

Научная статья

УДК 678.83

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59

АНТИФРИКЦИОННЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОРГАНОПЛАСТИКИ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ САМОЛЕТОВ РАЗРАБОТКИ ОКБ СУХОГО

Г.С. Кулагина¹, Ф.А. Насонов², Г.Ф. Железина¹, А.С. Демина²,
Н.А. Соловьева¹, Б.Б. Морозов², П.М. Шульдешова¹, А.А. Филатов²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная корпорация» Опытное конструкторское бюро Сухого, г. Москва, Russia; info@su.uacrussia.ru

Аннотация. Проведены испытания элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого, изготовленных из препрегов антифрикционных и конструкционных органо-пластиков. Показана эффективность применения антифрикционных и конструкционных органо-пластиков для увеличения износостойкости и ресурса подвижных элементов механизации самолета, а также контактирующих с ними неподвижных деталей. Подтверждена возможность изготовления элементов механизации самолета путем совместного формирования препрегов антифрикционного и конструкционного органо-пластиков.

Ключевые слова: органо-пластик, трение, износостойкость, препрег, механизация самолетов

Для цитирования: Кулагина Г.С., Насонов Ф.А., Железина Г.Ф., Демина А.С., Соловьева Н.А., Морозов Б.Б., Шульдешова П.М., Филатов А.А. Антифрикционные и конструкционные органо-пластики для элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59.

Scientific article

ANTIFRICTION AND CONSTRUCTIONAL ORGANOPLASTICS FOR ELEMENTS OF DESIGNS OF AIRPLANES OF DEVELOPMENT SUKHOI DESIGN BUREAU

G.S. Kulagina¹, F.A. Nasonov², G.F. Zhelezina¹, A.S. Demina²,
N.A. Solovyeva¹, B.B. Morozov², P.M. Shuldeshova¹, A.A. Filatov²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Public Joint Stock Company «United Aircraft Corporation» Experimental Design Bureau Sukhoi, Moscow, Russia; info@su.uacrussia.ru

Abstract. Tests of details of airplanes of Sukhoi Design Bureau are executed. Details are made of prepregs of antifriction material and constructive organoplastics. Efficiency of antifriction material and constructional organoplastics for raising resistance to antifriction loss and for increasing resource of moving elements of an airplane mechanization, as well as fixed parts, which are in contact, are shown. The possibility of production of mechanization elements of an airplane by means of the co-forming prepregs of antifriction and constructive organoplastics has been proved.

Keywords: organoplastic, friction, wear resistance, prepreg, mechanization of airplanes

For citation: Kulagina G.S., Nasonov F.A., Zhelezina G.F., Demina A.S., Solovyeva N.A., Morozov B.B., Shuldeshova P.M., Filatov A.A. Antifriction and constructional organoplastics for elements of designs of airplanes of development Sukhoi design bureau. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59.

Введение

Авиация и авиастроение – одни из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, потребляющих наукоемкую продукцию, в частности высокоэффективные материалы и технологии [1–3]. Для повышения весовой эффективности авиационной техники требуются принципиально новые материалы, способные выполнять функции как конструкционных, так и функциональных материалов. Этими качествами в значительной мере обладают полимерные композиционные материалы [4–9]. Например, стеклопластики сочетают прочность и радиопрозрачность [10], углепластики – жесткость и термостабильность линейных размеров [11]. Органопластики наряду с высокими механическими характеристиками могут использоваться для защиты от высокоскоростного ударного воздействия [12].

В настоящее время в авиационной промышленности накоплен большой опыт применения органопластиков, армированных полимерными волокнами, для изготовления деталей конструкционного и функционального назначения. Конструкционные арамидные органопластики позволили создать легкие обшивки, стойкие к ударным и эрозийным повреждениям, воздействию длительных и усталостных нагрузок. Из органопластиков выполнены слабо- и средненагруженные элементы самолетов Ту-204, Ту-334, вертолетов «Ансат», Ка-62 и др.

Конструкционные органопластики последнего поколения (ВКО-24, ВКО-25) на основе новых марок арамидных волокон Русар-НТ обладают высоким уровнем механических свойств и максимальной устойчивостью к поглощению влаги ($\leq 1,5\%$). Органопластик ВКО-25 изготавливается с использованием связующего ВСЭ-34, применяется совместно со стекло- и углепластиковыми на основе данного связующего. Сохранение механических свойств органопластика ВКО-25 после воздействия широкого спектра климатических факторов составляет $\geq 90\%$, что позволяет рассматривать его в качестве материала для изделий, эксплуатируемых во всеклиматических условиях.

