

Т. Футч, Г. Ким, Р. Стеркенбург*

School of Aviation and Transportation Technology, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA

ВЛИЯНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО ВОЛОКНИСТО-АРМИРОВАННОГО УГЛЕПЛАСТИКА¹

T. Futch, G. Kim, and R. Sterkenburg*

INVESTIGATING THE EFFECTS THAT ALTERNATIVE TURBINE ENGINE FUELS HAVE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER/EPOXY COMPOSITE

Keywords: composite materials, mechanical strength, turbine engine fuel, carbon fiber, alternative jet fuel

New commercial and military aircraft components are often manufactured using advanced composite materials. Fuel is stored in the wing and horizontal tail structures of aircraft for prolonged periods of time. The use of alternative turbine engine fuels as substitutes for such kerosene-based fuels as Jet-A is increasing steadily. However, the studies related to effects of the fuels on the composite structure of aircraft are limited in number. This research was meant to investigate the effects that contacting alternative turbine fuels might have on the mechanical properties of a composite structure. Three different test settings were prepared — 0° and 90° orientation tensile test and a modified wedge ones. An IM7 8552 unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg was used to manufacture test specimens. They were soaked in various kinds of turbine engine fuels: neat Jet-A, 50/50 blend of Jet-A and hydroprocessed renewable jet (HRJ) (Jet-A/HRJ), Fischer-Tropsch (FT), 50/50 blend of synthetic jet fuel S8 and Fischer—Tropsch (FT) (S8/FT), hydrogenated esters and fatty acids (HEFA) fuels, and synthesized iso-paraffin fuels (SIP) for a period of 45 days and then tested. The test data obtained were analyzed to detect any significant degradation of the mechanical properties of test specimens.

*Автор, с которым следует вести переписку: yaram0229@gmail.com
Corresponding author: yaram0229@gmail.com

¹Перевод с англ.

Ключевые слова: материалы композитные, прочность механическая, топливо двигателей газотурбинных, волокно углеродное, топливо альтернативное реактивное

Компоненты новых коммерческих и военных самолетов часто производят с использованием современных композитных материалов. Топливо хранится в крыльях и горизонтальном оперении самолета в течение длительного времени. Использование альтернативных видов топлива для газотурбинных двигателей в качестве заменителей топлива на основе керосина, таких как Jet-A, неуклонно возрастет. Однако количество исследований, связанных с воздействием топлива на композитную конструкцию самолета, ограничено. В настоящей работе изучали влияние контакта альтернативного турбинного топлива на механические свойства композитной конструкции. Проведены испытания на растяжение образцов из препрега однонаправленного эпоксидного углепластика IM7/8552 с ориентацией волокон под углом 0 и 90° к направлению нагружения и испытание на раскол образцов клином. Провели испытания образцов, погруженных на 45 дней в разные виды топлива для газотурбинных двигателей: чистый Jet-A, смесь 50/50 Jet-A и гидрообработанного возобновляемого реактивного топлива (HRJ) (Jet-A/HRJ), топливо Фишера—Тропша (FT), смесь 50/50 синтетического реактивного топлива S8 и топлива Фишера—Тропша (FT) S8/FT, топливо на основе гидрогенизированных эфиров и жирных кислот HEFA и синтезированное изопарафиновое топливо SIP. Результаты испытаний проанализировали с целью оценки деградации механических свойств образцов, обусловленной их экспонированием в топливе.

Введение

Использование легких волокнисто-армированных композитов в аэрокосмической промышленности привело к появлению новых и креативных авиационных конструкций не в ущерб их жесткости или прочности [1] при создании энергоэффективных самолетов [2]. Дальнейшие улучшения по сравнению с металлическими деталями включают меньшую стоимость изготовления, большую устойчивость к повреждениям и более простую процедуру ремонта [3]. Однако необходимо отметить, что ограниченное знание о подходящих моделях для предсказания таких характеристик композитов, как критерии разрушения, в некоторых случаях приводило к чрезмерному проектированию композитных конструкций [3]. В силу ограниченной доступности ископаемого топлива и увеличения его стоимости в последние годы были предприняты дополнительные усилия по изучению альтернативных видов топлива, способных заменить топливо на основе нефти [4]. Альтернативные виды топлива достигли значительного

