

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7- 37-49

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ PMR-ПОЛИИМИДОВ

Е.Д. Колпачков<sup>1</sup>, А.О. Курносов<sup>1</sup>, С.Н. Папина<sup>1</sup>, А.П. Петрова<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Представлены технологические особенности переработки стеклопластиков на основе полиимидных связующих PMR-типа. Продемонстрированы основные подходы к изготовлению образцов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе стеклянных наполнителей и полиимидных расплавных связующих с учетом их физико-химических особенностей. Показано, что ПКМ на основе полиимидных связующих расплавного типа могут перерабатываться по различным режимам, обеспечивающим разный уровень характеристик.

**Ключевые слова:** полиимидные связующие расплавного типа, PMR-полиимиды, полимерные композиционные материалы (ПКМ), стеклопластики, высокотемпературные ПКМ

**Для цитирования:** Колпачков Е.Д., Курносов А.О., Папина С.Н., Петрова А.П. Особенности формования стеклопластиков на основе PMR-полиимидов // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-37-49.

Scientific article

## SPECIFICITY OF THE FORMATION OF FIBERGLASS BASED ON PMR-POLYIMIDES

E.D. Kolpachkov<sup>1</sup>, A.O. Kurnosov<sup>1</sup>, S.N. Papina<sup>1</sup>, A.P. Petrova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** This paper presents the technological features of the processing of glass-reinforced plastics based on PMR-type polyimide binders. The main approaches to the manufacture of polymer composite materials (PCM) samples based on glass fillers and polyimide melt binders are demonstrated, taking into account their physicochemical features. It was shown that PCM based on melt-type polyimide binders can be processed according to different modes, providing different levels of characteristics.

**Keywords:** melt-type polyimide binders, PMR-polyimides, polymer composite materials (PCM), glass-reinforced plastics, high-temperature PCM

**For citation:** Kolpachkov E.D., Kurnosov A.O., Papina S.N., Petrova A.P. Specificity of the formation of fiberglass based on PMR-polyimides. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-37-49.

### Введение

Развитие авиационно-космической отрасли поставило ряд задач перед представителями различных областей промышленности. В первую очередь необходимо было

обеспечить высокую удельную прочность конструкций летательных аппаратов, что позволяло бы в перспективе увеличивать взлетную массу, полезную нагрузку и топливную эффективность в процессе эксплуатации. Решение данной проблемы осуществлялось различными путями, но наиболее эффективным является создание, развитие и применение полимерных композиционных материалов (ПКМ). Новый класс материалов позволил существенно снизить массу летательных аппаратов, обеспечив высокие показатели прочности [1–3].

В условиях постоянно растущих скоростей авиационной техники и развития космических аппаратов все более жесткие требования предъявлялись к характеристикам уже применяемых ПКМ и изделий на их основе, в частности к максимальным температурам эксплуатации. Во второй половине прошлого века были найдены подходы к решению этой задачи – разработаны полиимидные связующие типа СП и кремнийорганические связующие типа К для изготовления материалов, работоспособных до температур ~350 °С. В настоящее время в отечественной промышленности разработаны и применяются материалы, обеспечивающие возможность эксплуатации ПКМ на их основе при температурах до 400 °С [4–15].

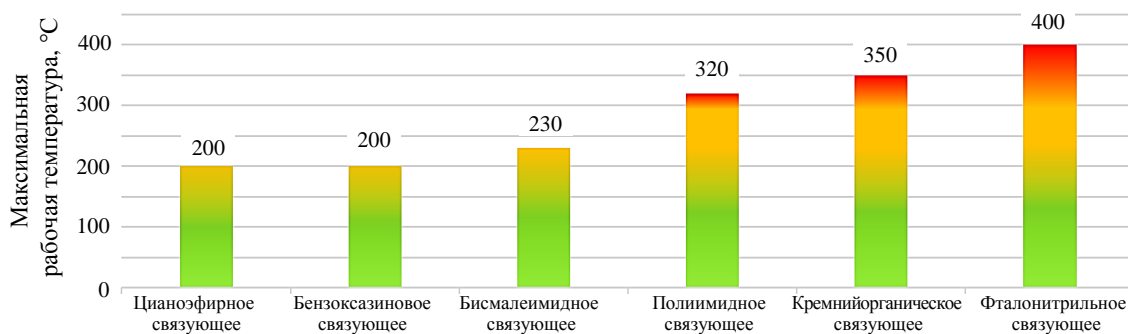


Рис. 1. Максимальные рабочие температуры различных классов связующих

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны и поставляются ПКМ на основе связующих, указанных на рис. 1, однако развитие науки и техники, а также требования изготовителей конструкций приводят к необходимости разработки новых типов связующих в пределах одного класса. Данная задача напрямую коснулась полиимидных связующих растворного типа марки СП-97С.