Антифрикционные органопластики, разработанные специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, применяются во многих конструкциях тяжело нагруженных узлов трения скольжения самолетов и вертолетов, обеспечивают работоспособность подшипников без смазки в течение всего периода эксплуатации. Для армирования антифрикционных органопластиков используются ткани сложной текстильной структуры, содержащие наряду с политетрафторэтиленовыми (ПТФЭ) волокнами также высокопрочные полиимидные, полиоксадиазольные и др. В процессе трения ПТФЭ-волокна формируют на поверхности контакта тонкую самосмазывающуюся пленку, образующуюся благодаря кристаллической структуре, способной к многократному деформированию без накопления остаточных деформаций. Антифрикционный органопластик марки Оргалон АФ-1М применяют для изготовления шарниров системы управления и стоек шасси, роликов и шарниров предкрылка и закрылка самолета, подшипников опоры крыла, шарниров крепления демпфера лопастей самолетов и вертолетов и др. [13].

В конструкциях самолетов ОКБ Сухого имеется ряд деталей, в которых целесообразно сочетать конструкционные и антифрикционные органопластики для повышения эффективности эксплуатации изделия. Это так называемые гибкие элементы – обводообразующие детали каркаса планера, которые устанавливаются в зонах навески

механизации самолета [14–16]. Гибкие элементы обеспечивают создание аэродинамического контура при всех рабочих углах отклонения механизации за счет перекрытия щелей и зазоров между каркасом и механизацией. Отсутствие (минимизация) таких зазоров при любых углах отклонения является необходимым условием для обеспечения эффективной работы элементов механизации, а также для снижения радиолокационной заметности и повышения аэродинамического качества самолета.

На рис. 1 представлена схема установки гибкого элемента в конструкции. Гибкие элементы изготавливаются с предварительно увеличенной кривизной (преднатягом), обусловленной значением вертикального перемещения задней кромки гибкого элемента и допусками на зазор. Гибкий элемент деформируется при контакте с ответной частью элемента механизации (обтекателем/лобовиком) и обеспечивает непрерывный прижим по задней кромке к отклоняемой поверхности механизации [17].

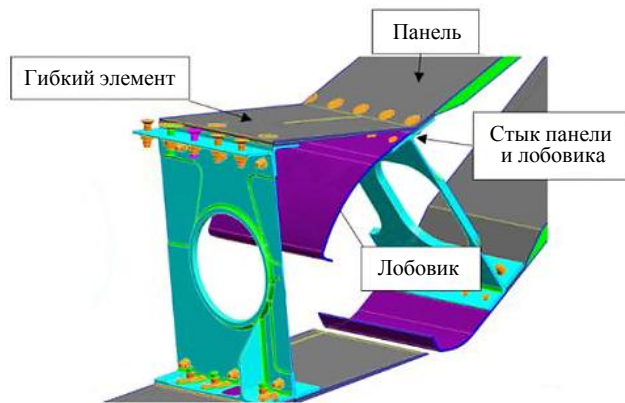


Рис. 1. Схема установки гибкого элемента в конструкции [17]

При эксплуатации гибких элементов в составе авиационных конструкций возникает ряд проблем:

- гибкий элемент находится в постоянном контакте с подвижными элементами механизации, при этом образуется пара трения, вследствие чего происходит износ конструкции;
- под действием различных видов нагружения появляются остаточные деформации гибкого элемента, которые могут привести к появлению зазоров между каркасом и механизацией.

Данная работа направлена на исследование износостойкости и деформации в процессе эксплуатации гибких элементов аэродинамического управления самолета, изготовленных из разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ органополимеров. Представлены результаты опробования технологии изготовления гибких элементов с применением препрегов конструкционного и антифрикционного органополимеров, а также результаты испытаний, подтверждающие эффективность антифрикционного покрытия для снижения износа конструкции.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Объектами исследования являются препреги конструкционного и антифрикционного органополимеров, органополимеры и конструктивно-подобные образцы (КПО), изготовленные из них. В качестве армирующего наполнителя в конструкционном органополимере использовали ткань сатинового переплетения с поверхностной плотностью

90 г/м² из арамидной нити Руслан с линейной плотностью 14,3 текс. Для армирования антифрикционного органопластика использовали комбинированную ткань с поверхностной плотностью 300 г/м², содержащую нити ПТФЭ.

Препреги конструкционного и антифрикционного органопластиков получали путем пропитки расплавом модифицированного эпоксидного связующего. Содержание связующего составило 50 и 20 % для конструкционного и антифрикционного препрегов соответственно.

