

УДК 629.7 678.5

Применение гибридных полимерных композиционных материалов для регулирования температурного коэффициента линейного расширения формообразующей оснастки

А.И. Ирошников, В.С. Мартиросян, А.О. Половый, А.Е. Кованов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

The use of hybrid polymer composite materials to regulate the temperature coefficient of linear expansion of forming equipment

A.I. Iroshnikov, V.S. Martirosyan, A.O. Polovy, A.E. Kovanov

Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC

Наибольший эффект от использования полимерных композиционных материалов достигается в конструкциях, к которым предъявляются максимально высокие требования по сочетанию прочностных свойств, размерной точности и низкой массе. Основной способ изготовления таких деталей — автоклавное формование с высокими давлением и температурой. Растут требования к точности и качеству деталей из полимерных композиционных материалов, вследствие чего все большее внимание необходимо уделять соответствующей формообразующей оснастке. Идеальная оснастка должна обеспечивать формостабильность при циклических температурных нагрузках автоклавного формования, а также обладать необходимым набором механических характеристик. При этом должно соблюдаться соответствие температурных коэффициентов линейного расширения материала оснастки и формуемой детали, так как именно состояние оснастки в момент формования изделия определяет его конечную форму. В качестве материала для изготовления формообразующей оснастки, способной обеспечить заданные материалом формуемой детали теплофизические параметры, предложено использовать гибридные полимерные композиционные материалы, содержащие стеклянные, арамидные и углеродные волокна в качестве армирующих наполнителей.

EDN: JOUVXM, <https://elibrary/jouvxm>

Ключевые слова: формообразующая оснастка, гибридные ПКМ, температурный коэффициент линейного расширения, армирующий компонент, стеклоглепластик

The greatest effect from the use of polymer composite materials is achieved in structures that have the highest possible requirements for a combination of strength properties, dimensional accuracy and low weight. The main method of manufacturing such parts is autoclave molding, which combines pressure and high temperatures. The requirements for the accuracy and quality of polymer composite materials parts are growing, as a result of which more and more attention should be paid to the appropriate shaping equipment. The ideal equipment should ensure form stability under cyclic temperature loads of autoclave molding, as well as have the necessary set of mechanical characteristics. At the same time, the correspondence of the temperature coefficient of linear expansion of the tooling material

and the molded part must be observed, since it is the condition of the tooling at the time of molding the product that determines its final shape. It is proposed to use hybrid polymer composite materials, combining glass, aramid, and carbon fibers as reinforcing fillers, as a material for manufacturing forming equipment capable of providing thermophysical parameters set by the material of the molded part.

EDN: JOUVXM, <https://elibrary/jouvxm>

Keywords: forming equipment, hybrid PCM, temperature coefficient of linear expansion, reinforcing component, glass-carbon fiber

Ввиду постоянного увеличения доли углепластиковых деталей в авиационных конструкциях, космических аппаратах и ракетах-носителях все большее внимание уделяется материалам, конструкции и технологии изготовления соответствующей формообразующей оснастки. В аэрокосмической отрасли изделия нередко выпускаются малыми сериями (не более 10 шт.), однако для их изготовления требуется полноценная оснастка. В случае выполнения формообразующей оболочки из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1] чаще всего используют стекло- (СП) и углепластики (УП). Первые обладают низкой стоимостью и высокой ударной стойкостью, вторые — более высокими упругими и прочностными свойствами, а также низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР).

В последнее десятилетие технологически реализованы новые и перспективные классы конструкционных ПКМ, в частности гибридные. Гибридными называют ПКМ, содержащие более одного вида армирующего компонента в единой матрице [2–5].

В случае совмещения двух типов армирующих волокон в одном композите имеется возможность реализовать их преимущества и компенсировать недостатки. Например, замена углеродного волокна (УВ) в средней части толщины пластика более дешевым стеклянным волокном (СВ) может кардинально уменьшить его стоимость, в то время как изгибные свойства оболочки почти не изменятся благодаря наличию во внешних слоях более жестких и прочных УВ. Если гибридный ПКМ нагружен в направлении армирования, то, как правило, более хрупкие УВ будут разрушаться раньше пластичных СВ. Эту особенность при разрушении можно использовать для наблюдения за состоянием композита [6] или в качестве предохранительного признака перед окончательным разрушением [7].

Также для гибридных ПКМ характерно возникновение внутренних напряжений в оболоч-

ке при ее формировании вследствие разницы термоупругих характеристик УВ и СВ. ТКЛР УВ находится в пределах $(-1...+1) \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [8–10], а ТКЛР СВ в диапазоне $(5...10) \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [8, 11].

После завершения процесса формирования и охлаждения гибридной оболочки до комнатной температуры в УВ возникнут остаточные напряжения сжатия, а в СВ — растяжения. В зависимости от характера внешнего воздействия наличие внутренних напряжений может увеличить или уменьшить несущую способность оболочки. Однако при нагревании в процессе формирования углепластиковой детали на такой гибридной оболочке внутренние напряжения в последней будут снижаться почти до нуля, так как оболочка приблизится к температуре своего отверждения.

