

УДК 678.747.2

Ю.А. Гусев<sup>1</sup>, О.Н. Твердая<sup>1</sup>**ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА КАЛАНДРОВ НА СОХРАНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПРИ ПРОПИТКЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ПРЕПРЕГА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-61-67

*Приведены результаты работ, выполненных во ФГУП «ВИАМ» в рамках исследования влияния зазора каландров на сохранение свойств углеродного волокна при пропитке однонаправленного препрега. Представлены прочностные свойства при растяжении углепластика на основе однонаправленного препрега, изготовленного без зазора и с зазором каландров. В результате можно заключить, что для выбранных объектов исследования такой технологический параметр, как зазор, при пропитке однонаправленных материалов не оказывает влияния на сохранение прочностных характеристик углеродного волокна.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, расплавное связующее, углеродные жгуты, пропитка, однонаправленный препрег, автоклавное формование, углепластик, прочностные свойства полимерных композиционных материалов.

Yu.A. Gusev<sup>1</sup>, O.N. Tverdaya<sup>1</sup>**THE EFFECT OF CALENDARING CLEARANCE ON MAINTAINING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON FIBER WHEN IMPREGNATING A UNIDIRECTIONAL PREPREG**

*The results of work carried out at FSUE «VIAM» within the framework of studies of the effect of the gap of calenders on the preservation of the properties of carbon fiber during impregnation of a unidirectional prepreg are presented. The tensile strength properties of CFRP based on a unidirectional prepreg made without and with a gap of calenders are presented. As a result, it can be concluded that, for the selected objects of study, such a technological parameter as a gap, when impregnating unidirectional materials, does not affect the preservation of the strength characteristics of carbon fiber.*

**Keywords:** polymer composite material, melt binder, carbon tows, impregnation, unidirectional prepreg, autoclave molding, carbon fiber, strength properties of polymer composite materials.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Значительную часть полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяемых в деталях и узлах авиационной техники, изготавливают из расплавных препрегов. Расплавные препреги, по сравнению с растворными, имеют ряд существенных преимуществ, таких как возможность получения более точного содержания связующего в препрегах, отсутствие в препреге летучих растворителей, что позволяет исключить появление повышенной пористости в пластиках, а также сократить выбросы вредных веществ в атмосферу [1–4].

Препрег представляет собой полуфабрикат, состоящий из тканого или однонаправленного (жгутового) наполнителя на основе углеродных, стеклянных, органических волокон или их сочетаний, пропитанного терморепреактивным (расплавным или растворным) или термопластичным связующим. Расплавные препреги получают

на специализированных пропиточных линиях. В зависимости от конструкции пропиточные линии могут или обеспечивать совмещение готовой пленки расплавленного связующего с наполнителем, или непосредственно получать пленку связующего с различной поверхностной плотностью и совмещать с наполнителем в процессе пропитки одновременно. Пропиточные линии, обеспечивающие одновременное получение пленки расплавленного связующего и совмещение ее с наполнителем, являются более производительными и менее трудоемкими в части процесса получения готового препрега, применяемого для изготовления деталей и узлов авиационной техники [5–8].

В данной статье представлены результаты работы по изготовлению однонаправленного препрега на основе среднемодульного углеродного волокна H3055-12K производства фирмы Hyosung (Республика Корея) и расплавленного связующего ВСЭ-1212 производства ФГУП «ВИАМ» на пропиточной линии, позволяющей одновременно получать пленку расплавленного связующего и совмещать ее с наполнителем.

Принципиальная схема работы такой пропиточной машины следующая. Подогретые брикеты связующего помещают в узел нанесения связующего (коутер), где оно доводится до нужной температуры, а затем через систему валов коутера переносится в виде пленки на силиконизированные бумажные подложки, которые в свою очередь совмещаются с наполнителем. Далее для обеспечения пропитки наполнитель, совмещенный с подложками, проходит через систему ламинаторов, каландров и нагревательных столов. Ламинаторы обеспечивают совмещение подложек с наполнителем, каландры за счет выставленных зазоров – степень пропитки наполнителя расплавленным связующим, а нагревательные столы – поддержание требуемой температуры в процессе получения препрега. После прохода последнего каландра подложки могут быть отобраны от пропитанного наполнителя, и готовый препрег совмещается с полиэтиленовой пленкой, проходя через еще один ламинатор. В данном случае полиэтиленовая пленка служит для разделения слоев препрега в рулоне между собой. Однако возможен и вариант с отбором только одной бумажной подложки и заменой ее на полиэтиленовую пленку.