Для изделий авиационной и ракетно-космической техники активно применяются материалы на основе связующего СП-97С – это препреги марок СПП-97К и СПП-97КК, а также стеклотекстолит марки СТП-97с. Необходимо отметить, что рассмотренное для сравнения связующее СП-97С не является прямым аналогом РМР-полиимидов вследствие поликонденсационного механизма отверждения. Однако представляется целесообразным сопоставление его свойств с РМР-составами в связи с широким применением в Российской Федерации данного связующего при производстве термостойких конструкционных ПКМ.

Особенностью указанных материалов является то, что полимерное связующее в их составе представляет собой раствор имидообразующей смеси в легколетучем растворителе, что приводит к образованию пор в составе изделий, а также повышает уровень вредных условий при работе с данными материалами. Решением задачи по исключению легколетучих компонентов связующего стала разработка полиимидного расплавленного связующего полимеризационного типа марки ВС-51А. Главным отличием полиимидных связующих полимеризационного типа от полиимидных связующих

поликонденсационного типа является наличие в составе связующего ненасыщенных концевых групп, способных на конечной стадии формования изделия полимеризоваться с образованием сетчатого полиимида без выделения летучих веществ [12].

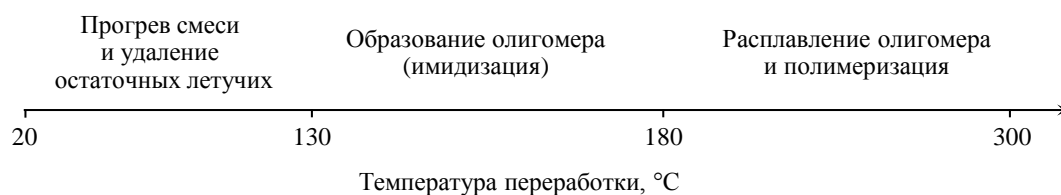


Рис. 2. Схема образования пространственной полимерной сетки связующего ВС-51А

На основе связующего марки ВС-51А разработаны различные классы материалов – стекло- и углепластики. При отработке технологических параметров изготовления указанных материалов с целью достижения необходимого комплекса свойств и с учетом схемы образования пространственной полимерной сетки (рис. 2) выбран ряд режимов, позволяющих получать образцы ПКМ с различным уровнем характеристик. По результатам анализа выбранных режимов установлена принципиальная зависимость влияния величины давления и температуры, при которой оно подается, на свойства ПКМ:

Режим формования	Температура, °С	Давление, Н
1	35	52
2	175	100
3	260	140

В данной работе представлены результаты отработки различных технологических режимов изготовления стеклопластика на основе связующего ВС-51А и степень их влияния на комплекс физических и прочностных характеристик разработанного материала.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

В качестве исследуемого материала использован стеклопластик марки ВПС-72 на основе связующего ВС-51А и стеклянной ткани Т-10-14. Данный материал изготавливается по препреговой технологии и может перерабатываться прессовым и автоклавным методами.

Определение предела прочности при сжатии проводили по ГОСТ Р 56812–2015 на испытательной машине Tiratest-2300. В соответствии со стандартом образец стеклопластика ВПС-72 в виде полосы прямоугольного сечения устанавливали в оснастку, которую затем помещали между захватами испытательной машины, и прикладывали сжимающую нагрузку. Определение предела прочности при сжатии проводили при температурах 20 и 320 °С.

Определение предела прочности при межслойном сдвиге проводили по ГОСТ 32659–2014 на испытательной машине модели LFM-100 фирмы Walter + Bai. Плоскопараллельные образцы стеклопластика ВПС-72 помещали в захваты испытательной машины и прикладывали нагрузку в виде трехточечного изгиба. Определение предела прочности при межслойном сдвиге проводили при температурах 20 и 320 °С.

Определение плотности образцов стеклопластика ВПС-72 проводили методом обмера и взвешивания по ГОСТ 15139–69 с использованием аналитических весов дискретностью 0,0001 г, штангенциркуля и микрометра. На тех же образцах проведено определение содержания матрицы, содержания пористости и толщины монослоя по ГОСТ Р 56682–2015. Для испытаний использованы образцы с ровной, сплошной поверхностью в количестве 5 шт. на партию для получения более точных статистических данных.

Определение температуры стеклования проводили по ГОСТ Р 56753–2015 на приборе динамического механического анализа (ДМА). Образец в виде полосы прямоугольной формы помещали в прибор ДМА и подвергали его колебательным нагрузкам и нагреву до 400 °С со скоростью 5 °С/мин. Температуру стеклования определяли как температуру, при которой наблюдалось значительное снижение значений динамического модуля упругости  $E$ .

Для проведения анализа микроструктуры образцов из стеклопластика ВПС-72 использован сканирующий электронный микроскоп TESCAN (Чехия). Анализ микроструктуры образцов проводили при увеличениях от  $\times 20000$  до  $\times 60000$  в режиме вторичных электронов.