В связи с этим становится целесообразным применение гибридных ПКМ на основе СВ и УВ в качестве материалов для изготовления оснастки. Чтобы определить наиболее эффективные параметры изготовления и соотношения компонентов оснастки, необходимо использовать совокупность теоретических и экспериментальных методов оценки.

Рационально спроектированная оснастка для формирования должна быть дешевой, обладать большой стойкостью к термоциклическим нагрузкам и иметь ТКЛР, близкий к ТКЛР материала, формуемого на ней изделия.

Цель работы — исследование свойств гибридных ПКМ для управления ТКЛР формообразующей оснастки.

Анализ влияния ТКЛР оснастки на формуемую деталь. Рассмотрены возможные варианты влияния теплового расширения оснастки на формуемый на ней материал изделия, после завершения полимеризации которого возникает его деформирование в соответствии со своим ТКЛР, отличным от ТКЛР оснастки.

Возможны два варианта соотношения ТКЛР формуемого материала α_m и ТКЛР оснастки α_o : $\alpha_o > \alpha_m$ и $\alpha_o < \alpha_m$. Качественное влияние

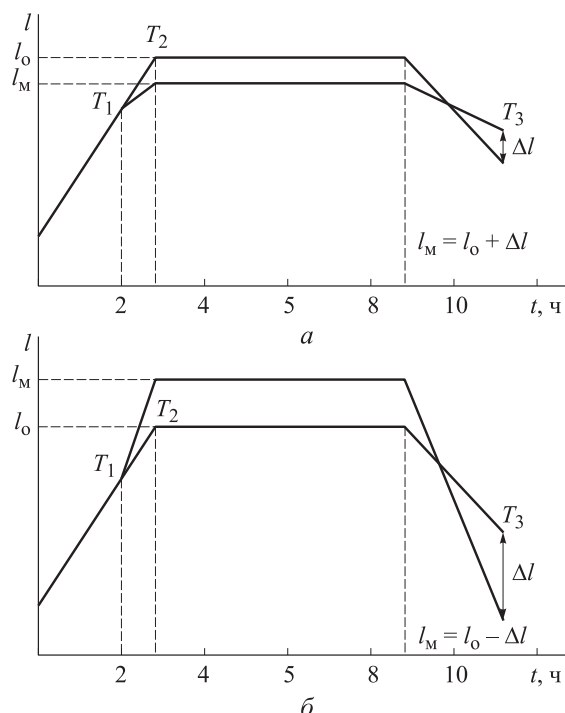


Рис. 1. Влияние ТКЛР оснастки на размер формируемого изделия при $\alpha_o > \alpha_m$ (а) и $\alpha_o < \alpha_m$ (б)

ТКЛР оснастки на размер формируемого изделия при этих соотношениях показано на рис. 1, а и б, где l — размер; τ — время. Видно, что при $\alpha_o > \alpha_m$ (см. рис. 1, а) по завершении охлаждения размер готового материала l_m больше размера оснастки l_o на величину Δl , а при $\alpha_o < \alpha_m$ — меньше на Δl . На рис. 1, а и б приведены два случая: когда совместное деформирование материалов полностью отсутствует (деталь и оснастка проскальзывают относительно друг друга) и когда сшивка формируемого материала достаточна для того, чтобы он расширялся (сжимался) самостоятельно.

Кроме того, в рассмотренном примере сделано допущение, что оснастка не препятствует свободному перемещению материала, т. е. между ней и деталью отсутствуют закрытые контуры, создающие геометрическое замыкание. Чтобы оценить возможные изменения геометрических размеров формируемого образца, предполагаем, что $l_m = l_o$ при температуре $T_1 = 150^\circ\text{C}$. Тогда согласно режиму формования (выдержка 6 ч при $T_2 = 175^\circ\text{C}$) размеры материала и оснастки при указанной температуре будут следующими:

$$l_o^{175} = l_o^{150} (1 + \Delta T \alpha_o); \quad (1)$$

$$l_m^{175} = l_m^{150} (1 + \Delta T \alpha_m); \quad (2)$$

где $\Delta T = 175 - 150 = 25^\circ\text{C}$; $l_o^{150} = l_m^{150} = l_{o,m}^{150}$.

Таблица 1

Результаты расчета изменения геометрических размеров стеклопластикового образца

Материал оснастки	$\alpha_o \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	$e, \text{мм}$	
		при нагревании от 150 до 175 $^\circ\text{C}$	при охлаждении со 175 до 20 $^\circ\text{C}$
Д16	22,5	+0,30	-1,80
УП	2,5	+0,20	+1,30
Сталь	10,0	-0,03	+0,15

Введем обозначение для разности размеров материала и оснастки

$$e = l_m^{175} - l_o^{175}.$$

Тогда из выражений (1) и (2) имеем

$$e = l_{o,m}^{150} \cdot 25 (\alpha_m - \alpha_o). \quad (3)$$

На этапе охлаждения до температуры $T_3 = 20^\circ\text{C}$ формула (3) принимает вид

$$e = l_{o,m}^{175} \cdot 155 (\alpha_o - \alpha_m). \quad (4)$$

Согласно выражениям (3) и (4), если $\alpha_o > \alpha_m$, то при нагревании формируемого изделия в нем возникают напряжения растяжения, а при охлаждении — сжатия, а если $\alpha_o < \alpha_m$, то наоборот.