Из препрегов изготавливали образцы для проведения лабораторных испытаний и КПО гибких элементов для исследования износостойкости и величины остаточной деформации на испытательных стендах.

Конфигурация и схема армирования КПО гибких элементов выбраны с учетом опыта ОКБ Сухого в проектировании элементов механизации летательных аппаратов и сопряженных агрегатов. В соответствии с разработанными чертежами проводили сборку заготовок из слоев препрега конструкционного органопластика с поверхностным слоем препрега антифрикционного органопластика и без него. На рис. 2 показан внешний вид заготовок, собранных из слоев препрега.

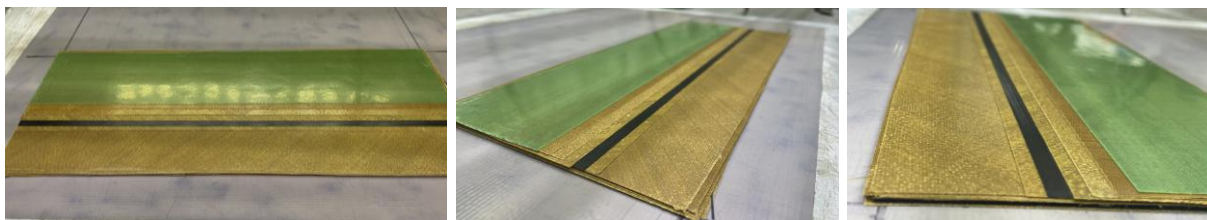


Рис. 2. Общий вид пакета-заготовки конструктивно-подобного образца гибкого элемента

Формование КПО проводили в автоклаве при повышенных значениях температуры и давления в соответствии с температурно-временными параметрами отверждения эпоксидного связующего.

Трибологические испытания проводили на лабораторной установке И-47 в режиме сухого трения на воздухе при температуре 20 °С. Вид сопряжения – торцевое трение двух цилиндрических образцов. В качестве контртела применяли сталь марки 30ХГСА, а также углепластик на основе высокопрочных углеродных волокон и эпоксидного связующего. Линейная скорость скольжения составила 0,15 м/с, удельная нагрузка (контактное давление): 3,0 МПа, продолжительность испытаний: 60 мин.

Испытания КПО по оценке износостойкости проводили на специализированном испытательном стенде при частоте нагружения от 0,5 до 1,0 Гц. Максимальное количество циклов нагружения составило 768000. Условия проведения испытаний на износостойкость: температура окружающей среды – от 10 до 30 °С, относительная влажность воздуха – от 45 до 85 %.

Испытания КПО для определения величины остаточных деформаций после нагружения проводили на стенде с использованием специальных приспособлений.

Результаты и обсуждение

Совместное формование препрегов антифрикционного и конструкционного органопластиков

Препрег антифрикционного органопластика имеет типовые органолептические показатели, свойственные препрегам на основе расплавных связующих и тканых наполнителей. Препреги пригодны для работы методом ручной выкладки при сборке заготовок. Типовые технологические операции с препрегом (размотка с катушки,

раскрой, ручные послойные выкладка и прикатка) не требуют специализированного оборудования и инструментов.

Для оценки совместимости препрегов осуществляли сборку пакета из 20 слоев препрега конструкционного органопластика и одного слоя антифрикционного препрега в качестве верхнего слоя заготовки. Далее проведено формование пакета-заготовки препрегов автоклавным методом. Внешний осмотр и акустический контроль отвержденного органопластика с антифрикционным покрытием показал отсутствие дефектов и расслоений. На рис. 3 представлен гибкий элемент из арамидного органопластика с нанесенным антифрикционным покрытием.



Рис. 3. Гибкий элемент из арамидного органопластика с нанесенным антифрикционным покрытием [18]

Проведенные работы по совместному формованию препрегов подтвердили технологическую реализуемость изготовления конструкций гибких элементов с антифрикционным покрытием в условиях опытного производства ОКБ Сухого.

Испытания на трение и износостойкость

Гибкие элементы при эксплуатации контактируют с элементами каркаса и подвижными элементами механизации, образуя пары трения. Силы трения имеют переменный характер: чем больше отклонение элемента от среднего положения, тем большие значения усилия и силы трения, вызывающие изнашивание контактирующих поверхностей, возникают. Материалы для изготовления гибких элементов должны обеспечивать минимальное изнашивание деталей конструкции.

Для оценки эффективности применения антифрикционного материала (на основе ткани, включающей ПТФЭ-волокна) в составе гибкого элемента предварительно проведены сравнительные лабораторные испытания органопластиков (конструкционного арамидного и антифрикционного) в составе различных пар трения.