### Результаты и обсуждение

С использованием ранее разработанных режимов переработки препрегов стеклопластиков на основе полиимидного связующего типа ВС изготовили образцы стеклопластика ВПС-72 методами прессового и автоклавного формования. На первом этапе исследования проведен анализ влияния технологии формования и режимов изготовления на комплекс физических свойств. Результаты исследования физических свойств приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

**Результаты определения физических свойств образцов из стеклопластика марки ВПС-72**

Свойства	Значения свойств* при использовании технологии	
	прессового формования	автоклавного формования
Режим формования 1		
Содержание связующего, % (по массе)	$\frac{24,66-25,30}{24,95}$	$\frac{29,74-29,99}{29,85}$
Пористость, %	$\frac{9,73-12,83}{11,50}$	$\frac{5,88-6,64}{6,05}$
Толщина монослоя, мм	$\frac{0,21-0,22}{0,22}$	$\frac{0,22-0,22}{0,22}$
Режим формования 2		
Содержание связующего, % (по массе)	$\frac{34,04-34,46}{34,22}$	$\frac{23,71-26,06}{25,35}$
Пористость, %	$\frac{3,90-6,46}{5,10}$	$\frac{9,63-10,66}{10,20}$
Толщина монослоя, мм	$\frac{0,24-0,24}{0,24}$	$\frac{0,20-0,21}{0,21}$
Режим формования 3		
Содержание связующего, % (по массе)	$\frac{36,10-37,67}{36,46}$	$\frac{26,87-30,61}{29,19}$
Пористость, %	$\frac{1,74-4,74}{2,06}$	$\frac{2,05-2,47}{2,33}$
Толщина монослоя, мм	$\frac{0,24-0,26}{0,24}$	$\frac{0,20-0,22}{0,21}$

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

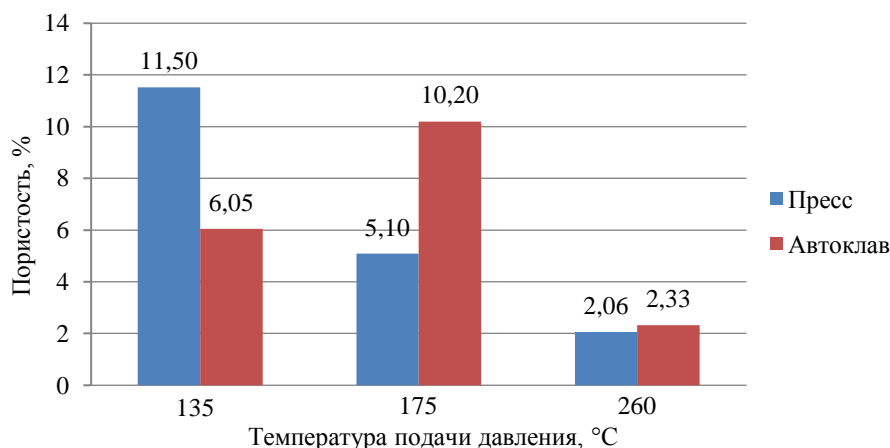


Рис. 3. Влияние технологии формования и режима изготовления на пористость образцов из стеклопластика ВПС-72

По результатам анализа физических свойств можно наблюдать прямую зависимость влияния температуры подачи давления на содержание связующего в образцах стеклопластика, изготовленных методом прессования, даже при условии увеличения давления формования, что при первой оценке должно способствовать уменьшению содержания связующего. Данный эффект объясняется тем, что вязкость полимерной смолы в составе заготовки в процессе изготовления постоянно увеличивается, снижая тем самым текучесть, а образующийся вокруг заготовки облой препятствует растеканию связующего. Данной зависимости не наблюдается для образцов, изготовленных методом автоклавного формования, что может быть связано с тем, что при выкладке заготовки на ее поверхности используется перфорированная пленка и значительное количество дренажного материала, обеспечивающих отвод образующихся летучих компонентов и, помимо этого, способствующих вытеканию смолы в процессе формования.

Анализ результатов исследования пористости образцов стеклопластика ВПС-72 демонстрирует линейную зависимость значений пористости от режима изготовления для образцов, отформованных в прессе, что объясняется увеличением давления формования в ряду режимов, а также наиболее оптимальной температуры подачи давления. Однако для автоклавного формования для режима с температурой подачи 175 °C наблюдаются высокие значения пористости. Такое явление может быть связано с тем, что температура подачи давления 175 °C – это окончание процесса олигомеризации, после которого связующее переходит в стеклообразное состояние и теряет текучесть в процессе нагрева до 260 °C. В связи с этим в процессе формования (при достижении температуры 175 °C и подачи давления) возможно «запирание» летучих компонентов в объеме заготовки. Дополнительно к указанному необходимо отметить, что давление в автоклаве, по сравнению с прессом, подается в течение продолжительного времени, что, в свою очередь, может негативно влиять на удаление летучих компонентов из зоны реакции.

