зоне. В результате зазоры между прилегающим к матрице слоем ткани и самой матрицей, а также между слоями пакета в процессе пропитки заполняются связующим.

Тангенциальное сопротивление (T) представляет собой совместное проявление трения и цепкости при контакте текстильных материалов:

$$T = \alpha S_{\phi} + \beta N, \quad (1)$$

где α и β – параметры, зависящие от природы соприкасающихся поверхностей; N – сила нормального давления. Произведение βN выражает трение скольжения, αS_{ϕ} – цепкость.

Следует отметить, что использование клей-спрея для фиксации слоев преформы значительно снижает их подвижность друг относительно друга в процессе вакуумирования, что также препятствует уплотнению пакета в зоне скругленного угла.

Концентрация излишков связующего в области внутреннего радиуса скругления является свидетельством отсутствия контакта между вспомогательными материалами (разделительной пленкой, распределительной сеткой, вакуумным пакетом) и преформой. Анализ микрофотографий образцов различной геометрии показал, что с увеличением $R_{внеш.}$ снижается вероятность образования утолщения со стороны внутреннего радиуса, и избыточное связующее концентрируется в зазорах между слоями преформы и/или оснасткой и преформой.

На рисунке 4 представлена зависимость величины утолщения в зоне скругленного угла органопластиковых и углепластиковых образцов от их внешнего радиуса.

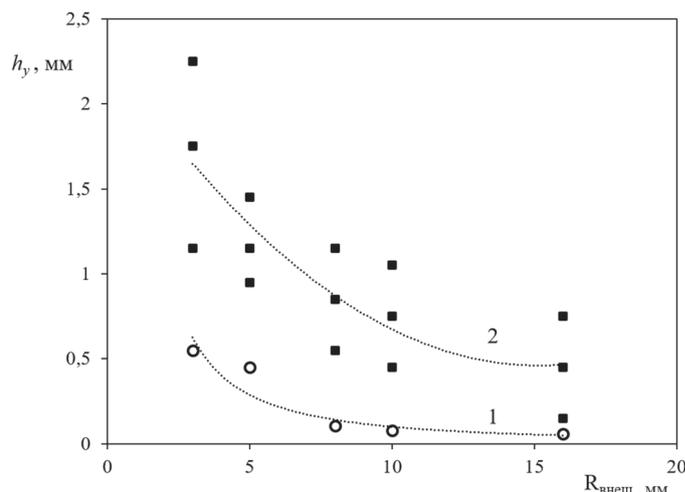


Рис. 4. Зависимость величины утолщения в зоне скругленного угла органопластиковых (1) и углепластиковых (2) образцов от их внешнего радиуса. Толщина образцов ~ 1,25 мм.

Анализ рисунка 4 свидетельствует, что с ростом внешнего радиуса исследованных образцов с 3 до 16 мм величина утолщения монотонно снижается. Наиболее значительное уменьшение h_y происходит в интервалах $R_{внеш.}$ от 3 до 10 мм для углепластиковых деталей и от 3 до 8 мм – для органопластиковых. При одинаковом внешнем радиусе скругленного угла размер утолщения образцов на основе углеродных материалов в 3–9 раз выше, чем у органопластиковых «уголков». При этом утолщение в зоне скругленного угла образцов на основе арамидных тканей с внешним радиусом от 3 до 5 мм формируется в области внутреннего радиуса, что является следствием отсутствия контакта между вспомогательными материалами и преформой. Перечисленные различия в поведении угли и органопластиковых образцов, по-видимому, обусловлены тем, что жесткость арамидной ткани при изгибе ниже, чем у углеткани.