прогресса для их применения авиационной промышленностью благодаря Американскому обществу испытаний и материалов (ASTM), одоббившему пять смесей биотоплива как части стандарта Jet-A [5]. Поскольку композиты — одни из основных конструкционных материалов, используемых в современных самолетах и их топливных элементах, непреднамеренное негативное влияние, обусловленное непониманием взаимосвязи между альтернативным авиационным топливом и окружающими композитными конструкциями, может иметь катастрофические последствия, если один из этих видов топлива будет широко использован без надлежащих испытаний на совместимость. [6]. Поскольку многие топливные элементы самолетов проектируют как конструкционные элементы самолета, часто встраиваемые в конструкцию крыла [7], важность обеспечения целостности такой конструкции невозможно переоценить. Для решения этой проблемы исследователи провели серию испытаний с целью выявления доказательства любого негативного влияния альтернативных видов топлива для реактивных двигателей на конструкционную прочность композитных материалов.

1. Обзор литературы

Выполнено много исследований, посвященных оценке влияния водопоглощения на свойства композитных конструкций [8]. Установлено, что площадь расслоения и количество поперечных трещин влажных образцов меньше в силу буферного эффекта водопоглощения [9]. В [10] образцы волокнисто-армированного углепластика погружали в кипящую воду на 48, 96 и 192 ч и наблюдали значительное снижение механических свойств матрицы увлажненных образцов. Этот эффект обусловлен водопоглощением [10]. Деградацию механических свойств образцов из волокнисто-армированного углепластика при длительном гигротермическом воздействии изучали в [11]. Группы образцов подвергали гигротермическому старению путем погружения в воду с температурой 80 °С на два, шесть и девять месяцев. По завершении экспериментов образцы высушили и подвергли испытанию на растяжение. Сделан вывод о том, что длительное гигротермальное воздействие может уменьшить прочность и модули упругости углепластика. В [12] исследовали искусственное гигротермальное старение углепластиков и установили, что их повреждение может быть обусловлено колебаниями температуры в гигротермальных средах. Влагопоглощение из окружающей среды может пластифицировать матрицу и повредить ее кристаллическую структуру, что приведет к росту трещин. В [13] провели аналогичный эксперимент с использованием однонаправленных эпоксидных углепластиков: одну группу образцов погрузили на 30 дней в соленую воду, а другую — в чистую воду. Оказалось, что водопоглощение в солевом растворе меньше, чем в чистой воде. Наибольшее влияние на материалы оказала темпера-

тура. Механические характеристики образцов, погруженных в чистую воду, были выше, чем погруженных в соленую воду [13].

Вода — не единственная жидкость, с которой композитные конструкции контактируют в самолетах. Топливо, масло, гидравлические жидкости и жидкости для борьбы с обледенением, даже моча и кровь могут взаимодействовать с изделиями из композитов в течение предполагаемого срока эксплуатации [14]. В [15] изучали образцы слоистого углепластика, погруженные в жидкость для борьбы с обледенением. Хотя антиобледенительная жидкость проникала в адгезив между слоями, она не оказала негативного воздействия на конструкционные свойства углеродных волокон. В [16] образцы волокнисто-армированного углепластика, склеенные двухкомпонентным акриловым клеем, погрузили в мочу, масло турбинного двигателя, гидравлическую жидкость, реактивное топливо и кровь с целью оценки их влияния на прочность клеевого соединения. В [17] изготовили четырех- и 14-слойные образцы углепластика для исследования воздействия вероятного разлива разных жидкостей на конструкцию самолета. Результаты продемонстрировали существенное уменьшение прочности погруженных образцов по сравнению с контрольными. Установлено, что реактивное топливо — наиболее негативно влияющая жидкость, снизившая первоначальную прочность композитов на 17%.

В [18] описали, как ВВС США сравнили свойства и характеристики пяти полусинтетических реактивных топлив (смеси оригинального синтетического парафинового керосина (SIP) с топливом на нефтяной основе) и их влияние на эластомерные свойства уплотнительных колец из нитрила (Buna-N), фторсиликона и фторуглерода (Viton). Установили, что увеличение объема уплотнительного кольца — единственная характеристика, на которую оказал влияние SIP и его смеси в силу содержания в них ароматических веществ.