В ходе исследования влияния режимов изготовления на свойства полиимидного стеклопластика ВПС-72 установлено влияние режима изготовления на температуру стеклования полимерной матрицы (рис. 4). Данный показатель имеет принципиальное значение, так как на этапе предварительной оценки работоспособности ПКМ позволяет определять возможный диапазон температур эксплуатации. Помимо этого, данный показатель важен, так как может отражать глубину протекания реакции полимеризации – конверсию: чем выше температура стеклования, тем больше макромолекул вступило в реакцию образования пространственной сетки. По результатам, представленным на рис. 4, можно сделать вывод, что с увеличением давления и температуры подачи связующего происходит снижение температуры стеклования полимерной матрицы.

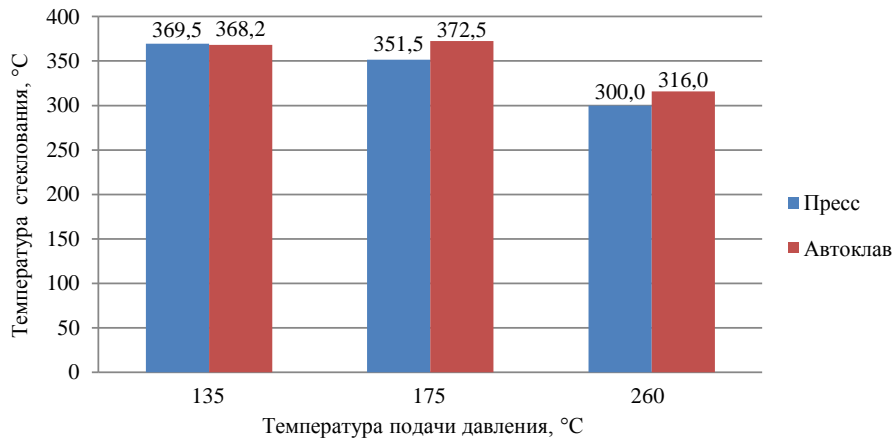


Рис. 4. Влияние технологии формования и режима изготовления на температуру стеклования образцов из стеклопластика ВПС-72

Существуют технологические приемы, позволяющие увеличивать температуру стеклования полимерной матрицы в составе изготовленных ПКМ – термообработка (ТО) или постотверждение. Технически оба метода представляют собой одно и то же и заключаются в нагреве образца до заданной температуры и выдержке в течение определенного времени с приложением нагрузки или в свободном состоянии. С физико-химической точки зрения это разные процессы: под термообработкой следует понимать процессы релаксации полимерной матрицы, протекающие в образце при нагреве до температур, близких к температурам стеклования, в то время как постотверждение – это процесс, при котором создаются условия протекания реакции полимеризации в объеме образца за счет нагрева до температур выше температуры стеклования с целью увеличения подвижности макромолекул.

Исследуемые в данной работе режимы в качестве последней стадии изготовления имеют стадию термообработки и заключаются в выдержке при температуре 320 °C в течение нескольких часов. Используются эти стадии, как описано ранее, именно для снятия остаточных напряжений в полимерной матрице после процесса формования с целью получения наибольших значений температур стеклования.

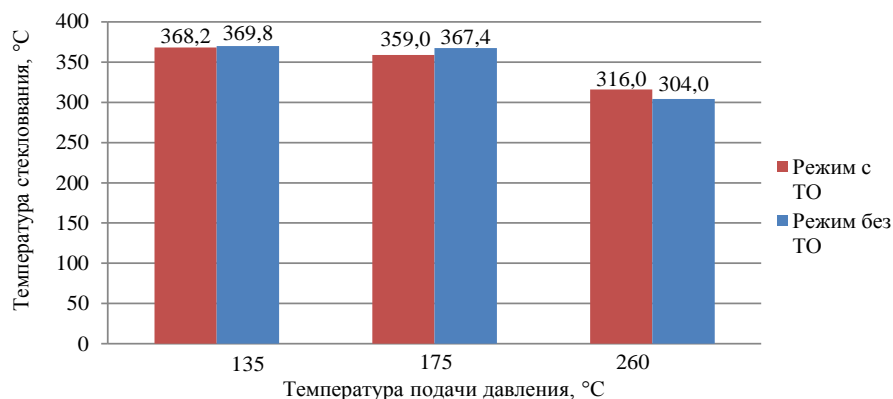


Рис. 5. Влияние термообработки (ТО) на температуру стеклования образцов из стеклопластика ВПС-72

По представленным на рис. 5 результатам можно сделать следующие выводы:

- увеличение температуры подачи давления (как и самого давления) приводит к снижению температуры стеклования полимерной матрицы;
- использование стадии термообработки с указанными параметрами не приводит к существенному увеличению температуры стеклования полимерной матрицы.

Однако сделанные выводы основываются только на итоговых значениях определения температуры стеклования без учета поведения образца в процессе испытания.

