

Влияние количества слоев армирующего материала на толщину и весовые характеристики углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии

Effect of number of layers of the reinforcing material on the thickness and weight characteristics of carbon fiber parts produced by vacuum infusion

В.В. СОКОЛОВ, П.Ю. АНТИПОВ, О.А. ГОЛИШЕВ, С.В. ДОЛИНСКИЙ

V.V. SOKOLOV, P.YU. ANTIPOV, O.A. GOLISHEV, S.V. DOLINSKY

АО «Кронштадт», г. Москва

Kronshtadt JSC, Moscow

skit988@mail.ru

В данной работе установлены закономерности, связывающие количество слоев армирующего материала в преформе с толщиной и плотностью углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии. Показано, что в ПКМ, состоящих из малого количества слоев, толщина монослоя заметно выше, а плотность ниже, чем в многослойных композитах.

Ключевые слова: углепластик, толщина композитных деталей, вакуумная инфузия

In this work, regularities have been established that relate the number of layers of reinforcing material in a preform with the thickness and density of carbon fiber parts obtained by vacuum infusion. It is shown that in PCMs consisting of a small number of layers, the thickness of the monolayer is noticeably higher and the density is lower than in multilayer composites.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, thickness of composite parts, vacuum infusion

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64

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 и комбинированные клеомеханические [1]. Необходимость сборки планера из отдельных деталей обуславливает высокие требования к точности их размеров. Даже незначительное отклонение от заданной геометрии стыкуемых деталей может спровоцировать существенные трудности при их сборке. Поэтому геометрическая точность композитных деталей авиационного назначения наряду с механическими характеристиками является важнейшим показателем их качества.

Одним из основных геометрических параметров детали является ее толщина. Толщина композиционного материала складывается из толщин составляющих его монослоев. Монослой (основной структурный элемент волокнистых композитов) – плоский или изогнутый элемент, состоящий из полимерного связующего и одного слоя армирующего материала.

Толщина монослоя и, как следствие, толщина композита варьируется в значительных пределах и определяется множеством факторов, таких как давление формования, схема армирования, тип переплетения ткани, а также другие ее текстильные характеристики. В работах [2, 3, 4] приведены данные по различным армирующим тканям на основе стеклянных и углеродных волокон, иллюстрирующие, что

с увеличением давления формования происходит заметное снижение толщины монослоя (h_m). Причем наиболее резкое уменьшение h_m происходит при увеличении давления от 0 до ~0,1 МПа, то есть при переходе от контактного формования к безавтоклавным методам получения композитных деталей (вакуумная инфузия, вакуумное формование). При дальнейшем увеличении давления до 7 МПа кривая уплотнения преформы изменяется не так интенсивно. Изменение толщины монослоя композиционного материала сопровождается изменением соотношения его основных компонентов и, как следствие, плотности. Еще одним важным, но малоизученным фактором, оказывающим влияние на толщину монослоя и плотность ПКМ, является количество слоев в преформе.

Целью данной работы является установление закономерностей, связывающих количество слоев с толщиной и плотностью композита, формируемого методом вакуумной инфузии.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследований в работе использовали сформованные методом вакуумной инфузии ортогонально-армированные пластины с габаритами 900×900 мм на основе равнопрочных углеродных тканей производства ООО «Итекма»:

– марки 22502 саржевого переплетения с поверхностной плотностью 200 ± 10 г/м²;

– марки 21701 полотняного переплетения с поверхностной плотностью 110 ± 20 г/м².

Остаточное давление, при котором осуществлялось формование образцов, не более 1300 Па. В качестве связующего была выбрана эпоксидная смола Т67 производства ООО «Итекма». Соотношение основных компонентов в изготовленных ПКМ устанавливали методом химического травления. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания. Измерение толщины каждой пластины выполняли не менее чем в 200 точках при помощи калибр-скобы Mitutoyo 209-572. Толщину монослоя рассчитывали как отношение толщины пластин к количеству армирующих слоев.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, 2 показаны зависимости толщины монослоя от количества слоев в углепластиковых пластинах на основе тканей 22502 и 21701.