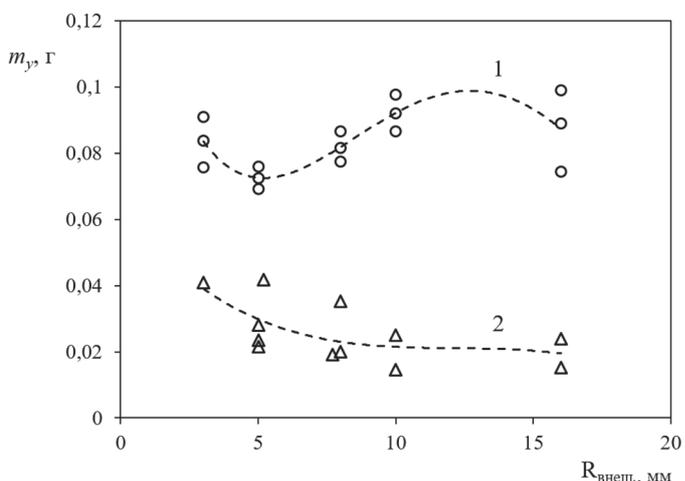


Рис. 5. Зависимость массы утолщения (m_{γ}), сформированного в радиусной зоне длиной 10 мм, от внешнего радиуса углепластиковых (1) и органопластиковых (2) деталей.

Концентрация избытка связующего в зоне скругленного угла приводит к увеличению массы конструкции. Массу утолщения трудно прогнозировать, поэтому ее не учитывают при проектировании детали. Однако основываясь на результатах анализа геометрии образцов со скругленным углом при условии большого объема выборки, можно приблизительно оценить вклад утолщения в общий вес деталей. На рисунке 5 показана зависимость массы утолщения, сформированного в радиусной зоне длиной 10 мм, от внешнего радиуса композитных деталей.

Из рисунка 5 видно, что масса утолщения длиной 10 мм при $R_{внеш.}$ от 3 до 16 мм находится в диапазоне:

- от 0,07 до 0,1 г у углепластиковых деталей;
- от 0,015 до 0,042 г у органопластиковых деталей.

Различие между массовыми характеристиками утолщений рассматриваемых образцов обусловлено меньшим h_y у органопластиковых «уголков» по сравнению с углепластиковыми при одинаковых значениях $R_{внеш.}$

Экстремальный характер кривой 1 объясняется тем, что масса утолщения зависит от сочетания двух геометрических параметров – h_y и $R_{внеш.}$. При этом с возрастанием внешнего радиуса скругления размер утолщения снижается. В результате различных сочетаний этих двух геометрических параметров формируются различные по геометрии и, как следствие, по массе утолщения. Анализ кривой 1 показал, что снижение массы утолщения при увеличении внешнего радиуса от 3 до 5 мм объясняется тем, что в указанном интервале $R_{внеш.}$ размер утолщения резко снижается. При дальнейшем увеличении внешнего радиуса h_y снижается не так интенсивно, параллельно с этим происходит увеличение размера радиусной зоны, что приводит к увеличению массы избыточного связующего, сконцентрированного в скругленном угле, на участке $R_{внеш.}$ от 5 до 12 мм. В интервале $R_{внеш.}$ от 12 до 16 мм снова начинает проявляться тенденция к снижению массы утолщения, что связано с продолжением уменьшения h_y . Кривая 2 отличается от первой кривой и носит монотонно убывающий характер. Это обусловлено разницей между размерами утолщения образцов из двух разных материалов, а также тем, что h_y у «уголков» на основе арамидных тканей с увеличением $R_{внеш.}$ меняется не так интенсивно, особенно в интервале от 8 до 10 мм, как у углепластиковых деталей.

Для оценки вклада утолщения в общий вес композитной детали рассмотрим углепластиковый и органопластиковый «короба» с внешними радиусами скругления 10 мм. Так как кривые 1, 2 (рис. 5) при увеличении внешнего радиуса изменяются в узком диапазоне значений масс, то для оценки массы утолщения композитных «коробов» с внешним радиусом 10 мм использовали средние арифметические значения каждого из двух вышеуказанных интервалов, рассчитанные как полусумма верхней и нижней границ. То есть при проведении оценки привеса за m_y приняли:

- 0,085 г для углепластиковых деталей;
- 0,03 г для органопластиковых деталей.