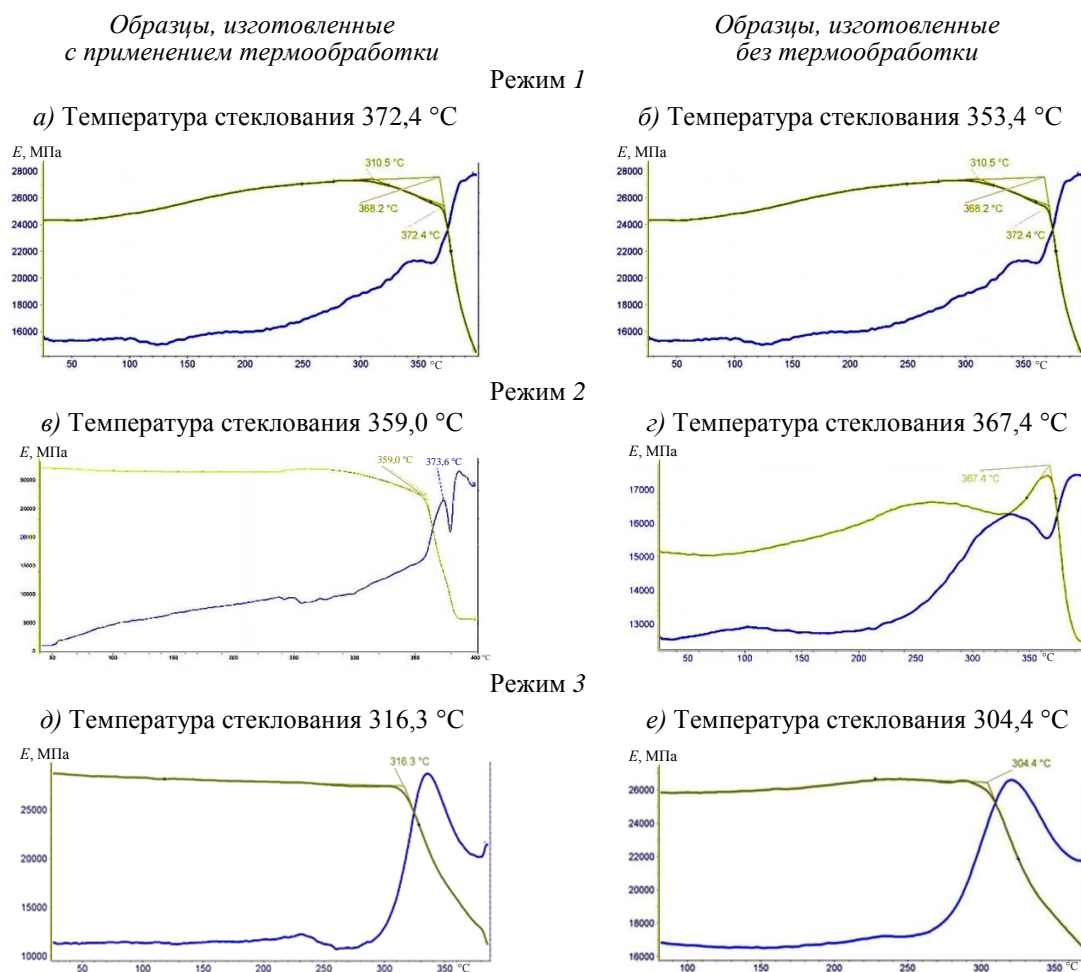


Рис. 6. Влияние термообработки на температуру стеклования образцов из стеклопластика ВПС-72

При анализе кривых ДМА, на основе которых определяли температуры стеклования, становится очевидно, что, несмотря на снижение конечной температуры стеклования, увеличение температуры подачи давления приводит к более равномерной структуре материала, которая позволяет обеспечивать равномерно высокое значение модуля упругости образца до расстекловывания полимерной матрицы. Данное явление наглядно продемонстрировано на рис. 6, д и е – с момента нагрева кривая выходит из области более высоких значений и при расстекловывании начинает снижаться, в то время как на рис. 6, а, б, г движение кривой начинается с меньших значений модуля упругости и продолжает расти до момента расстекловывания полимерной матрицы. На рис. 6, а и г также можно выделить несколько различных точек перегиба кривой, что свидетельствует о наличии в испытываемом образце полимерной матрицы с различной степенью конверсии, что, в свою очередь, не обеспечивает равномерности свойств в объеме материала. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что, несмотря на высокие значения температуры стеклования полимерной матрицы в образцах из стеклопластика ВПС-72, отформованных по режимам 1 и 2, более стабильная и равномерная структура полимерной матрицы наблюдается в образцах, отформованных по режиму 3.

Для оценки влияния технологий формования и режимов изготовления на упруго-прочностные свойства образцов из стеклопластика ВПС-72 определены две наиболее чувствительные характеристики – пределы прочности при межслойном сдвиге и сжатии (табл. 2, рис. 7).