При пропитке однонаправленных материалов важным технологическим параметром является зазор каландров. При правильно подобранном значении зазоров совмещенная с наполнителем пленка расплавленного связующего не остается на поверхности наполнителя, а входит внутрь наполнителя, тем самым пропитывая его. Зазоры каландров также влияют на равномерность распределения наполнителя в препреге – при слишком больших зазорах возможно образование в структуре препрега зазоров между жгутами, т. е. участков препрега, не заполненных наполнителем [9–11].

При изготовлении однонаправленных препрегов на основе углеродных волокон при пропитке без зазора каландров существует вероятность повреждения однонаправленного наполнителя и, как следствие, снижения его упруго-прочностных свойств.

### **Материалы и методы**

Для оценки вероятности повреждения углеродного волокна при пропитке без зазора каландров решено изготовить однонаправленный препрег на основе среднемодульного углеродного волокна H3055-12K и расплавленного связующего ВСЭ-1212 при зазоре и без зазора каландров [12, 13].

Основные упруго-прочностные характеристики среднемодульного углеродного волокна H3055-12K производства фирмы Hyosung (Республика Корея) [14]:

Количество элементарных волокон (филаментов)	12000
Удлинение при разрыве, %	1,9
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,8
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, МПа	5516
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, ГПа	290

По результатам анализа массива данных по упруго-прочностным испытаниям однонаправленных ПКМ разработки ФГУП «ВИАМ» видно, что наблюдается следующая тенденция: значения прочностных характеристик при растяжении материалов, полученных на основе однонаправленных препрегов, в направлении приложения нагрузки вдоль основы в среднем в два раза меньше значений применяемого исходного углеродного волокна. На основании этого можно предположить, что средние значения предела прочности и модуля упругости при растяжении вдоль основы углепластика, изготовленного на основе корейского углеродного волокна H3055 и расплавного связующего ВСЭ-1212, будут находиться в диапазоне от 2700 до 2900 МПа и от 140 до 160 ГПа соответственно. В случае существенного повреждения углеродного волокна в процессе пропитки полученные значения предела прочности и модуля упругости при растяжении вдоль основы будут существенно ниже приведенных прогнозов [15].

Препрег ВСЭ-1212/H3055 (рис. 1) изготавливали на пропиточной установке Coateama VL-2800, оснащенной двумя каландрами. Вначале установили зазор обоих каландров в диапазоне от 0,40 до 0,50 мм. Затем зазор обоих каландров уменьшили до 0 мм (без зазора) и также изготовили необходимое количество препрега. В итоге оба препрега произвели из одних и тех же партий углеродного волокна и расплавного связующего и в рамках одной и той же пропитки, все остальные параметры пропиточной установки оставались одинаковыми.

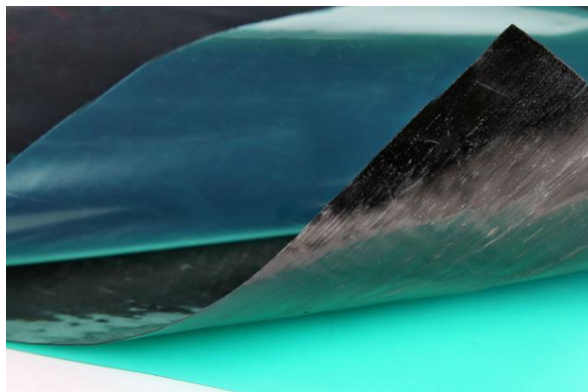


Рис. 1. Препрег ВСЭ-1212/H3055

Полученные препреги раскроили на заготовки для сборки пакетов с использованием автоматизированного раскройного комплекса фирмы Zund (Швейцария), затем из них собрали пакеты для автоклавного формования и провели их вакуумирование. После вакуумирования осуществили автоклавное формование плит углепластика ВСЭ-1212/H3055 по одинаковому режиму. Полученные плиты разрезали на заготовки и приформовали к ним накладки из стеклотекстолита.

Использование накладок при испытаниях углепластиков на основе однонаправленных армирующих наполнителей необходимо для исключения повреждения образцов при испытаниях, обеспечения надежного захвата и устранения проскальзывания в зажимах испытательной машины, что позволяет получить достоверные значения свойств испытываемых материалов.

Заготовки с накладками разрезали на образцы на станке с ЧПУ при постоянном водяном охлаждении в процессе резки, что исключает их перегрев при воздействии на образцы режущего инструмента. Перегрев полимерных композиционных материалов на основе терморезистивных расплавных связующих может привести к изменению свойств их полимерной матрицы и, как следствие, к ухудшению упруго-прочностных характеристик самого материала [16].