Пример расчета изменения геометрических размеров стеклопластикового образца длиной 1 м с ТКЛР $\alpha_m = 11 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ при его нагревании и охлаждении для оснастки из УП, стального и алюминиевого сплавов приведен в табл. 1.

Анализ результатов расчета показал важность приведения ТКЛР материала оснастки к максимально близкому ТКЛР формируемого изделия, что требует регулирования ТКЛР оснастки в широком диапазоне.

Регулирование ТКЛР формообразующей оснастки путем гибридизации. Одним из вариантов управления ТКЛР оснастки является ее изготовление из гибридных ПКМ, сочетающих в себе различные армирующие наполнители (СВ, УВ, кварцевые или арамидные волокна).

Чтобы оценить соответствие образцов гибридных ПКМ (углестеклопластиков) Г1–Г4 и эталонного углепластикового образца У требованиям, предъявляемым к материалу формообразующей оболочки, решали следующие задачи:

- изучение и сравнение теплофизических характеристик образцов гибридных ПКМ на возможность применения в процессах изготовле-

ния композиционной формообразующей оснастки методом вакуумной инфузии смолы для формования углепластиковых изделий;

- экспериментальное определение физико-механических характеристик армированных углестеклопластиков, необходимых при математическом моделировании поведения материала и конструкции в условиях эксплуатации.

В качестве исходных материалов выступали углеродные ткани UWB-200 и UWB-400 с моно-

слоем толщиной 0,2 и 0,4 мм соответственно, стеклоткань Т-10-14 с монослоем толщиной 0,23 мм и связующее Araldite LY8615/Aradur 8615. Схемы армирования изготовленных образцов приведены в табл. 2, где θ — угол укладки; $h_{\text{расч}}$ — расчетная толщина образца.

Оба типа волокон будут изменять длину в зависимости от ТКЛР. Но ТКЛР УВ значительно ниже, чем ТКЛР СВ. Это приводит к тому, что при удлинении СВ с ростом температуры

Таблица 2

Схемы армирования гибридных и эталонного образцов

Номер слоя	Г1		Г2		Г3		Г4		У	
	Материал	θ , град	Материал	θ , град	Материал	θ , град	Материал	θ , град	Материал	θ , град
1	UWB-200	+45	UWB-200	+45	UWB-200	+45	UWB-200	+45	UWB-200	+45
2	UWB-200	-45	UWB-200	-45	UWB-200	-45	UWB-200	-45	UWB-200	-45
3	UWB-400	0	Т-10-14	+45	UWB-400	0	UWB-400	+45	UWB-400	90
4	UWB-400	0	Т-10-14	0	UWB-400	0	UWB-400	0	UWB-400	+45
5	Т-10-14	+45	Т-10-14	-45	UWB-400	0	Т-10-14	-45	UWB-400	0
6	Т-10-14	0	Т-10-14	90	UWB-400	0	Т-10-14	90	UWB-400	-45
7	Т-10-14	-45	UWB-400	0	Т-10-14	+45	Т-10-14	0	UWB-400	90
8	Т-10-14	90	Т-10-14	+45	Т-10-14	0	Т-10-14	+45	UWB-400	+45
9	Т-10-14	+45	Т-10-14	0	Т-10-14	-45	UWB-400	0	UWB-400	0
10	Т-10-14	0	Т-10-14	-45	Т-10-14	90	Т-10-14	-45	UWB-400	-45
11	Т-10-14	-45	Т-10-14	90	Т-10-14	+45	Т-10-14	90	UWB-400	90
12	Т-10-14	90	UWB-400	0	Т-10-14	0	Т-10-14	0	UWB-400	+45
13	Т-10-14	+45	Т-10-14	+45	Т-10-14	-45	Т-10-14	+45	UWB-400	0
14	Т-10-14	0	Т-10-14	0	Т-10-14	90	UWB-400	0	UWB-400	-45
15	Т-10-14	-45	Т-10-14	-45	Т-10-14	90	UWB-400	-45	UWB-400	-45
16	Т-10-14	90	Т-10-14	90	Т-10-14	-45	Т-10-14	90	UWB-400	90
17	Т-10-14	90	UWB-400	0	Т-10-14	0	Т-10-14	0	UWB-400	+45
18	Т-10-14	-45	Т-10-14	90	Т-10-14	+45	Т-10-14	90	UWB-400	0
19	Т-10-14	0	Т-10-14	-45	Т-10-14	90	Т-10-14	-45	UWB-400	-45
20	Т-10-14	+45	Т-10-14	0	Т-10-14	-45	UWB-400	0	UWB-400	90
21	Т-10-14	90	Т-10-14	+45	Т-10-14	0	Т-10-14	+45	UWB-400	+45
22	Т-10-14	-45	UWB-400	0	Т-10-14	+45	Т-10-14	0	UWB-400	0
23	Т-10-14	0	Т-10-14	90	UWB-400	0	Т-10-14	90	UWB-200	-45
24	Т-10-14	+45	Т-10-14	-45	UWB-400	0	Т-10-14	-45	UWB-200	+45
25	UWB-400	0	Т-10-14	0	UWB-400	0	UWB-400	0	—	—
26	UWB-400	0	Т-10-14	+45	UWB-400	0	UWB-400	+45	—	—
27	UWB-200	-45	UWB-200	-45	UWB-200	-45	UWB-200	-45	—	—
28	UWB-200	+45	UWB-200	+45	UWB-200	+45	UWB-200	+45	—	—
$h_{\text{расч}}$, мм	7,0		7,0		7,7		7,7		8,0	