Таблица 2

Результаты исследования упруго-прочностных свойств образцов из стеклопластика марки ВПС-72

Свойства	Значения свойств* для образцов, полученных по режиму формования					
	1		2		3	
	при температуре испытания, °С					
	20	320	20	320	20	320
Технология формования – прессование						
Предел прочности при сжатии, МПа	295–490 365,0	240–295 265,8	410–580 492,5	290–360 332,5	455–500 471,7	273–317 300,0
Коэффициент вариации	17,35	7,28	11,57	6,97	3,16	5,42
Сохранение свойств	72,80		67,51		63,60	
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	38–42 39,7	21–23 22,5	44–52 46,7	27–33 29,2	74–79 75,8	34–36 34,7
Коэффициент вариации	3,46	6,13	5,49	7,33	2,21	2,36
Сохранение свойств	56,72		62,50		45,71	
Технология формования – автоклавная						
Предел прочности при сжатии, МПа	330–420 366,7	285–320 296,7	260–315 284,2	170–235 194,2	520–580 548,3	370–385 372,5
Коэффициент вариации	8,47	4,85	6,13	12,97	3,40	1,64
Сохранение свойств	80,91		68,33		67,93	
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	33–40 37,7	23–25 23,7	24–29 26,3	15–17 16,5	85–91 88,5	28–31 29,3
Коэффициент вариации	7,13	6,36	8,40	9,19	2,42	3,52
Сохранение свойств	62,83		62,66		33,15	

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

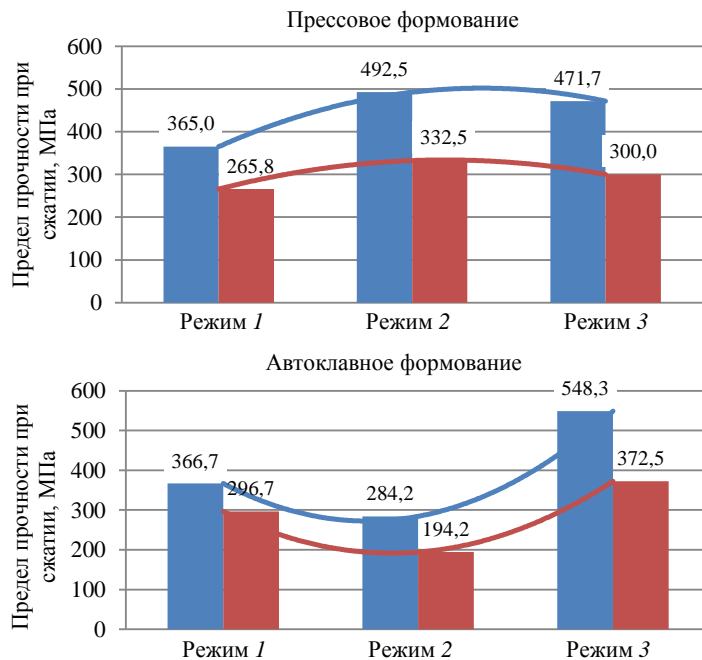


Рис. 7. Влияние технологии формования и режима изготовления на предел прочности при сжатии образцов из стеклопластика ВПС-72 при температуре испытания 20 (—) и 320 °С (—)

Результаты определения предела прочности при сжатии образцов из стеклопластика ВПС-72, изготовленных по различным режимам в прессе и в автоклаве, свидетельствуют о том, что режим 3 позволяет получать максимальные значения прочности вне зависимости от используемой технологии (рис. 8).

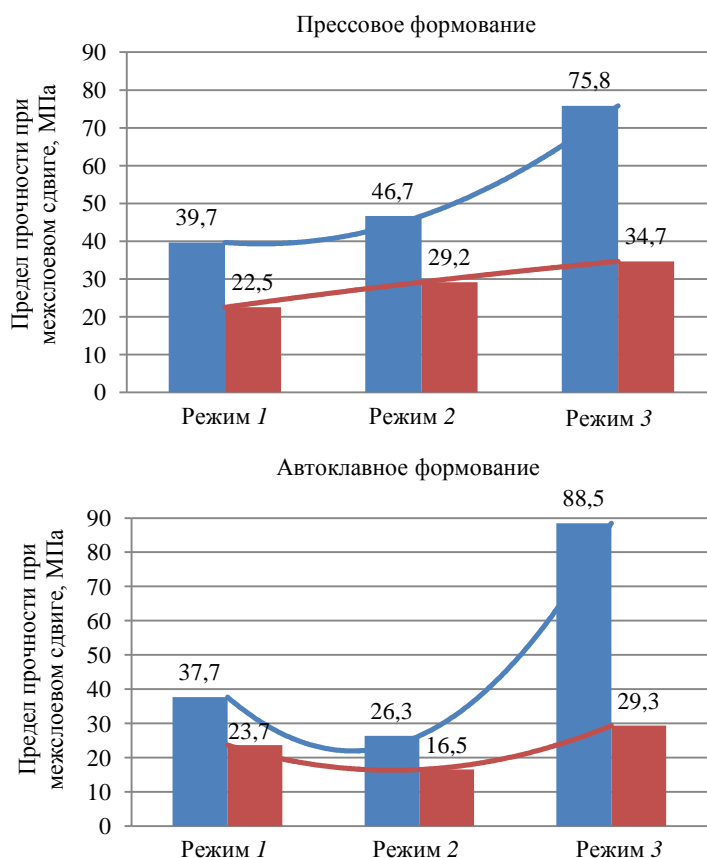


Рис. 8. Влияние технологии формования и режима изготовления на предел прочности при межслойном сдвиге образцов из стеклопластика ВПС-72 при температуре испытания 20 (—) и 320 °C (—)

Результаты исследования прочности при межслойном сдвиге образцов из стеклопластика ВПС-72, отформованных по режиму 3 в автоклаве и прессе, также свидетельствуют о том, что режим 3 с подачей давления при 260 °C позволяет получать максимальные значения прочности.