В [19] образцы однонаправленного полиимидного углепластика погрузили в керосин на 3500 ч при 80 °С и установили, что керосин не влияет на поперечный модуль упругости и прочностные свойства композита; однако образцы потеряли 0,3% своей массы. В аналогичном исследовании, проведенном в [20], образцы из эпоксидного углепластика на основе препрега HexPly погрузили в керосин при комнатной температуре на 168 дней, при этом прочность при растяжении препрега HexPly и эпоксидного углепластика возросла на 3 и 5% соответственно. Установили, что критический фактор, влияющий на прочность, — температура керосина. В [21] усталостные свойства образцов эпоксидного стеклопластика при изгибе в двух направлениях оценили после их экспонирования в керосине и бензине. Образцы, погруженные в керосин, продемонстрировали уменьшение модуля упругости и усталостной долговечности, а погруженные в бензин, — увеличение эластичности, но уменьшение усталостной долговечности. Кроме того, у образцов, погруженных в бензин, с ростом

приложенной нагрузки уменьшалось количество усталостных циклов по сравнению с сухими контрольными образцами. В [17] исследовали влияние пяти видов авиационного топлива на прочность при растяжении образцов однонаправленного эпоксидного углепластика IM7/8552, обычно применяемого в аэрокосмических конструкциях, и не наблюдали заметного уменьшения их прочности.

Как видно из приведенного обзора литературы, выполнено мало исследований, связанных с влиянием альтернативных видов топлива на свойства композитных конструкций. В настоящей работе оценивали влияние разных видов топлива на механические свойства групп образцов из однонаправленного волокнисто-армированного углепластика, погруженных в каждый вид топлива на 14, 28 и 45 дней. После экспонирования образцы испытывали на растяжение в направлении 0 и 90° относительно направления армирующих волокон и на раскол клином для изучения деградации их механических характеристик.

2. Эксперимент

Для исследования изготовили три типа образцов для испытаний: на растяжение в направлении 0 и 90° и раскол клином. Испытания на растяжение образцов с углеродными волокнами, ориентированными под углом 0 и 90°, выполнили по стандарту ASTM D3039 для оценки влияния их экспонирования в топливе на прочность при растяжении вдоль и поперек армирующих волокон соответственно. Модифицированное испытание на раскол клином использовали для оценки качества склейки и влияния длины трещины под действием механических и химических нагрузок.

2.1. Испытание на растяжение вдоль армирующих волокон. Образцы для испытания изготовили из восьми слоев однонаправленного

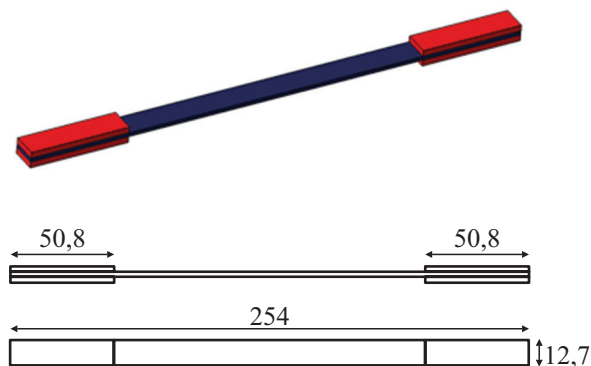


Рис. 1. Образец на растяжение вдоль армирующих волокон (размеры указаны в миллиметрах).

препрега IM7/8552, в которых волокна ориентировали под углом 0° к направлению нагружения. Слои препрега укладывали на плоскую алюминиевую пластину для прессования и полученную укладку отверждали в автоклаве. Отвержденную пластину разрезали на образцы шириной 12,7 мм, на концы которых приклеили накладки (рис. 1). Затем группы образцов на 14, 28 и 45 сут погрузили в четыре вида топлива — чистый Jet-A, смесь 50/50 Jet-A и гидрообработанного возобновляемого реактивного топлива (HRJ) (Jet-A/HRJ), смесь Фишера—Тропша (FT) и смесь 50/50 синтетического реактивного топлива S8 и Фишера—Тропша (FT) (S8/FT). Также изготовили контрольные образцы для сравнения: по пять образцов каждой группы. В ходе испытаний определили их предельную разрушающую нагрузку и прочность при растяжении.

2.2. Испытание на растяжение поперек армирующих волокон.

Образцы из четырех слоев однонаправленного препрега IM7/8552 с волокнами, ориентированными под углом 90° относительно направления приложения растягивающей нагрузки, изготовили в автоклаве. Из отвержденной пластины вырезали образцы шириной 25,4 и толщиной 0,77 мм, на концы которых приклеили накладки (рис. 2). Группы образцы погрузили для 45 дней в чистый Jet-A, гидрогенизированные сложные эфиры и жирные кислоты HEFA, смесь S8/FT (50/50 синтетического топлива S8 и топлива Фишера—Тропша FT) и синтезированное изопарафиновое топливо SIP. Изготовили по пять образцов каждой группы. Через 45 дней образцы извлекли из топлив, высушили и испытали на растяжение. В ходе испытаний для каждого образца записали диаграммы сила—перемещение.