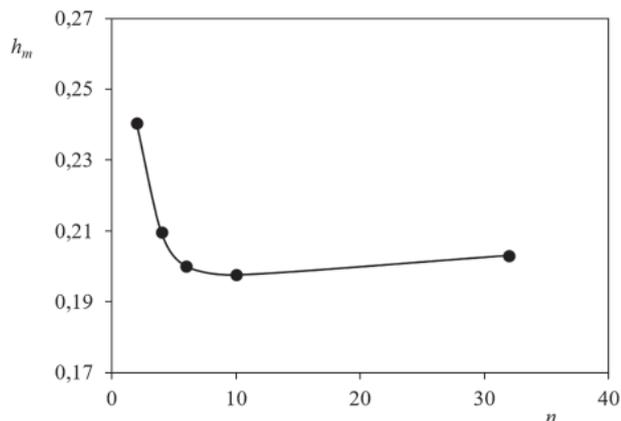


Рис. 1. Зависимость толщины монослоя от количества слоев армирующего материала в углепластиковых пластинах на основе ткани 22502.

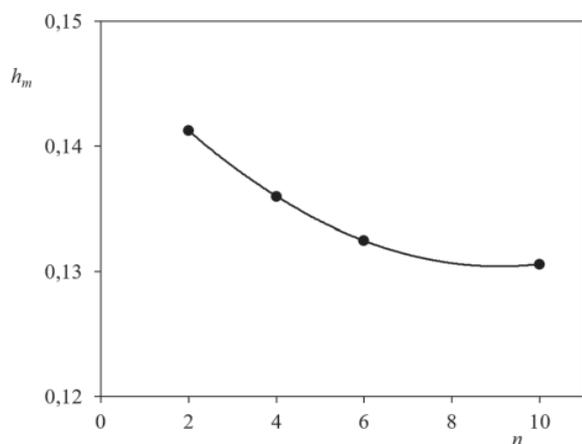


Рис. 2. Зависимость толщины монослоя от количества слоев армирующего материала в углепластиковых пластинах на основе ткани 21701.

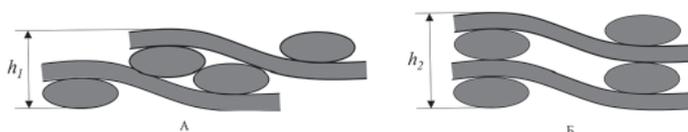


Рис. 3. Схемы размещения двух слоев ткани при сборке преформы, где $h_1 < h_2$.

Из рис. 1, 2 видно, что с ростом количества слоев с 2 до 6 происходит заметное снижение толщины монослоя (h_m) рассматриваемых образцов: на ~18 и 8% у пластин из тканей 22502 и 21701 соответственно. Дальнейшее увеличение числа слоев не приводит к существенному изменению h_m . Представленные закономерности можно объяснить с точки зрения различной плотности упаковки армирующего материала (АМ) в изготовленных образцах. Сборка преформы осуществляется посредством последовательной укладки слоев армирующей ткани. Ткань не является однородной по толщине, что обусловлено перекрытиями – местами в которых нити основы пересекаются с нитями утка. При укладке ткани на ткань предыдущего слоя ячейки могут быть компактно уложены в ячейки предыдущей ткани (рис. 3А) или, напротив, могут не войти друг в друга и сформировать зазор (рис. 3Б). Плотность упаковки описывается в данном случае коэффициентом вложения (nesting factor), который рассчитывается по следующей формуле:

$$NF = h_m / h_c$$

где h_c – толщина одного слоя композита [5, 6]. Если слои ткани располагаются точно друг на друге без смещения, то вложение отсутствует и $NF = 1$. Если они располагаются со смещением – плотность упаковки АМ возрастает, а NF принимает значение < 1 .

По всей видимости, с увеличением количества слоев с 2 до 6 вероятность их компактного размещения возрастает, что характеризуется заметным уменьшением NF (рис. 4). При дальнейшем

росте количества слоев коэффициент вложения изменяется не столь значительно, сохраняясь в пределах от 0,7 до 0,73.

Пониженная плотность упаковки АМ в двухслойной пластине на основе ткани 22502 ($NF = 0,86$) по сравнению с аналогичным образцом из ткани 21701 ($NF = 0,79$), по-видимому, обусловлена тем, что последняя ткань является редкой. Редкой называется ткань, расстояния между нитями в которой превышают ширину самих нитей. Увеличенные ячейки редкой ткани создают возможность для более плотной укладки слоев.