В результате испытаний на лабораторной установке трения определены триботехнические характеристики (коэффициент трения и весовой износ) органопластиков. Интенсивность весового износа определяли как удельный весовой износ органопластиков (конструкционного или антифрикционного) после испытаний на трение в сравнении с соответствующими исходными материалами (см. таблицу).

Триботехнические свойства органопластиков (средние значения) [17]

Пара трения	Коэффициент трения	Интенсивность весового износа
Арамидный органопластик–сталь	0,18	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Антифрикционный органопластик–сталь	0,06	Без износа
Антифрикционный органопластик–углепластик	0,08	$0,01 \cdot 10^{-8}$

Лабораторные триботехнические испытания показали эффективность антифрикционного органопластика в сравнении с арамидным конструкционным органопластиком. При заданных условиях испытаний коэффициент трения пары «арамидный органопластик–сталь» составляет 0,18, что в 3 раза больше по сравнению с парой трения «антифрикционный органопластик–сталь». Проведенные исследования подтверждают целесообразность использования антифрикционного покрытия в конструкции гибкого элемента.

Лабораторные триботехнические испытания позволяют получить только сравнительную оценку износостойкости материалов. Для анализа работоспособности антифрикционного органопластика в качестве покрытия гибких элементов в заданных условиях проводили испытания КПО на износостойкость и ресурс на испытательном стенде, позволяющем имитировать реальные эксплуатационные нагрузки.

Перед испытаниями КПО гибких элементов закрепляли на пластину, предназначенную для неподвижной установки образцов на стенде. На рис. 4 показан общий вид КПО в сборке с пластиной. Испытаниям подвергали КПО с антифрикционным покрытием и без него.

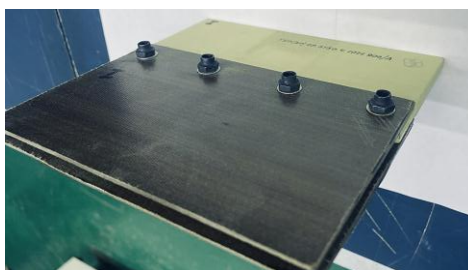


Рис. 4. Общий вид конструктивно-подобного образца гибкого элемента в сборке с пластиной

Подвижная часть стенда представляет собой клин (рис. 5), форма которого при движении обеспечивает различные углы отклонения КПО гибкого элемента, закрепленного неподвижно на стенде. Клин выполнен из алюминиевого сплава с твердым анодным покрытием.



Рис. 5. Вид подвижного элемента (клина) в составе стенда для испытаний

После прохождения половины циклов нагружений КПО снимали с приспособлений, проводили визуальный контроль внешнего вида и целостности поверхностных слоев КПО и клина, который подтвердил отсутствие повреждений. Далее испытания продолжали до полного цикла.

После проведения всего цикла испытаний КПО снимали с приспособления и подвергали внешнему осмотру. Повреждений КПО не обнаружено. На композиционных КПО произошла контактная приработка по краям, царапин и прочих дефектов не выявлено.

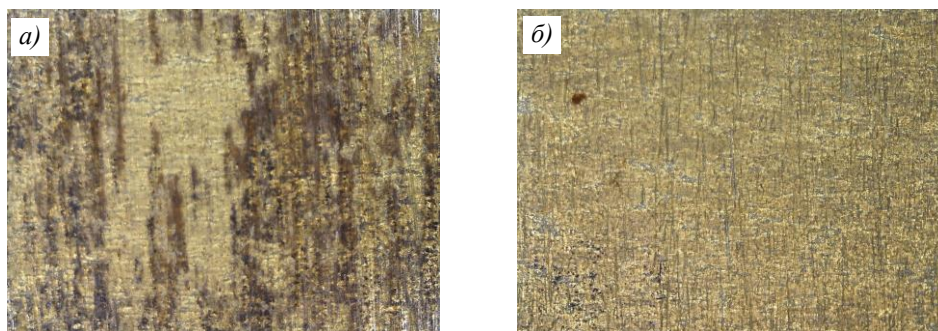


Рис. 6. Поверхности клина после испытаний на износ в паре трения с конструктивно-подобным образцом гибкого элемента с антифрикционным покрытием (а) и без него (б)