2.3. Модифицированное испытание на раскол клином.

В исходной конструкции для испытания на раскол клином две алюминиевые пластины прикрепляли к обеим сторонам слоистого углепластика для предотвращения его изгиба в ходе испытания (рис. 3). Алюминиевые пластины

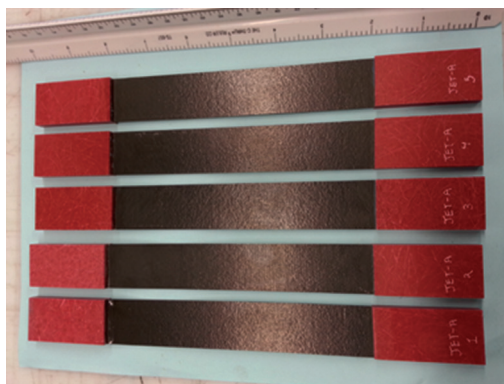


Рис. 2. Образцы на растяжение поперек армирующих волокон.

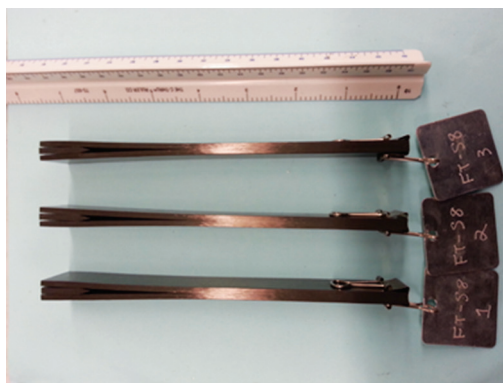


Рис. 3. Образцы для модифицированного испытания на раскол вставленными клиньями из углепластика.

заменяли дополнительными слоями из углепластика для обеспечения требуемой жесткости и устранения эффекта коррозии между алюминиевыми пластинами и углеродными волокнами. Толщина образцов, изготовленных из 32 слоев препрега IM7/8552, 5,6 мм, длина 176,53 мм, ширина 25,4 мм. В ходе укладки между 16- и 17-м слоями препрега поместили тефлоновую полосу размером 25,4×25,4 мм, удаленную после разрезки отвержденной пластины на образцы. Толщина клина 3,175, длина 25,4, ширина 25,4 мм.

Для этого вида испытания использовали четыре типа авиационного топлива — чистый Jet-A, HEFA, смесь S8/FT и топливо SIP. Изготовили по три образца каждой группы и контрольные образцы. В каждый образец для испытаний вбили клин и измерили начальную длину трещины до его погружения в топливо. В ходе экспонирования образцов в топливе длину трещин измеряли один раз в неделю.

3. Результаты

3.1. Испытание на растяжение в направлении армирующих волокон. Испытали 50 образцов и измерили их предельную разрушающую нагрузку P^{\max} , средние значения которой приведены в табл. 1 и на диаграмме рис. 4. Тест на нормальность показал, что распределения разрушающей нагрузки являются нормальными, за исключением результатов для образцов, погруженных на 28 дней в смесь Jet-A/HRJ, имевших уровень значимости 0,05. На основании этого результата и количества выборок выбрали непараметрический критерий Манна—Уитни в качестве инструмента для статистического анализа для установления, имеет ли место значительная деградация предельной разрушающей нагрузки образцов каждой группы по сравнению с контрольной. Использовали

Табл. 1

Средние значения разрушающей нагрузки P_{\max} и стандартного отклонения SD при растяжении вдоль волокон образцов, экспонированных в разных видах топлива

Топливо	Время экспонирования, дни	P_{\max} , Н	SD, Н
Jet-A	14	5984	124
	28	5768	178
	45	5834	259
Jet-A/HRJ	14	5914	281
	28	5912	110
	45	5846	218
FT	14	5950	24
	28	5774	85
	45	5940	229
S8/FT	14	6178	104
	28	5936	161
	45	5896	309
Контрольная группа		5976	130

поправку Бонферрони, оценившую уровень значимости как $0,05/12 = 0,00417$. Испытание Манна—Уитни продемонстрировало, что ни одна