В случае повреждения углеродного волокна при пропитке без зазора каландров значения предела прочности и модуля упругости при растяжении углепластика с поврежденным углеродным волокном могут быть ниже, чем те же значения углепластика с целым углеродным волокном. Для проверки данного предположения образцы, изготовленные из обоих препрегов, испытали на определение предела прочности и модуля упругости при растяжении вдоль основы по стандарту ASTM D3039. Решение провести испытания материала на растяжение приняли в связи с тем, что при рассматриваемом методе нагружения основная нагрузка приходится на наполнитель (углеродные волокна) и, как следствие, этот метод позволяет наиболее точно оценить свойства непосредственно углеродного волокна в составе материала.

### Результаты и обсуждение

В ходе работы по стандарту ASTM D3039 исследовали упруго-прочностные свойства углепластика (предел прочности и модуль упругости при растяжении вдоль основы при температурах 20 и 120 °С), полученного из препрега на основе корейского углеродного волокна H3055 и расплавленного связующего ВСЭ-1212, изготовленного на пропиточной линии Coateama BL-2800 с зазором каландров.

Полученные характеристики углепластика ВСЭ-1212/H3055 приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Характеристики углепластика ВСЭ-1212/H3055, изготовленного из препрега с зазором каландров, при комнатной и повышенной температурах

Температура испытания, °С	Предел прочности при растяжении вдоль основы, МПа	Модуль упругости при растяжении вдоль основы, ГПа
20	2810	165
	2910	165
	2440	160
	2840	175
	2750	165
	2730	165
	2720	165
	2640	160
	2730*	165*
120	2500	165
	2630	160
	2550	165
	2640	160
	2580	160
	2100	160
	2640	160
	2410	165
	2506*	162*

\* Среднее значение.

Полученные характеристики рассматриваемого углепластика, изготовленного из препрега без зазора каландров, приведены в табл. 2.

Характеристики углепластика ВСЭ-1212/H3055, полученного из препрега на основе корейского углеродного волокна H3055 и расплавленного связующего ВСЭ-1212, изготовленного на пропиточной линии Coateama BL-2800 с зазором и без зазора каландров, в графическом виде представлены на рис. 2 и 3.

Таблица 2

**Характеристики углепластика ВСЭ-1212/Н3055, изготовленного из препрега без зазора каландров, при комнатной и повышенной температурах**

Температура испытания, °С	Предел прочности при растяжении вдоль основы, МПа	Модуль упругости при растяжении вдоль основы, ГПа
20	2720	170
	2680	160
	2770	170
	2670	165
	2820	165
	2580	160
	2720	165
	2650	160
	2701*	164*
120	2740	155
	2820	160
	2680	160
	2580	160
	2690	165
	2650	165
	2460	160
	2660*	161*

\* Среднее значение.

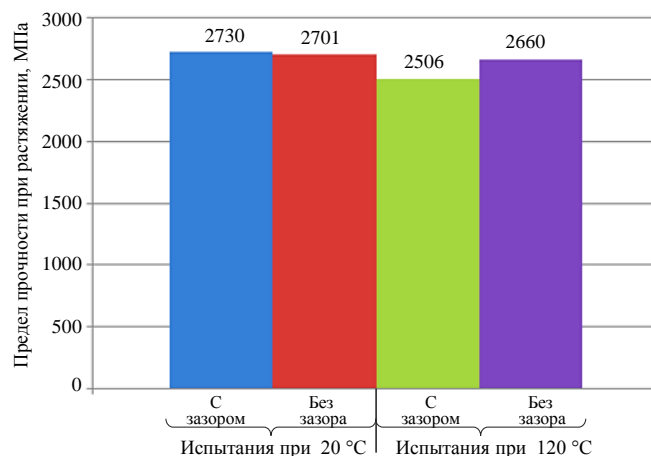


Рис. 2. Предел прочности при растяжении вдоль основы углепластика ВСЭ-1212/Н3055, изготовленного из препрега с зазором и без зазора каландров

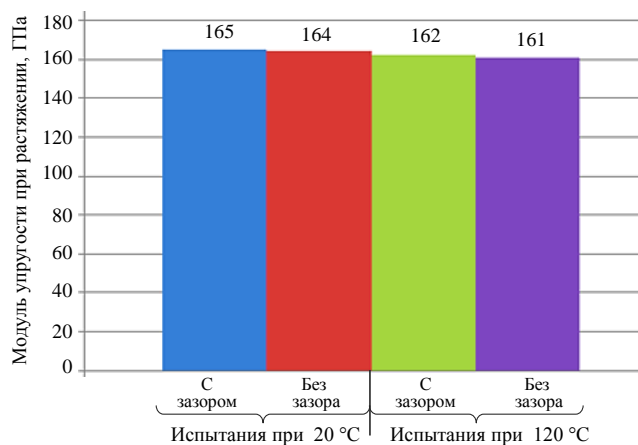


Рис. 3. Модуль упругости при растяжении вдоль основы углепластика ВСЭ-1212/Н3055, изготовленного из препрега с зазором и без зазора каландров

На основе полученных данных определены характеристики статистического разброса свойств (среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации), которые приведены в табл. 3 и 4. Определено также сохранение свойств углепластика ВСЭ-1212/Н3055 при испытаниях при комнатной и повышенной температурах.