Для оценки степени износа ответных поверхностей (клина) проведены сравнительные измерения шероховатости до и после проведения испытаний на износ в паре трения с КПО гибких элементов. Анализ состояния поверхности клина после испытаний на износ в контакте с антифрикционным органопластиком в качестве верхнего слоя КПО гибкой обшивки показал, что на поверхности клина присутствуют следы полимера черного цвета, перенесенного с композиционной обшивки (рис. 6). Признаков повреждений и износа поверхности клина не наблюдали. Таким образом, в соответствии с механизмом трения, реализуемым в полимерных материалах, в процессе трения на контртело осуществлен массоперенос ПТФЭ, входящего в состав антифрикционного покрытия, с образованием тонкого самосмазывающегося слоя. Если антифрикционное покрытие на КПО гибкого элемента отсутствует, то поверхность клина после испытаний имеет следы износа, наблюдаются отдельные признаки повреждения твердого анодного покрытия, присутствуют участки с «металлическим блеском» и следы наноса полимера на поверхность клина.

Исследование возможности восстановления поврежденного антифрикционного покрытия

Помимо технологий изготовления деталей с применением препрегов конструкционных и антифрикционных органопластиков, в данной работе исследована возможность восстановления поврежденного антифрикционного покрытия на гибких элементах. С этой целью получены образцы конструкционного арамидного органопластика с антифрикционным слоем. Препрег антифрикционного органопластика формовали на поверхности отвержденного арамидного органопластика двумя методами – вакуум-автоклавным и вакуумным. Прочность соединения антифрикционного и конструкционного органопластиков оценивали по значению межслойной прочности при сдвиге, определяемой испытанием образцов на растяжение. Вид образца для проведения испытаний приведен на рис. 7. Результаты испытаний показали высокий уровень прочности при сдвиге данного соединения (2,5–2,8 МПа), что близко к уровню прочности для образцов, изготовленных совместным формованием препрегов антифрикционного и конструкционного органопластиков. Полученные данные подтверждают возможность проведения ремонта антифрикционного покрытия на поврежденных или изношенных гибких обшивках.



Рис. 7. Фрагмент образца для испытаний на прочность при сдвиге, имитирующего ремонтные процедуры [17]

**Определение остаточной деформации
конструктивно-подобного образца после нагружения**

В процессе эксплуатации под воздействием механических нагрузок могут накапливаться повреждения и появляться остаточные деформации в элементах конструкции [19–21].

Появление остаточных деформаций гибких элементов после воздействия эксплуатационных нагрузок – неблагоприятное явление, поскольку может привести к отклонению гибких элементов и, как следствие, неполному перекрытию зазоров между каркасом и механизацией, снижению эффективности работы механизации, ухудшению аэродинамического качества самолета.

Для решения этой проблемы исследовано влияние схемы армирования органо-пластика на деформационные свойства КПО гибкого элемента из препрега. Для выбора рациональной схемы армирования, обеспечивающей минимальный уровень остаточных деформаций после нагружения, проведены испытания на стенде (рис. 8). Перед испытаниями КПО проходили неразрушающий контроль на отсутствие механических дефектов и повреждений.

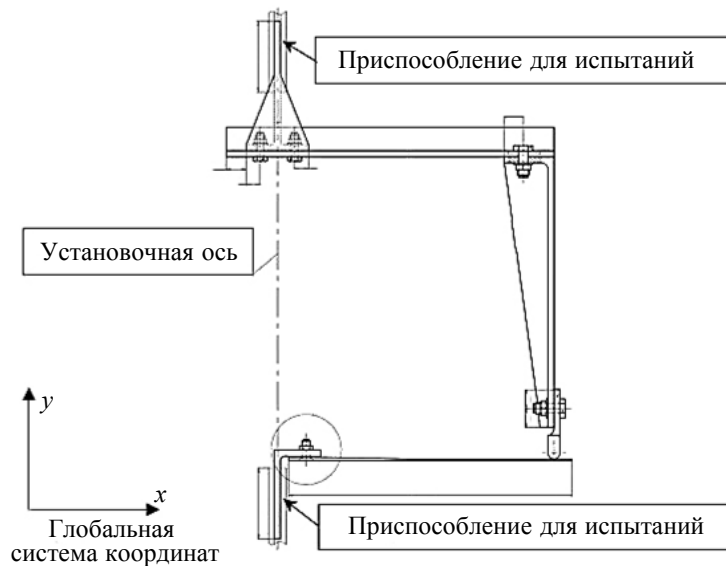


Рис. 8. Схема испытательного стенда [17]

Закрепление на стенде осуществляли путем соединения КПО с профилем с помощью механического крепежа. Нагружение проводили принудительным перемещением упора вдоль установочной оси по направлению к профилю. Происходило поэтапное нагружение принудительными перемещениями упора $\Delta y = 2, 4, 6, 8$ мм и $\Delta y = 3, 6, 9, 12$ мм для КПО длиной 100 и 150 мм соответственно. На рис. 9 показана зависимость действующей силы в упоре от перемещения самого упора.