Такой подход является справедливым и с точки зрения того, что разброс h_y при заданном значении $R_{внеш.}$ достаточно велик.

В таблице 1 приведены значения массовых характеристик рассматриваемых «коробов».

Таблица 1. Массовые характеристики углепластикового и органопластикового «коробов».

Материал образца	Масса короба, г	Масса утолщения, г
Углепластик	221	10,5
Органопластик	191	3,7

Из таблицы 1 видно, что масса утолщения составляет ~ 5 и 2% от массы углепластикового и органопластикового «коробов» соответственно. Указанный привес является незначительным с точки зрения изготовления неотвественных композитных изделий бытового назначения, однако для самолетных деталей, выполненных из углепластика, отклонение по массе на 5% может привести к снижению летно-технических характеристик самолета, особенно

при большой доле композиционных материалов в планере. Иначе обстоят дела с изделиями авиационного назначения на основе арамидных волокон. Так как конструкция самолетов не предполагает использования большого количества органопластиковых деталей, то массой утолщения, формирующегося в радиусной зоне, можно пренебречь, и не учитывать ее при проектировании изделия.

Полученные результаты исследования показали, что для проектирования углепластиковых деталей авиационного назначения со скругленными углами необходимо обладать данными о массе утолщения, формирующегося в радиусной зоне.

Заключение

1. Установлены закономерности образования утолщения в зоне скругленного угла композитных деталей. Анализ микрофотографий радиусных зон показал, что утолщение представляет собой избыточное связующее, которое концентрируется со стороны внешнего или внутреннего радиусов скругления, а также может быть распределено между слоями преформы. Показано, что с ростом внешнего радиуса скругления (h_y) с 3 до 16 мм величина утолщения (h_y) монотонно снижается. Наиболее значительное уменьшение h_y происходит в диапазонах $R_{внеш.}$ от 3 до 10 мм для углепластиковых деталей и от 3 до 8 мм для органопластиковых. При одинаковом внешнем радиусе скругленного угла размер утолщения образцов на основе углеродных материалов в 3–9 раз выше, чем у органопластиковых «уголков». Различия в поведении угле- и органопластиковых образцов, по-видимому, обусловлены тем, что жесткость арамидной ткани при изгибе ниже, чем у углеткани.

2. Показано, что масса образующегося в радиусной зоне утолщения длиной 10 мм при $R_{внеш.}$ от 3 до 16 мм находится в диапазоне: - от 0,07 до 0,1 г у углепластиковых деталей; - от 0,015 до 0,042 г у органопластиковых деталей.

Различие между массовыми характеристиками утолщений, образованных в деталях из двух рассмотренных материалов, обусловлено меньшим h_y у органопластиковых «уголков» по сравнению с углепластиковыми при одинаковых значениях $R_{внеш.}$

3. Рассчитано, что масса утолщения, образованного в радиусных зонах «короба» с габаритами основания 260×260 мм, высотой стенки 50 мм и толщиной 1,25 мм составляет ~ 5 и 2% от массы детали при использовании арамидной и углеродной ткани соответственно.

Литература

1. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов / Ю.А. Васьков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 68 с.
2. James S. Lightfoot, Michael R. Wisnom, Kevin Potter. Defects in woven preforms: Formation mechanisms and the effects of laminate design and layup protocol // Composites: Part A. – 2013. – 51. – P. 99–107.
3. Ismet Baran, Kenan Cinar, Nuri Ersoy, Remko Akkerman, Jesper H. Hattel. A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2017. – V. 24. – 2. P. 365–395.
4. Centea T., Grunfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2015. – V. 70. – P. 132–154.
6. Pascal Hubert, Jan Schubert, Simon Bickerton, Chris Hickey. Towards a design guideline for corners in composite parts / 21st International Conference on Composite Materials, 20–25th August 2017.