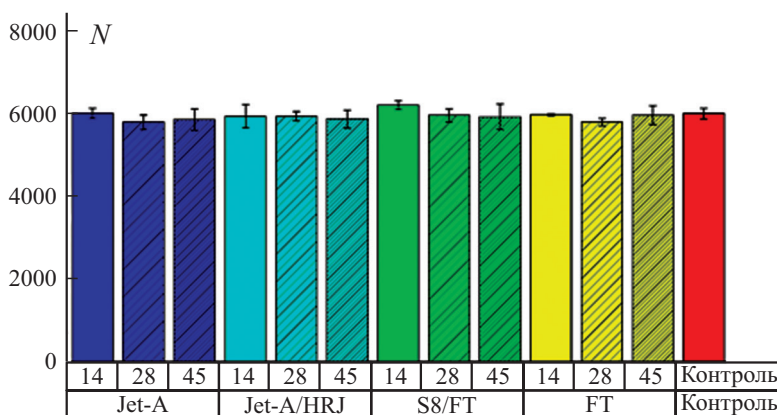


Рис. 4. Диаграмма средней разрушающей нагрузки P_{\max} образцов, экспонированных 14, 28 и 45 дней в разных видах топлива, и контрольных образцов (последний столбец справа). Чертой указано стандартное отклонение.

Табл. 2

Результаты статистического теста по критерию Манна—Уитни для разрушающей нагрузки P^{\max} образцов, испытанных на растяжение вдоль волокон, и образцов контрольной группы при $H_0 : F(x) \geq G(y)$, $H_1 : F(x) < G(y)$

Вид топлива (Время экспонирования, дни)	U	Z	P-значение
Jet-A (14)	12,5	0	0,54172
Jet-A (28)	4	-1,67115	0,04735
Jet-A (45)	7	-1,04447	0,14813
Jet-A/HRJ (14)	8	-0,83557	0,2017
Jet-A/HRJ (28)	10	-0,41906	0,33759
Jet-A/HRJ (45)	8,5	-0,73335	0,23167
S8/FT (14)	22,5	1,99053	0,9861
S8/FT (28)	12	0	0,5
S8/FT (45)	7	-1,04447	0,14813
FT (14)	12	0	0,5
FT (28)	0	-2,50672	0,00609
FT (45)	12	0	0,5

из предельных нагрузок не была значительно меньше, чем в контрольной группе (табл. 2).

3.2. Испытания на растяжение поперек армирующих волокон.

Испытали группы по пять образцов, экспонированных в топливе Jet-A, HEFA, S8/FT и SIP, и контрольную группу. Данные одного образца из группы HEFA и одного из контрольной, разрушившихся до достижения

Табл. 3

Средние значения прочности при растяжении σ^{tu} и модуля упругости E образцов каждой группы и соответствующие значения стандартного отклонения SD

Топливо	σ^{tu} , МПа	SD, МПа	E , ГПа	SD, ГПа
Jet-A	75,70	8,07	12,99	0,13
HEFA	68,09	10,14	12,69	0,53
S8/FT	78,43	8,92	12,77	0,21
SIP	75,97	5,71	12,82	0,08
Контрольная	65,94	12,69	13,04	0,17

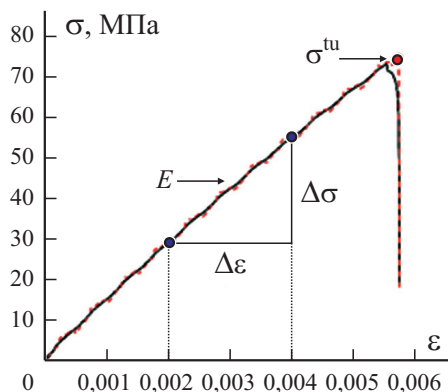


Рис. 5. Диаграмма деформирования при растяжении $\sigma - \varepsilon$; σ^{tu} и $E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ — прочность и модуль упругости: исходные (---) и сглаженные (—) данные.

предельной нагрузки, исключили из статистического анализа прочности при растяжении σ^{tu} и модуля упругости E .

Предел прочности σ^{tu} и растягивающее напряжение σ вычисляли согласно стандарту ASTM D3039 как

$$\sigma^{\text{tu}} = P^{\text{max}} / A, \quad (1)$$

$$\sigma = P / A, \quad (2)$$

где P^{max} — максимальное усилие перед разрушением; A — площадь поперечного сечения образца; P — приложенная растягивающая нагрузка.