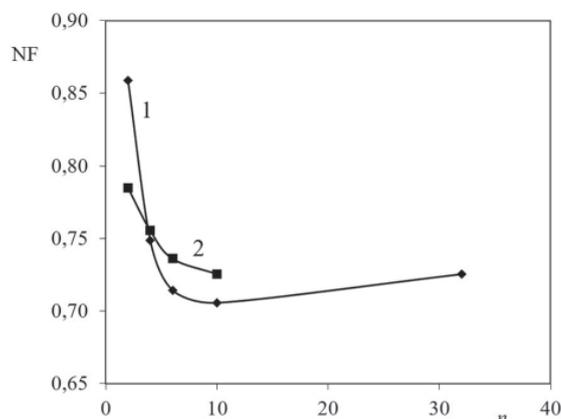


Рис. 4. Зависимость усредненного коэффициента вложения в углепластиковых пластинах на основе тканей 22502 (1) и 21701 (2) от количества слоев.

На примере рассматриваемых образцов установлено, что NF по площади композитной детали характеризуется неоднородностью, о чем свидетельствует разброс ее толщины. Так, в двухслойной пластине на основе ткани 22502 есть зоны, в которых толщина составляет 0,40 мм, что соответствует $NF = 0,69$ и объясняется высокой плотностью упаковки АМ. При этом в той же пластине присутствуют области с толщиной 0,58 мм ($NF = 1$). Увеличение количества слоев, приводящее к уплотнению преформы, способствует уменьшению разброса NF по площади детали и, как следствие, сокращает разброс толщины монослоя (рис. 5).

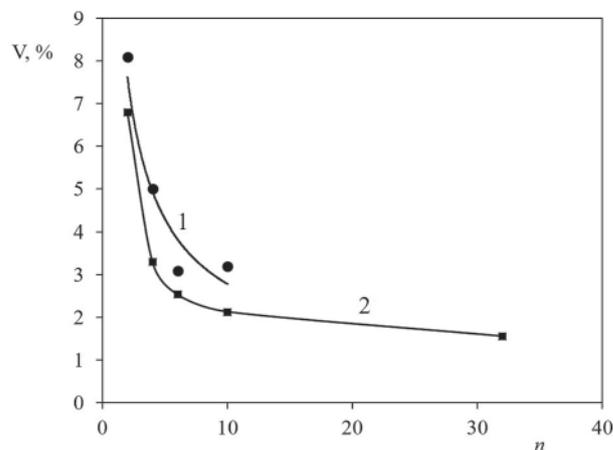


Рис. 5. Зависимость коэффициента вариации (V) толщины монослоя от количества слоев для углепластиковых пластин на основе тканей 21701 (1) и 22502 (2).

Количество слоев в преформе из-за вышеописанного эффекта оказывает влияние на соотношение основных компонентов в композиционном материале и, как следствие, на его плотность. На рис. 6, 7 проиллюстрировано, что с ростом количества составляющих преформу слоев происходит увеличение содержания волокна в рассматриваемых углепластиках и, как следствие, повышение их плотности. Такой эффект можно объяснить тем, что увеличение количества слоев, сопровождаемое снижением NF , способствует уменьшению пустот в преформе, заполняемых связующим при пропитке. Изменение n в преформе от 2 до 10 приводит к увеличению:

- объемного содержания волокна в ПКМ на 7 и 10% для пластин на основе ткани 21701 и 22502 соответственно;
- плотности ПКМ на 1,5 и 2% для пластин на основе ткани 21701 и 22502 соответственно.

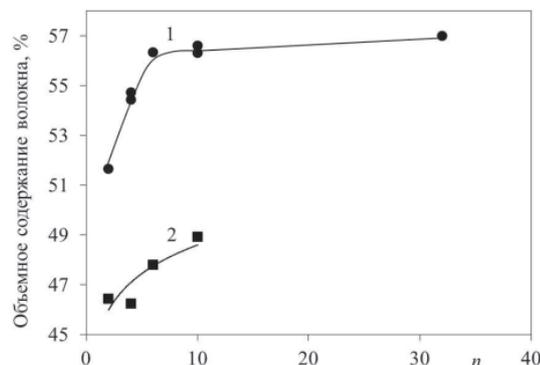


Рис. 6. Зависимость объемного содержания волокна в углепластиковых пластинах на основе тканей 22502 (1) и 21701 (2) от количества слоев.