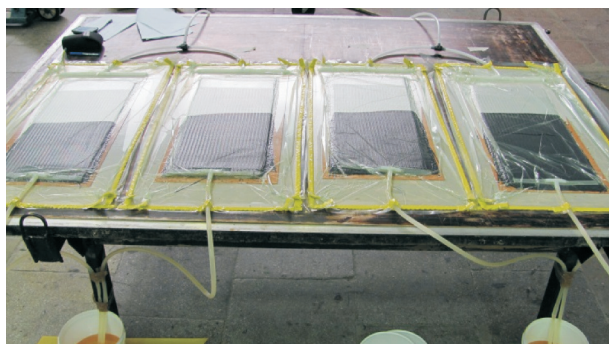


Рис. 2. Фрагмент изготовления гибридных образцов

УВ приблизительно сохраняют свои размеры. Теоретически после отверждения связующего и остывания композита СВ будут сжиматься, а УВ сохраняют свою длину, но на практике отвержденное связующее обеспечивает равенство длин всех волокон.

Таким образом, устанавливается равновесие сил, когда УВ постоянно подвержены сжимающей нагрузке, а СВ — растягивающей. Требовалось исследовать соответствие результирующих ТКЛР пластиков расчетным значениям, а также их способность сопротивляться основным экс-

плуатационным нагрузкам оснастки в результате термоциклирования.

Образцы гибридных ПКМ размером 700×300 мм изготавливали путем вакуумной инфузии (рис. 2), который является основным методом создания формообразующих оболочек из ПКМ для оснастки в современном производстве.

Процесс пропитки (рис. 3) образцов соответствовал прогнозам — сатиновое плетение стеклоткани Т-10-14 в процессе вакуумной инфузии пропитывается быстрее, чем саржевое, так как у образцов Г1, Г3 пропитка началась значительно интенсивнее, чем у образцов Г2, Г4, и изначально казалось, что они пропитаются значительно быстрее. Однако после того как смола дошла до нижних слоев саржевого плетения в заготовках Г1, Г3 процесс пропитки образцов Г2, Г4 начал выравниваться.

После окончания пропитки все образцы отверждали согласно режиму, рекомендованному производителем, и нарезали в соответствии с требованиями стандартов для испытаний.

Результаты исследований. Чтобы оценить влияние гибридизации на общее качество

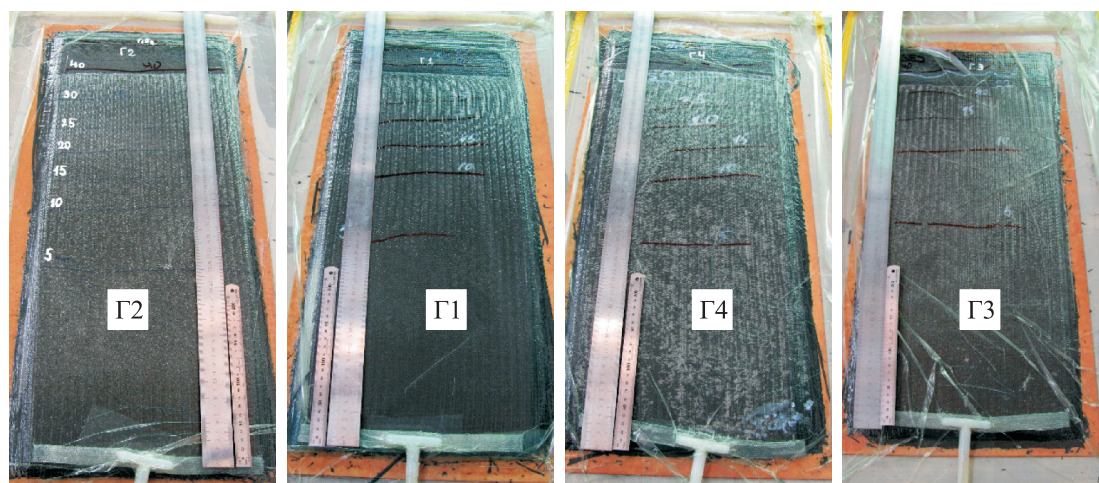


Рис. 3. Внешний вид гибридных образцов после пропитки

Таблица 3

Результаты исследования образцов

Материал	Соотношение СВ/УВ по толщине пакета, %	Пористость, %	Плотность, г/см	Массовое содержание волокна/связующего
Г1	72/28	0,2	1,714	58,0/42,0
Г2	72/28	0,9	1,701	57,7/42,3
Г3	45/55	0,8	1,665	58,4/41,6
Г4	45/55	0,4	1,669	57,1/42,9
У	—	0,4	1,446	58,5/41,5

пластика при изготовлении указанным методом выполняли проверку полученных образцов на плотность, пористость и компонентный состав.