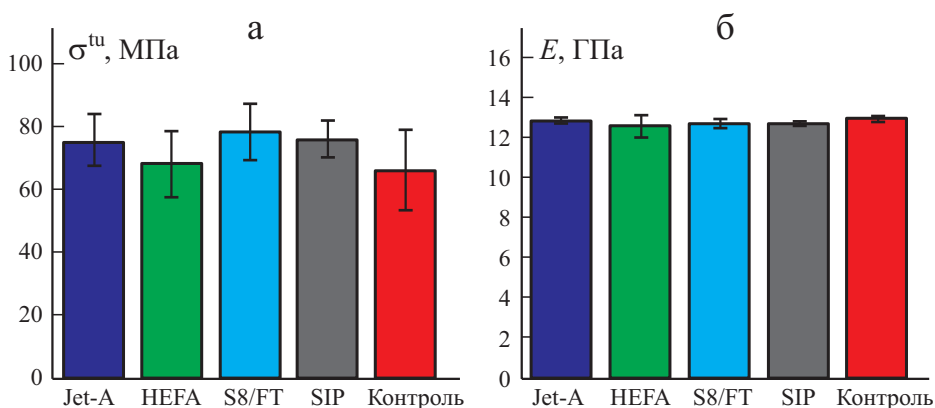


Рис. 6. Диаграммы средних значений прочности при растяжении σ^{tu} (а) и модуля упругости E (б) образцов, экспонированных в разных видах топлива, и контрольных образцов (последние столбцы диаграмм). Чертой указано стандартное отклонение.

Табл. 4

Результаты статистического теста по критерию Манна—Уитни для прочности σ^{tu} образцов, испытанных на растяжение поперек волокон, и образцов контрольной группы при $H_0 : F(x) \geq G(y)$, $H_1 : F(x) < G(y)$

Топливо	U	Z	P-значение
Jet-A	15	1,10227	0,91105
HEFA	10	0,43301	0,76476
S8/FT	15	1,10227	0,91105
SIP	15	1,10227	0,91105

Модуль упругости E при растяжении и деформацию ε вычисляли по формулам

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon, \tag{3}$$

$$\varepsilon = \delta / L, \tag{4}$$

где δ — перемещение; L — исходная длина образца. Для устранения шума в экспериментальных данных использовали сглаживающую функцию с усреднением значений 50 соседних экспериментальных точек.

Средние значения прочности при растяжении σ^{tu} и модуля упругости E для каждой группы образцов иллюстрируют данные табл. 3 и рис. 5 и 6.

Используя определенные значения прочности при растяжении σ^{tu} и модуля упругости E образцов, выполнили статистический анализ для выяснения, не имеют ли они значительного отличия от аналогичных характеристик контрольных образцов. Тест на нормальность продемон-

Табл. 5

Результаты статистического теста по критерию Манна—Уитни для модуля упругости E образцов, испытанных на растяжение поперек волокон, и образцов контрольной группы при $H_0 : F(x) \geq G(y)$, $H_1 : F(x) < G(y)$

Топливо	U	Z	P-значение
Jet-A	9	-0,12247	0,45126
HEFA	4	-1,01036	0,15616
S8/FT	3	-1,59217	0,05567
SIP	1	-2,08207	0,01867

Табл. 6

Среднее увеличение длины трещины Δl и стандартного отклонения SD образцов, экспонированных в разных видах топлива

Топливо	Δl , мм	SD, мм
Jet-A	4,01	0,74
HEFA	3,66	0,41
S8/FT	3,84	0,86
SIP	3,44	0,88
Контрольные	3,27	1,47

стрировал, что все данные для модуля упругости при растяжении имеют нормальное распределение. Однако данные по прочности при растяжении для образцов, погруженных в смесь S8/FT, не прошли тест на нормальность с уровнем статистической значимости 0,05. На основании результатов теста на нормальность и количества образцов в каждой группе решили использовать критерий Манна—Уитни с поправкой Бонферрони, что сделало уровень значимости равным $0,05/4 = 0,0125$. Согласно критерию Манна—Уитни ни одна группа образцов, погруженных в топлива, не продемонстрировала деградацию прочности или модуля упругости при растяжении по сравнению с таковыми у контрольной группы (см. данные табл. 4 и 5).

3.3. Модифицированное испытание на раскол клином. В каждый вид топлива погружали по три расклиненных образца. Значения начальной длины трещин измеряли сразу после вбивания клина в образцы.