После каждого нагружения КПО разгружали и определяли остаточные перемещения свободной кромки. Эти перемещения свидетельствуют о наличии остаточной деформации КПО после снятия нагрузки и позволяют определить ее величину. На рис. 10 приведена зависимость остаточных перемещений свободной кромки КПО от принудительного перемещения упора при нагружении.

Проведенные испытания позволили установить наличие остаточных деформаций КПО гибких элементов после нагружения и разгрузки на испытательном стенде. Показано, что при увеличении перемещения упора при нагружении закономерно повышается остаточная деформация. Наличие остаточных деформаций в КПО после нагружения и разгрузки (в частности при консольном изгибе, как это показано в данной

работе) свойственно полимерным композиционным материалам и является следствием различных факторов: химической природы полимерной матрицы, релаксации внутренних напряжений, накопления микрповреждений в объеме композита и т. д. [22–27].

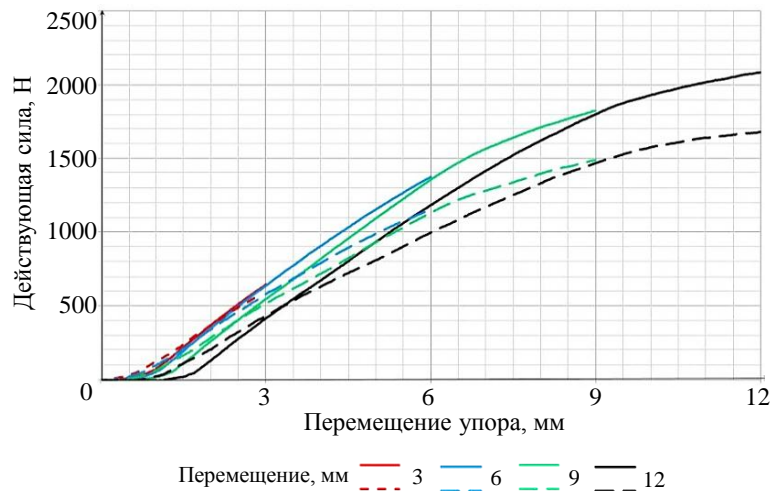


Рис. 9. Зависимости действующей силы от перемещений упора при нагружении конструктивно-подобного образца из препрега органопластика со схемой армирования [0, 90] (—) и [0, -45, 45, 90] (- - -) [17]

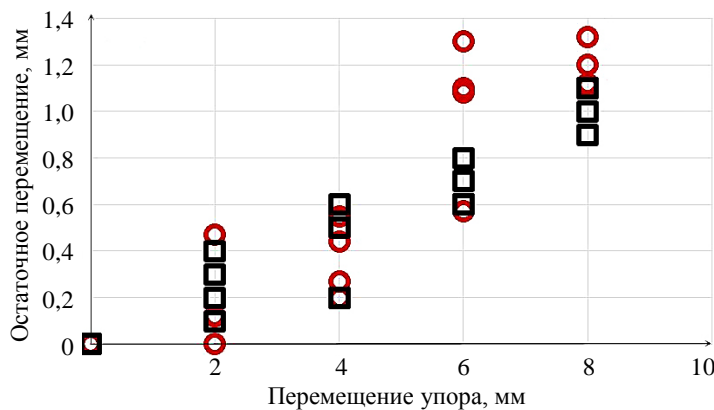


Рис. 10. Зависимость остаточных перемещений свободной кромки от перемещений упора при нагружении конструктивно-подобного образца из препрега органопластика со схемой армирования [0, 90] (○) и [0, -45, 45, 90] (□) [17]

Установлено, что уровень остаточной деформации зависит от схемы армирования конструкционного органопластика. При схеме армирования [0, -45, 45, 90] отмечены меньшие остаточные деформации по сравнению со схемой армирования [0, 90] при нагружении КПО, соответствующем $\Delta u = 6$ и больше.

Заключения

Проведено технологическое опробование и подтверждена реализуемость технологии изготовления гибких элементов деталей аэродинамического управления самолета путем совместного формования препрегов антифрикционного и конструкционного органопластиков.