Согласно результатам исследования (табл. 3), пористость полученных материалов не превышала 1 %, что соответствует пористости образцов чистых УП, изготовленных из тех же армирующих материалов и связующего, тем же методом. Содержание волокна, связующего в композите и его плотность соответствовали расчетным значениям.

Предел прочности при межслоевом сдвиге — самый важный эксплуатационный параметр используемого для изготовления формообразующей оснастки материала, так как он определяет нагрузку, необходимую для начала расслоения в материале и, соответственно, долговечность оснастки. Ввиду того, что наибольшим

нагрузкам оснастка подвергается при формировании в автоклаве, особое значение имеет поведение материала при повышенной температуре.

Образцы испытывали как сразу после изготовления (до эксплуатации), так и после 100 циклов автоклавного формования, что имитировало нагрузку оснастки в процессе эксплуатации. Испытания проводили при температуре $T = 23$ и 180 °С (температуре формования).

Анализ результатов испытаний образцов на предел прочности при межслоевом сдвиге τ после термоциклирования по ОСТ 190199–75 (рис. 4) позволяет сделать следующие выводы.

Независимо от температуры или циклических нагрузок во всех образцах разрушение происходит по поверхностям стыка углеродная ткань — стеклоткань (рис. 5), но, вопреки ожиданиям, не наблюдается резкого падения предела прочности относительно чистых УП и СП.

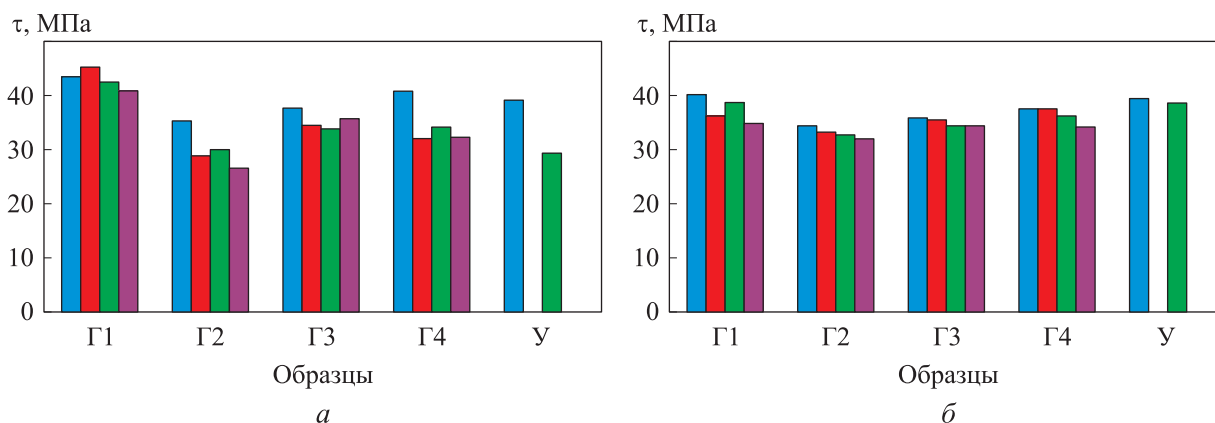


Рис. 4. Результаты испытаний образцов на предел прочности при межслоевом сдвиге τ после термоциклирования по ОСТ 190199–75 при температуре $T = 23$ (а) и 180 °С (б) до эксплуатации (■), после 25 (■), 50 (■) и 100 циклов (■)

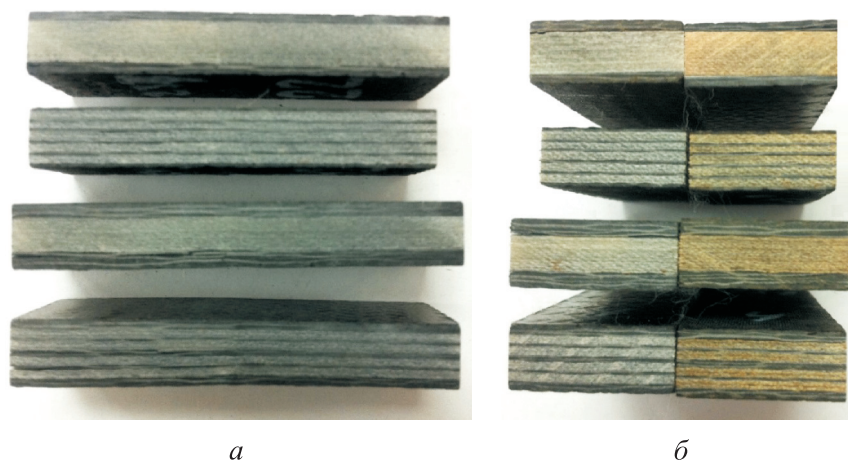


Рис. 5. Внешний вид образцов после испытаний на предел прочности при межслоевом сдвиге при температуре $T = 23$ (а) и 180 °С (б)