Рис. 7. Развитие трещины в модифицированном испытании на раскол клином.

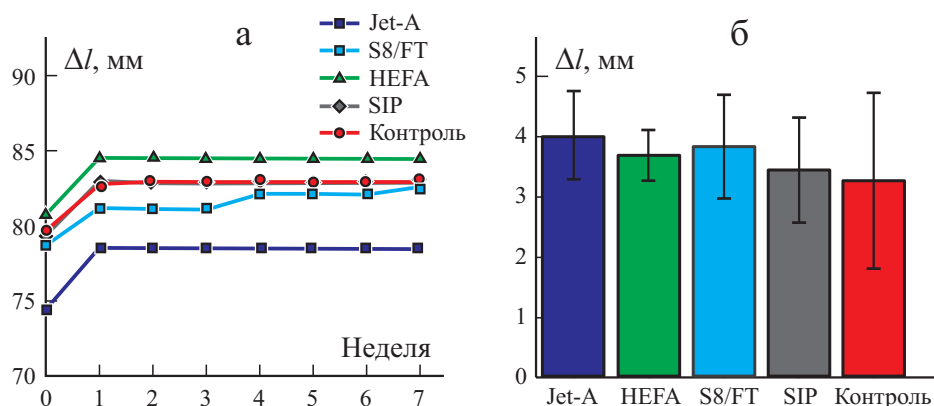


Рис. 8. Зависимость средней длины трещины Δl от времени экспонирования групп образцов в разных видах топлива (а) и ее диаграмма с указанием стандартного отклонения (б).

Образцы погрузили в топливо, и окончательную длину трещины измерили через 45 дней. Увеличение длины трещины Δl вычислили как разность конечной и начальной длины. Среднее увеличение длины трещины в каждой группе образцов иллюстрируют данные табл. 6. Для статистического анализа данных роста длины трещины в каждой группе образцов в виду небольшого размера выборки использовали критерий Манна—Уитни с поправкой Бонферрони ($\alpha = 0,05/4 = 0,0125$). Анализ не выявил значительных различий увеличения длины трещин Δl у испытанных групп образцов. Полученные результаты представлены на рис. 7 и 8 и в табл. 7.

Табл. 7

Результаты статистического теста по критерию Манна—Уитни для увеличения длины трещины Δl в испытании образцов на раскол клином и образцов контрольной группы при $H_0 : F(x) \leq G(y)$,
 $H_1 : F(x) > G(y)$

Топливо	U	Z	P-значение
Jet-A	5	0	0,5
HEFA	4	0	0,66874
S8/FT	6	0,43644	0,33126
SIP	5	0	0,5

Заключение

В настоящей работе изучали влияние разных видов топлива для авиационных двигателей на механические свойства эпоксидного волокнисто-армированного углепластика. Испытания на растяжение образцов из однонаправленного углепластика вдоль и поперек волокон использовали для оценки влияния длительного контакта с топливом для реактивных двигателей на механическую прочность углепластика, а испытание на раскол клином — для оценки этого влияния на прочность склейки.

Статистический анализ значений разрушающей нагрузки, модуля упругости и увеличения длины трещины, полученных в ходе испытаний на растяжение вдоль и поперек армирующих волокон и раскол клином образцов, экспонированных в разных видах топлива для турбинных двигателей, и образцов контрольной группы с использованием критерия Манна—Уитни не выявил существенного различия этих характеристик.

Таким образом, в настоящем исследовании предложена новая идея испытания композитных конструкций, подверженных влиянию топлива. Установлено, что рассматриваемые турбинные топлива не влияли на прочность при растяжении вдоль и поперек волокон и прочность склейки между слоями однонаправленного углепластика. Результаты настоящего исследования получены только для однонаправленного эпоксидного углепластика. Поэтому необходимы дополнительные исследования для оценки влияния длительного контакта с турбинным топливом на механические свойства композитных материалов других типов и схем укладки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guermazi N., Tarjem A. B., Ksouri I., and Ayedi H. F.* On the durability of FRP composites for aircraft structures in hygrothermal conditioning // *Composites: Part B.* — 2016. — Vol. 85. — P. 294—304.
2. *He X.* A review of finite element analysis of adhesively bonded joints // *Int. J. Adhes. Adhes.* — 2011. — Vol. 31, No. 4. — P. 248—264.
3. *Banea M. D. and da Silva L. F.* Adhesively bonded joints in composite materials: an overview // *Proc. Institution Mech. Eng. Part L // J. Mater. Des. Appl.* — 2009. — Vol. 223, No. 1. — P. 1—8.
4. *Yilmaz N. and Atmanli A.* Sustainable alternative fuels in aviation // *Energy.* — 2017. — Vol. 140. — P. 1378—1386.