*Таблица 3*

**Характеристики статистического разброса свойств углепластика ВСЭ-1212/Н3055, изготовленного из препрега с зазором каландров, при комнатной и повышенной температурах**

Свойства	Температура испытания, °С	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
Предел прочности при растяжении вдоль основы, МПа	20	2730	143,23	5,25
	120	2506	182,36	7,28
Модуль упругости при растяжении вдоль основы, ГПа	20	165	4,63	2,81
	120	162	2,59	1,6

*Таблица 4*

**Характеристики статистического разброса свойств углепластика ВСЭ-1212/Н3055, изготовленного из препрега без зазора каландров, при комнатной и повышенной температурах**

Свойства	Температура испытания, °С	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации, %
Предел прочности при растяжении вдоль основы, МПа	20	2701	73,96	2,74
	120	2660	115,33	4,34
Модуль упругости при растяжении вдоль основы, ГПа	20	164	4,17	2,54
	120	161	3,45	2,15

Результаты испытаний по определению предела прочности и модуля упругости при растяжении вдоль основы углепластика ВСЭ-1212/Н3055 при температуре 120 °С показывают, что сохранение свойств составляет 98% относительно среднего значения каждой характеристики, полученной при температуре 20 °С.

Полученные низкие коэффициенты вариации свидетельствуют о небольшом разбросе значений, что подтверждает стабильность свойств углепластика ВСЭ-1212/Н3055.

**Заключения**

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что упруго-прочностные свойства (предел прочности и модуль упругости при растяжении вдоль основы при температурах 20 и 120 °С) углепластика ВСЭ-1212/Н3055, полученного из препрега на основе корейского углеродного волокна Н3055 и расплавленного связующего ВСЭ-1212, изготовленного на пропиточной линии Coateama BL-2800 с зазором каландров, находятся на одном уровне с показателями рассматриваемых упруго-прочностных свойств углепластика ВСЭ-1212/Н3055, изготовленного без зазора каландров.

Следует также отметить, что полученные значения предела прочности и модуля упругости при растяжении вдоль основы препрега обеих партий находятся в спрогнозированном диапазоне – от 2900 до 2700 МПа и от 160 до 140 ГПа соответственно, что позволяет сделать вывод об отсутствии каких-либо существенных повреждений углеродного волокна в процессе пропитки, как с зазором, так и без зазора каландров.

Кроме того, такой технологический параметр, как зазор каландров, при пропитке исследованного однонаправленного материала на основе среднемодульного углеродного волокна Н3055-12К производства фирмы Hyosung (Республика Корея) и расплавленного связующего ВСЭ-1212 производства ФГУП «ВИАМ» не оказывает влияния на сохранение упруго-прочностных характеристик углеродного волокна.

## Библиографический список

1. Борщев А.В., Хрульков А.В., Халтурина Д.С. Изготовление низкопористого полимерного композиционного материала для применения в слабо- и средненагруженных конструкциях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 03 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-3-3.
2. Lo J., Nutt S. Method for in situ analysis of volatiles generated during cure of composites // Composites. Part A. 2019. V. 123. August. P. 141–148.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
5. Ali R., Iannace S., Nicolais L. Effects of processing conditions on the impregnation of glass fibre mat in extrusion/calendering and film stacking operations // Composites Science and Technology. 2003. Vol. 63. Issue 15. P. 2217–2222.
6. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
7. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
9. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. О технологии изготовления препрега // Клеи, герметики и технологии. 2020. №4. С. 26–31. DOI: 10.31044/1813-7008-2020-0-4-26-3.
10. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
11. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
12. Платонов А.А., Душин М.И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2020). DOI: 0.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6.
13. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносков А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
14. Hyosung Advanced Materials Product catalogue. 2020. URL: [http://www.hyosungadvancedmaterials.com/resources/front/en/files/tansome\\_catalog\\_2020.pdf](http://www.hyosungadvancedmaterials.com/resources/front/en/files/tansome_catalog_2020.pdf) (дата обращения: 02.06.2020).
15. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S1. С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.
16. Исходжанова И.В., Быщенко О.А., Антюфеева Н.В., Столянков Ю.В. Оценка влияния различных видов реза на качество поверхности образцов из полимерных композиционных материалов методом количественного анализа видеоизображений // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. №4. С. 238–244.