Проведены испытания КПО на износостойкость в паре трения с алюминиевым сплавом. Установлено, что использование антифрикционного органопластика в качестве покрытия обеспечивает износостойкость гибких элементов и ответной поверхности из

алюминиевого сплава с твердым анодным покрытием в течение заданного ресурса. Экспериментально подтверждено, что наличие антифрикционного покрытия в паре трения возвратно-поступательного типа создает благоприятные условия для значительного увеличения ресурса при трении подвижных элементов механизации и неподвижных частей теоретического контура летательных аппаратов.

Показана возможность восстановления поврежденного антифрикционного покрытия на гибких элементах из арамидного органопластика с использованием препрега антифрикционного органопластика. Ремонт осуществляется путем приформовывания препрега к отвержденному органопластику методами вакуумного и вакуум-автоклавного формования.

Определены рациональные конфигурации и схемы армирования гибких элементов, позволяющие минимизировать уровень остаточных деформаций при эксплуатации.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.
2. Каблов Е.Н., Шевченко Ю.Н., Гриневич А.В. Проблемы паспортизации авиационных материалов на современном этапе // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2007: юбил. науч.-техн. сб. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2007. С. 388–396.
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. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Сагомонова В.А., Целикин В.В. Вибропоглощающий материал с перфорированным армирующим слоем // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
8. Сидорина А.И. Тканые металлоуглеродные армирующие наполнители для ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.
9. Мараховский П.С., Баринев Д.Я., Мальцева Е.Ю. Влияние армирующих добавок на структуру и теплофизические свойства ледяных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
10. Гуртовик И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2002. 368 с.
11. Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Комаров В.В. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1. С. 100–117. DOI: 10.18287/22541-7533-2018-17-1-100-117.

12. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–364.
13. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Левакова Н.М. Антифрикционные органопластики для высоконагруженных узлов трения // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96.
14. Насонов Ф.А., Кулагина Г.С., Демина А.С., Железина Г.Ф., Морозов Б.Б., Соловьева Н.А., Шульдешова П.М. Применение композитов со специальными самосмазывающимися антифрикционными покрытиями в авиационной отрасли // Мат. XLIII Всерос. конф. «Наука и технологии»: в 2 т. М.: РАН, 2023. Т. 1. С. 21–27.
15. Михайлов Ю.С. Повышение эффективности механизации стреловидного крыла // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23. № 6. С. 101–18. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120.
16. Су-57 – российский истребитель пятого поколения. URL: https://dzen.ru/a/YW4C16Kc_DqzBOeC (дата обращения: 01.02.2024).
17. Кулагина Г.С., Насонов Ф.А., Железина Г.Ф., Демина А.С., Соловьева Н.А., Морозов Б.Б., Шульдешова П.М., Филатов А.А. Технология гибких элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого с применением препрегов антифрикционных и конструкционных органопластиков // Мат. XLIV Всерос. конф. «Наука и технологии», посв. 300-летию РАН и 100-летию академика В.П. Макеева: в 2 т. М.: РАН, 2024. Т. 1. С. 91–99.
18. Лучшие самолеты Сухого: документальный сериал. Вып.: Су-57 (эфир от 04.12.2023) // Телеканал «Звезда»: офиц. сайт. URL: <https://tvzvezda.ru/video/films-online/20241301629-InBa9.html/20231241017-6J1p9.html> (дата обращения: 01.02.2024).
19. Акулин П.В. Накопление повреждений в композиционных панелях при малоцикловом нагружении // Вестник МАИ. 2023. Т. 30. № 2. С. 84–90. DOI: 10.34759/vst-2023-2-84-90.
20. Soborejo A.B.O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials all high temperatures // Proc. Internat. Conf. «Strength of Metals and Alloys». Tokyo, 1967. P. 252–256.
21. Dudchenko A.A., Lurie S.A., Halim K. Multiscale modeling on damage mechanics of laminated composite materials // Proc. of conference «Damage in composite materials: Simulation and non-destructive testing». Stuttgart, 2006. P. 23–26.
22. Мовчан А.А. Микромеханический подход в задаче описания накопления анизотропного рассеянного урона // Механика твердого тела. 1990. № 3. С. 252–256.
23. Мовчан А.А. Проблема прочности тонкостенных конструкций. М.: Изд-во МАИ, 1989. С. 20–24.
24. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Влияние внутренних напряжений на старение полимерных композиционных материалов. Обзор // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57. № 5. С. 805–822.
25. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
26. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
27. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Ползучесть армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 214 с.

References

1. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a single information and analytical center for aviation materials in the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
2. Kablov E.N., Shevchenko Yu.N., Grinevich A.V. Problems of certification of aviation materials at the present stage. *75 years. Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2007*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2007, pp. 388–396.