При сравнении изготовленных образцов ПКМ отмечено, что плотность и содержание волокна в композитных пластинах, выполненных из ткани 22502, выше, чем у пластин на основе ткани 21701. По всей видимости, преформа, составленная из слоев редкой ткани 21701, обладает сравнительно большим объемом пустот.

В результате данной работы установлены закономерности, связывающие количество слоев армирующего материала с толщиной и структурой углепластиковых деталей. Показано, что в ПКМ, состоящих из малого количества слоев, толщина монослоя заметно выше, а плотность ниже, чем в многослойных композитах. Учет выявленных закономерностей при проектировании деталей авиационного назначения позволит более точно прогнозировать их геометрические и весовые параметры.

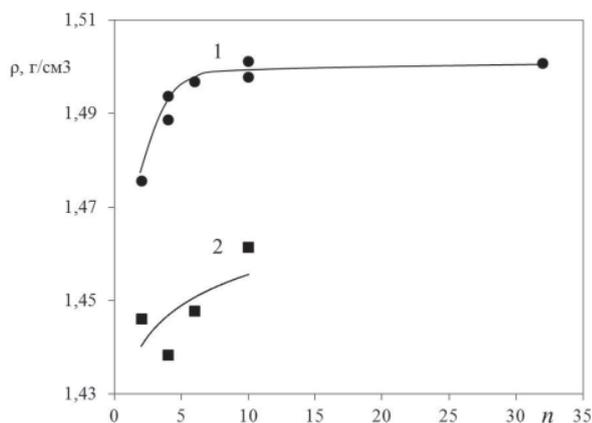


Рис. 7. Зависимость плотности углепластиковых пластин на основе тканей 22502 (1) и 21701 (2) от количества слоев.

Заключение

1. Установлены закономерности, связывающие количество слоев армирующего материала с толщиной углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии. Показано, что с ростом количества слоев с 2 до 6 происходит заметное снижение толщины монослоя рассматриваемых образцов: на ~ 18 и 8% у пластин из тканей 22502 и 21701 соответственно. Дальнейшее увеличение числа слоев не приводит к существенному изменению толщины монослоя. Данные закономерности можно объяснить тем, что при малом количестве слоев плотность упаковки ткани в преформе сравнительно невысока. С увеличением количества слоев с 2 до 6 вероятность их компактного размещения возрастает, что приводит к снижению толщины монослоя.

2. Показано, что с ростом количества составляющих преформу слоев происходит увеличение содержания волокна в рассматриваемых углепластиках и, как следствие, повышение их плотности. Такой эффект можно объяснить тем, что увеличение количества слоев (n), сопровождаемое снижением коэффициента вложения, способствует уменьшению пустот в преформе, заполняемых связующим при пропитке. Изменение n в преформе от 2 до 10 приводит к увеличению:

- объемного содержания волокна в ПКМ на 7 и 10% для пластин на основе ткани 21701 и 22502 соответственно;
- плотности ПКМ на 1,5 и 2% для пластин на основе ткани 21701 и 22502 соответственно.

Литература

1. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов / Ю.А. Вашуков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 68 с.
2. Коган Д.И., Душин М.И., Борщев А.В., Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Макрушин К.В. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – т. 14. – №4(2). – С. 762–766.
3. Duan Yuexin, Tan Zhaoyuan, Zhao Yan, Sun Jing. Compression Responses of Preform in Vacuum Infusion Process // Chinese Journal of Aeronautics. – 2008. – №21. – P. 370–377.
4. Zeshan Yousaf. Investigation of deformation behaviour of dry textiles under forming forces by computed tomography: doctor of philosophy. The University of Manchester, 2014.
5. F.D. Dungan, M.T. Senoguz, A.M. Sastry, D.A. Faillaci. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part I—3D Modeling of Unbalanced Fabric // Journal of Composite materials. – 2001. – Vol. 35. – №14. – P. 1250–1284.
6. Z. Yousaf1 & P. Potluri 1 & P. J. Withers. Influence of Tow Architecture on Compaction and Nesting in Textile Preforms // Appl Compos Mater. – 2017. – №24. – P. 337–350.