Наихудшие свойства при межслоевом сдвиге показал образец Г2, в котором слои СВ и УВ чередуются, причем содержание УВ составляет 28 %. При этом образец Г1 с аналогичным процентным соотношением волокон, но со схемой армирования типа «сэндвич», имеет наилучший результат, что, вероятно, обусловлено распределением нагрузки по толщине пластика, достигающей максимума в центральной плоскости.

После того, как образцы подвергали циклическим нагрузкам в автоклаве, проводили повторные испытания. По полученным результатам установлено, что сильнее изнашиваются материалы с перемешанной схемой армирования (падение до 21 % после 50 циклов автоклавного нагружения). Это сравнимо с падением прочности чистого УП, тогда как предел прочности образцов типа «сэндвич» уменьшился всего на 8,5 %, что определяется свойствами центральных стеклопластиковых слоев.

Другая картина наблюдается после испытаний образцов при температуре эксплуатации (180 °С). При том, что повторяются соотношения $G1 > G2$, $G3 < G4$, разница между ними составляет всего лишь 14 % (при 23 °С достигает 29 %). Такие значения сравнимы с характеристиками чистых УП и СП. После циклических нагрузок падение предела прочности при межслоевом сдвиге оказалось минимальным (не более 9 %).

По результатам испытаний образцов Г1–Г4 на предел прочности при межслоевом сдвиге можно предварительно заключить, что по этому параметру каждый из материалов подходит для изготовления композиционной оснастки.

Модуль упругости. Основная функция композиционной формообразующей оснастки — сохранять точные геометрические размеры в процессе эксплуатации для передачи их изделиям и минимизации операций доводки. Испытания выполняли по ГОСТ 25.602–80. Соответственно, одним из наиболее важных параметров при проектировании оснастки является модуль упругости материала.

Анализ полученных данных (рис. 6) показал, что зависимость модуля упругости от процентного соотношения УВ и СВ близка к линейной ($E_{УВ} \approx 75$ ГПа, $E_{СВ} \approx 20$ ГПа) и соответствует задачам исследования, и на нее почти не влияет тип армирования (сэндвич или перемешанная схема).

E , ГПа

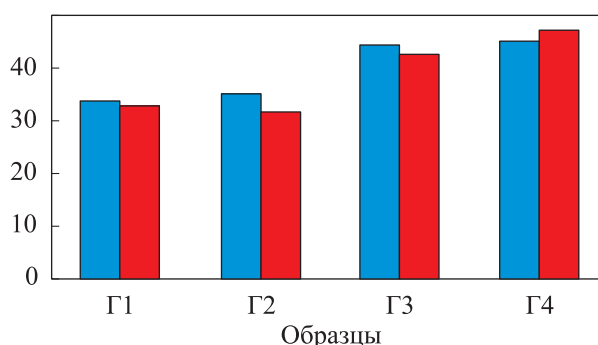


Рис. 6. Значения модуля упругости образцов E до эксплуатации (■) и после 25 циклов нагружения (■)

ТКЛР гибридных материалов. Для определения ТКЛР гибридных материалов использованы экспериментальные значения ТКЛР $\alpha_{\text{экс}}$ однонаправленных УП и СП на таких же армирующих наполнителях и связующем (табл. 4).

Расчетные значения определены по формуле

$$\alpha_{\text{расч}} = \frac{\alpha_{\text{СП}} + q\alpha_{\text{УП}}}{1 + q}.$$

Здесь $\alpha_{\text{СП}}$ и $\alpha_{\text{УП}}$ — ТКЛР СП и УП;

$$q = \frac{H_{\text{СП}}E_{\text{СП}}}{H_{\text{УП}}E_{\text{УП}}},$$

где $H_{\text{СП}}$, $H_{\text{УП}}$ и $E_{\text{СП}}$, $E_{\text{УП}}$ — толщины и модули упругости СП и УП соответственно.

Для определения термодформационных характеристик исследуемых материалов использовали dilatометр DIL 801 фирмы ВАНН Thermoanalyse. Абсолютная погрешность определения ТКЛР $\alpha_{\text{экс}}$ на приборе составляла $(0,02...0,03) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Испытания проводили в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» по методике ПМ 596.998–2002. Полученные данные приведены на рис. 7 и 8.