Еще одним важным параметром для оценки достигаемых показателей прочности является коэффициент вариации для исследуемых выборок. Из данных табл. 2 видно, что для режима с температурой подачи давления 260 °C коэффициент вариации для различных выборок находится в диапазоне 1,64–5,42, что свидетельствует о высокой сходимости получаемых результатов. Для других режимов и технологий формования коэффициенты вариации имеют большие разбросы и находятся в диапазоне 3,46–17,35, что свидетельствует о большом разбросе абсолютных значений прочности и может быть связано с повышенной неоднородностью структуры изготовленных образцов.

Из неочевидных недостатков режима 3 с температурой подачи давления 260 °C можно рассмотреть лишь относительный показатель – сохранение прочности при температуре испытания 320 °C. Для всех технологий формования и всех прочностных характеристик образцы стеклопластика ВПС-72, изготовленные по режиму с температурой

подачи давления 260 °С, демонстрируют сохранение свойств при температуре 320 °С в диапазоне 33,15–67,93 %, что не является высоким показателем. Однако при оценке данного параметра необходимо учитывать, что:

– температура стеклования образцов, изготовленных по указанному режиму, меньше, чем температура испытаний, в связи с чем образцы легче подвергаются деформации и имеют меньшие значения прочности;

– данные образцы имеют наибольшие показатели прочности при температуре 20 °С, в связи с чем снижение исследуемых показателей при 320 °С в абсолютных значениях демонстрирует существенно большее снижение показателей в относительных значениях;

– несмотря на низкие значения сохранения свойств в относительных величинах, сравнение значений прочности при температуре 320 °С между различными режимами в значениях абсолютных все равно показывает, что образцы, изготовленные по режиму 3, обеспечивают высокие показатели прочности при повышенных температурах.

С целью исследования влияния режимов изготовления на структуры образцов стеклопластика проведен микроструктурный анализ, результаты которого приведены на рис. 9.

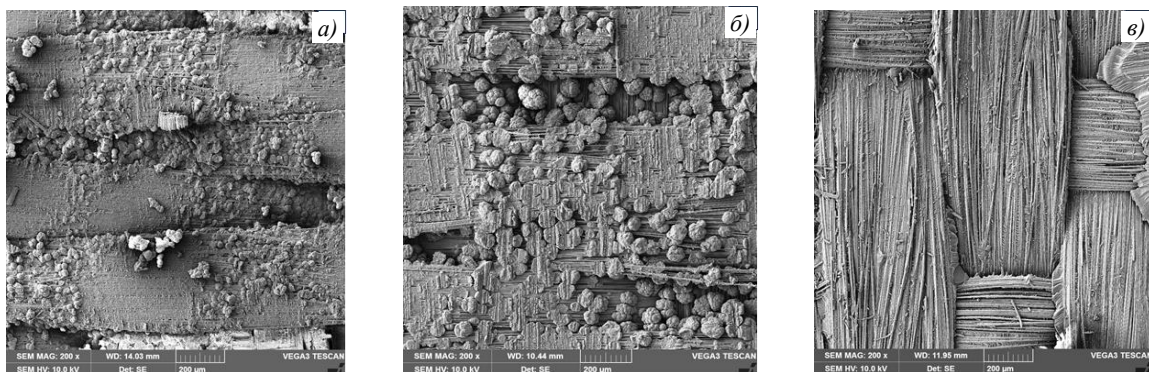


Рис. 9. Микроструктура образцов из стеклопластика ВПС-72, изготовленных по режимам с подачей давления при температурах 135 (а), 175 (б) и 260 °С (в)

По результатам исследования микроструктуры образцов из стеклопластика ВПС-72, изготовленных по различным режимам, можно отметить высокое качество структуры образцов, отформованных по режиму 3 с температурой подачи давления 260 °С. На рис. 9, в не наблюдается агломераций связующего на поверхности волокна и отчетливо видно, что основная масса полимерной матрицы равномерно распределена в межволоконном пространстве. В то же время на рис. 9, а и б наблюдаются глобулы полимерной матрицы, расположенные на поверхности армирующего наполнителя, что может свидетельствовать о том, что формирование матрицы происходит в период, когда прилагаемое давление не обеспечивает распределение связующего в объеме наполнителя, и в конечном итоге приводит к неравномерности структуры, наличию пор и «неупрессованных» участков в объеме образца. Соответственно, высокие показатели коэффициента вариации, нестабильные свойства и более низкое сохранение прочностных характеристик являются следствием выбранных технологических параметров переработки.