3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 26, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Kononov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Sagomonova V.A., Tselikin V.V. Vibration damping material with perforated constraining layer. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
8. Sidorina A.I. Woven metal-carbon reinforcing fillers for PCM. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.
9. Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Maltseva E.Yu. The effect of reinforcing additives on the structure and thermophysical properties of ice composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
10. Gurtovik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. *Radio-transparent products made of fiberglass*. Moscow: Mir, 2002, 368 p.
11. Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Komarov V.V. Selection of materials for the manufacture of dimensionally stable load-bearing structures. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 100–117. DOI: 10.18287/22541-7533-2018-17-1-100-117.
12. Zhelezina G.F., Voynov S.I., Solovieva N.A., Kulagina G.S. Aramid organotextolites for impact-resistant aircraft structures. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2019, vol. 92, is. 3, pp. 358–364.
13. Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Levakova N.M. Antifriction organoplastics for high-loaded friction knots. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96.
14. Nasonov F.A., Kulagina G.S., Demina A.S., Zhelezina G.F., Morozov B.B., Solovyova N.A., Shuldeshova P.M. Application of composites with special self-lubricating antifriction coatings in the aviation industry. *XLIII All-Russian. conf. «Science and Technology»*: in 2 vols. Moscow: RAS, 2023, vol. 1, pp. 21–27.
15. Mikhailov Yu.S. Increasing the efficiency of swept wing mechanization. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 101–18. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120.
16. Su-57 – Russian fifth-generation fighter. Available at: https://dzen.ru/a/YW4C16Kc_DqzBOeC (accessed: February 01, 2024).
17. Kulagina G.S., Nasonov F.A., Zhelezina G.F., Demina A.S., Solovieva N.A., Morozov B.B., Shuldeshova P.M., Filatov A.A. Technology of flexible structural elements of aircraft developed by Sukhoi Design Bureau using prepregs of antifriction and structural organoplastics. *XLIV All-Rus. Conf. «Science and Technology»*, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 100th anniversary of Academician V.P. Makeev: in 2 vols. Moscow: RAS, 2024, vol. 1, pp. 91–99.
18. *The Best Sukhoi Aircraft*: Documentary Series. Issue: Su-57 (broadcast on 04.12.2023). Zvezda TV Channel: official website. Available at: <https://tvzvezda.ru/video/films-online/20241301629-InBa9.html/20231241017-6J1p9.html> (accessed: February 01, 2024).

19. Akulin P.V. Accumulation of Damage in Composite Panels under Low-Cycle Loading. *Vestnik MAI*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 4–90. DOI: 10.34759/vst-2023-2-84-90.
20. Soborejo A.B.O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials all high temperatures. *Proc. Internat. Conf. «Strength of Metals and Alloys»*. Tokyo, 1967, pp. 252–256.
21. Dudchenko A.A., Lurie S.A., Halim K. Multiscale modeling on damage mechanics of laminated composite materials. *Proc. of conference «Damage in composite materials: Simulation and non-destructive testing»*. Stuttgart, 2006, pp. 23–26.
22. Movchan A.A. Micromechanical approach to the problem of describing the accumulation of anisotropic scattered damage. *Mekhanika tverdogo tela*, 1990, no. 3, pp. 252–256.
23. Movchan A.A. *Problem of strength of thin-walled structures*. Moscow: MAI Publ. House, 1989, pp. 20–24.
24. Kablov E.N., Startsev V.O. Effect of internal stresses on the aging of polymer composite materials. Review. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 805–822.
25. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
26. Vasiliev V.V. *Mechanics of structures made of composite materials*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 272 p.
27. Skudra A.M., Bulavs F.Ya. *Creep of reinforced plastics*. Moscow: Khimiya, 1982, 214 p.

Информация об авторах

Кулагина Галина Серафимовна, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Насонов Федор Андреевич, ведущий технолог 3 класса, к.т.н., ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Железина Галина Федоровна, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Демина Анна Сергеевна, инженер-технолог 1 категории, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Соловьева Наталия Александровна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Морозов Борис Борисович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения – начальник отдела, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Шульдешова Полина Михайловна, инженер-технолог 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Филатов Андрей Анатольевич, главный конструктор – начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Information about the authors

Galina S. Kulagina, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Fedor A. Nasonov, Third Class Leading Technologist, Candidate of Sciences (Tech.), PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

Galina F. Zhelezina, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna S. Demina, First Category Engineer-technologist, PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

Natalia A. Solovyeva, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Boris B. Morozov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau – Head of Division, PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

Polina M. Shuldeshova, First Category Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Filatov, Chief Designer – Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.10.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.10.2024.