Таблица 4

Расчетные и экспериментальные значения ТКЛР

Образец	$\alpha_{\text{расч}} \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_{\text{экс}} \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Г1	7,79	7,79
Г2	7,79	6,90
Г3	5,35	5,20
Г4	5,35	5,70
УП	–	2,50
СП	–	11,00

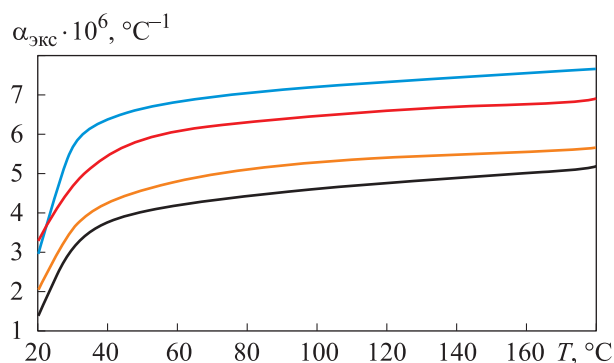


Рис. 7. Зависимости ТКЛР $\alpha_{\text{экс}}$ гибридных образцов Г1 (—), Г2 (—), Г3 (—), Г4 (—) от температуры T

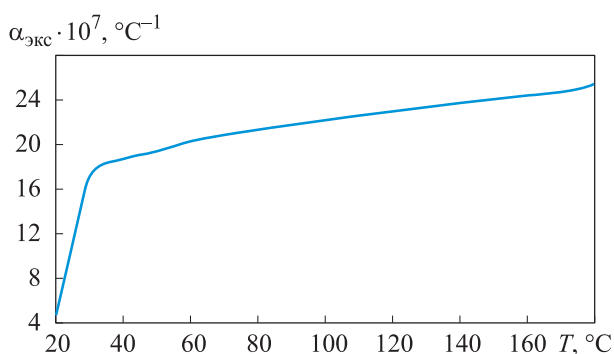


Рис. 8. Зависимости ТКЛР $\alpha_{\text{экс}}$ УП от температуры T

Так как расчетные значения ТКЛР гибридных образцов близки к экспериментальным (см. табл. 4), а механические характеристики при термоциклировании снижаются незначительно (см. рис. 4 и 6), использование гибридных материалов для регулирования ТКЛР оснастки является целесообразным.

Экономическая составляющая. Исходя из стоимостных расчетов для оснасток производства АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», сделана оценка снижения стоимости

Таблица 5

Результаты оценки снижения стоимости оснастки

Образец	Снижение стоимости, %	
	с учетом все материалов, необходимых для изготовления оснастки (включая мастер-модель)	без учета каркаса и мастер-модели
Г1	30	13
Г2	30	13
Г3	13	6
Г4	13	6

оснастки при замене чистого углепластика гибридными стеклоуглепластками Г1–Г4 (табл. 5).

Выводы

1. Гибридный стеклоуглепластик — перспективный материал для изготовления формообразующей оснастки, который может повысить точность ее изготовления, и как следствие, различных деталей авиационной и ракетно-космической техники и заметно снизить ее стоимость.

2. Результаты испытаний подтвердили соответствие механических и термодеоформационных характеристик гибридного стеклоуглепластика требованиям, предъявляемым к материалам для формообразующей оснастки.

3. Дальнейшая работа будет направлена на оценку использования гибридизации на этапе плетения тканей, а также на исследование совмещения гибридизации армирующего наполнителя с модификацией связующих (например, угленасыщенных) для более точного корректирования ТКЛР.

Литература

- [1] Hui Q., Greenhalgh E.S., Shaffer M.S.P. et al. Carbon nanotube-based hierarchical composites: a review. *J. Mater. Chem.*, 2010, vol. 20, no. 23, pp. 4751–4762, doi: <https://doi.org/10.1039/C000041H>
- [2] Шакирзянов Ф.Р., Валиев А.И., Сулейманов А.М. и др. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния гибридных композитов. *Известия КГАСУ*, 2023, № 4, с. 275–285.
- [3] Журковский М.Е., Сакошев З.Г., Блазнов А.Н. Исследование механических свойств намоточных гибридных полимерных композиционных материалов. *Южно-Сибирский научный вестник*, 2018, № 3, с. 39–43.
- [4] Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. Санкт-Петербург, *Научные основы и технологии*, 2010, 822 с.

- [5] Galeev R., Nizamov R., Abdrakhmanova L. et al. Resource-saving polymer compositions for construction purposes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 890, art. 012111, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012111>
- [6] Wu Z.S., Yang C.Q., Tobe Y.H. et al. Electrical and mechanical characterization of hybrid CFRP sheets. *J. Compos. Mater.*, 2006, vol. 40, no. 3, pp. 227–244, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998305053452>
- [7] Czel G., Wisnom M.R. Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2013, vol. 52, pp. 23–30, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.04.006>
- [8] Manders P.W., Bader M.G. The strength of hybrid glass/carbon fibre composites. Part 1. Failure strain enhancement and failure mode. *J. Mater. Sci.*, 1981, vol. 16, no. 8, pp. 2233–2245, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00542386>
- [9] Kulkarni R., Ochoa O. Transverse and longitudinal CTE measurements of carbon fibers and their impact on interfacial residual stresses in composites. *J. Compos. Mater.*, 2006, vol. 40, no. 8, pp. 733–754, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998305055545>
- [10] Motoc D.L., Ivens J., Dadirlat N. Coefficient of thermal expansion evolution for cryogenic preconditioned hybrid carbon fiber/glass fiber-reinforced polymeric composite materials. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2013, vol. 112, no. 3, pp. 1245–1251, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2560-7>
- [11] Dong C.S. Development of a model for predicting the transverse coefficients of thermal expansion of unidirectional carbon fibre reinforced composites. *Appl. Compos. Mater.*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 171–182, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-008-9065-3>