5. *McWilliams M. R.* Ensuring surety of supply through sustainable aviation fuels // *Air & Space Power J.* — 2017. — Vol. 31, No. 1. — P. 81—86.
6. *Song B., Wang X., and Zhang H.* The aircraft composite integral fuel tank fire safety performance analysis and shrinkage ratio simulation calculation // *Procedia Eng.* — 2013. — Vol. 52. — P. 320—324.
7. *Wang F., Jia S., Wang Y., and Yue Z.* Impact response study on covering cap of aircraft big-size integral fuel tank // *Appl. Compos. Mater.* — 2016. — Vol. 23, No. 5. — P. 953—972.
8. *Kim G. and Sterkenburg R.* Investigating the effects aviation fluids have on the flatwise compressive strength of Nomex® honeycomb core material // *J. Sandwich Struct. Mater.* — 2019. DOI:10.1177/1099636219836645
9. *Aoki Y., Yamada K., and Ishikawa T.* Effects of water absorption and temperature on compression after impact (cal) strength of CFRP laminates // *Proc. 16th ICCMs, Tokyo, Japan, 2007.*
10. *Kumar D. J., Singh A. K., and Singh R. P.* Accelerated environmental degradation of fiber reinforced composites by boiling water // *Proc., Properties and Performance Compos. Mater.* — 2008. — Vol. 4. — P. 2652—2658.
11. *Zhong Y. and Joshi S. C.* Initiation of structural defects in carbon fiber reinforced polymer composites under hydrothermal environments // *J. Compos. Mater.* — 2016. — Vol. 50, No. 8. — P. 1085—1097.
12. *Meng J. and Wang Y.* A review on artificial aging behaviors of fiber reinforced polymer-matrix composites // *Proc. Int. Symp. Mater. Appl. Eng. (SAME 2016), Chiang Mai, Thailand, 2016.*
13. *Lv X. J., Zhang Q., Li X. F., and Xie G. J.* Study of the influence of immersion on the carbon fiber/epoxy composites // *J. Rein. Plast. Compos.* — 2008. — Vol. 27, No. 6. — P. 659—666.
14. *Kim G., Sterkenburg R., and Tsutsui W.* Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex® honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 206. — P. 535—549.
15. *Khoury C., Sterkenburg R., Wang P., and Dubikovsky S.* Investigating the effects of deicing fluids on the structural properties of bonded composites aircraft structures // *Proc. 7th Asian-Australian Conf. Compos. Mater., Taipei, Taiwan, 2010.*
16. *Kremmel A., Danzler D., Wang P., and Sterkenburg R.* Investigating the chemical resistance of adhesively bonded composite material Joints in the presence of various fluids found in or around aircraft structures // *Proc. 2011 ATEC Conf., Orlando, Florida, 2011.*
17. *Sterkenburg R., Khoury C., Wang P., and Dubikovsky S.* Investigating the effects of fluids on carbon fiber aircraft structures // *Proc. 2011 SAMPE Technical Conf., Long Beach, California, 2011.*
18. *Moses C.* Comparative Evaluation of Semi-Synthetic Jet Fuels [Report]. — Universal Technology Corporation, New Braunfels, TX, USA, 2008.
19. *Taghavi S. G.* Moisture Effects on High-performance Polymer Composites. — Master's Thesis, University of Toronto, Canada, 2000.

20. *Condruz M., Paraschiv A., Pușcașu C., and Vintilă I. S.* Tensile behavior of humid aged advanced composites for helicopter external fuel tank development // Proc. 13th Nat. Congress on Theoret. Appl. Mech. (NCTAM 2017), Sofia, Bulgaria, 2017.

21. *Genanu N.* Study the effect of immersion in gasoline and kerosene on fatigue behavior for epoxy composites reinforcement with glass fiber // Proc. Fifth Sci. Conf. of University of Wasit, Al-Kut City, Wasit, Iraq, 2011.

Поступила в редакцию 12.06.2020

Окончательный вариант поступил 11.02.2021

Received June 12, 2020 (Feb. 11, 2021)