References

- [1] Hui Q., Greenhalgh E.S., Shaffer M.S.P. et al. Carbon nanotube-based hierarchical composites: a review. *J. Mater. Chem.*, 2010, vol. 20, no. 23, pp. 4751–4762, doi: <https://doi.org/10.1039/C000041H>
- [2] Shakirzyanov F.R., Valiev A.I., Suleymanov A.M. et al. Numerical modeling of stress-strain state of hybrid composites. *Izvestiya KGASU [News of the KSUAE]*, 2023, no. 4, pp. 275–285. (In Russ.).
- [3] Zhurkovskiy M.E., Sakoshev Z.G., Blaznov A.N. Study of mechanical behavior of filament-wound hybrid polymer composites. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik [South-Siberian Scientific Bulletin]*, 2018, no. 3, pp. 39–43. (In Russ.).
- [4] Mikhaylin Yu.A. *Konstruktsionnye polimernye kompozitsionnye materialy [Structural polymer composite materials]*. Sankt-Peterburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2010, 822 p. (In Russ.).
- [5] Galeev R., Nizamov R., Abdrakhmanova L. et al. Resource-saving polymer compositions for construction purposes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 890, art. 012111, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012111>
- [6] Wu Z.S., Yang C.Q., Tobe Y.H. et al. Electrical and mechanical characterization of hybrid CFRP sheets. *J. Compos. Mater.*, 2006, vol. 40, no. 3, pp. 227–244, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998305053452>
- [7] Czel G., Wisnom M.R. Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2013, vol. 52, pp. 23–30, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.04.006>
- [8] Manders P.W., Bader M.G. The strength of hybrid glass/carbon fibre composites. Part 1. Failure strain enhancement and failure mode. *J. Mater. Sci.*, 1981, vol. 16, no. 8, pp. 2233–2245, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00542386>
- [9] Kulkarni R., Ochoa O. Transverse and longitudinal CTE measurements of carbon fibers and their impact on interfacial residual stresses in composites. *J. Compos. Mater.*, 2006, vol. 40, no. 8, pp. 733–754, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998305055545>
- [10] Motoc D.L., Ivens J., Dadirlat N. Coefficient of thermal expansion evolution for cryogenic preconditioned hybrid carbon fiber/glass fiber-reinforced polymeric composite materials. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2013, vol. 112, no. 3, pp. 1245–1251, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2560-7>

- [11] Dong C.S. Development of a model for predicting the transverse coefficients of thermal expansion of unidirectional carbon fibre reinforced composites. *Appl. Compos. Mater.*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 171–182, doi: <https://doi.org/10.1007/s10443-008-9065-3>

Статья поступила в редакцию 20.10.2025

Информация об авторах

ИРОШНИКОВ Андрей Игоревич — начальник сектора. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: IroshnikovAI@technologiya.ru).

МАРТИРОСЯН Виктория Сергеевна — ведущий инженер-технолог. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: IroshnikovAI@technologiya.ru).

ПОЛОВЫЙ Александр Олегович — кандидат технических наук, начальник бригады. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: 412ko41@technologiya.ru).

КОВАНОВ Антон Евгеньевич — начальник сектора. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: kovanovae@technologiya.ru).

Information about the authors

IROSHNIKOV Andrey Igorevich — Head of the Sector. Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoye Shosse, Bldg. 15, e-mail: IroshnikovAI@technologiya.ru).

MARTIROSYAN Victoria Sergeevna — Leading Manufacturing Process Engineer. Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Obninsk, Kievskoye Shosse, Bldg. 15, e-mail: IroshnikovAI@technologiya.ru).

POLOVY Alexander Olegovich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Team. Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoye Shosse, Bldg. 15, e-mail: 412ko41@technologiya.ru).

KOVANOV Anton Evgenievich — Head of the Sector. Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoye Shosse, Bldg. 15, e-mail: kovanovae@technologiya.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ирошников А.И., Мартиросян В.С., Половый А.О., Кованов А.Е. Применение гибридных полимерных композиционных материалов для регулирования температурного коэффициента линейного расширения формообразующей оснастки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 112–121.

Please cite this article in English as:

Iroshnikov A.I., Martirosyan V.S., Polovy A.O., Kovanov A.E. The use of hybrid polymer composite materials to regulate the temperature coefficient of linear expansion of forming equipment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 112–121.