Проводя анализ микроструктуры исследуемых образцов из стеклопластика ВПС-72, можно также установить взаимосвязь между микроструктурой образцов и температурой стеклования полимерной матрицы. Ранее рассмотрено, что увеличение температуры подачи давления (как и самого давления формования) приводило к снижению температуры стеклования полимерной матрицы, но при этом обеспечивало

более равномерную структуру с точки зрения глубины протекания реакции в объеме материала. С учетом результатов исследования микроструктуры образцов стеклопластика можно предположить, что образцы стеклопластика, отформованные по режиму 3, имеют более низкую температуру стеклования из-за значительного давления формования, использованного для этого режима. При оказании существенного давления на технологический пакет обеспечивается более равномерное распределение связующего в объеме наполнителя, однако вместе с тем возникают стерические затруднения при взаимодействии макромолекул полимерной матрицы, что в итоге приводит к менее плотной степени сшивки пространственной сетки и, как следствие, к меньшей температуре стеклования образцов.

### Заключения

По результатам проведенных работ показано влияние режимов переработки на комплекс свойств стеклопластика ВПС-72 на основе расплавного полиимидного связующего PMR-типа. Установлено, что режим с температурой подачи давления 260 °С и давлением формования 140 Н обеспечивает более однородную и равномерную структуру материала, что позволяет достичь более высокого уровня физико-механических свойств и сохранения его в условиях воздействия высоких температур. Однако необходимо учитывать, что один и тот же материал может использоваться в различных элементах конструкции, к которым предъявляются разные требования. Исходя из этого, можно заключить, что стеклопластик ВПС-72 за счет различных технологических параметров переработки может обеспечивать широкий диапазон характеристик, который соответствует предъявляемым требованиям.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: К.Р. Ахмадиевой и А.Л. Шошевой за техническую поддержку, а также С.Л. Лонскому и Е.В. Куршеву за проведение микроструктурных исследований.

### Список источников

1. Алдошин С.М., Бадамшина Э.Р., Каблов Е.Н. Полимерные нанокомпозиты – новое поколение полимерных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками // Тез. докл. науч.-техн. секций I Междунар. форума по нанотехнологиям «Роснанотех 08». М.: Российская корпорация нанотехнологий, 2008. С. 385–387.
2. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 10. С. 61–71.
3. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-349-367.
5. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Guohua S., Xin Z., Dezhen W., Lianlong H. Research Progress in High-performance Polyimide Composites // China Plastics. 2021. Vol. 35 (9). P. 147–155. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2021.09.022.

7. Gouzman I., Grossman E., Verker R. et al. Advances in Polyimide-Based Materials for Space Applications // *Advanced materials*. 2019. Vol. 31 (18). Art. 05. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com> (дата обращения: 28.03.2022). DOI: 10.1002/adma.201807738.
8. Fernberg P., Gong G., Mannberg P. Processing and properties of new polyimide composites with high temperature ability // *ECCM16 – 16th European Conference on Composite Materials* (Seville, June 22–26, 2014). URL: <http://www.escm.eu.org/eccm16/assets/0600.pdf> (дата обращения: 17.11.2021).
9. Yang S.-Y., Ji M. Polyimide matrices for carbon fiber composites // *Advanced Polyimide Materials. Synthesis, Characterization and Applications*. Elsevier, 2018. P. 93–136. DOI: 10.1016/B978-0-12-812640-0.00003-2.
10. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
11. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
12. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/20719140-2018-0-1-58-63.
13. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе // *Полимерные материалы*. 2005. № 8. С. 23–26.
14. Александров Н.А., Малышева Г.В., Нелюб В.А. Исследование поверхностей разрушения углепластиков, изготовленных по расплавной и растворной технологиям // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. № 3. С. 7.
15. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавного полиимидного связующего полимеризационного типа // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2022). DOI: 10/18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.

#### References

1. Aldoshin S.M., Badamshina E.R., Kablov E.N. Polymer nanocomposites – a new generation of polymer materials with improved performance. *Reports of Sci.-Tech. Sections I Intern. Forum on Nanotechnology "Rosnanotech 08"*. Moscow, 2008, pp. 385–387.
2. Kablov E.N., Semenova L.V., Petrova G.N., Larionov S.A., Perfilova D.N. Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser.: Chemistry and chemical technology*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 61–71.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
6. Guohua S., Xin Z., Dezhen W., Lianlong H. Research Progress in High-performance Polyimide Composites. *China Plastics*, 2021, vol. 35 (9), pp. 147–155. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2021.09.022.

7. Gouzman I., Grossman E., Verker R. et al. Advances in Polyimide-Based Materials for Space Applications. *Advanced materials*, 2019, vol. 31 (18), art. 05. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com> (accessed: March 28, 2022). DOI: 10.1002/adma.201807738.
8. Fernberg P., Gong G., Mannberg P. Processing and properties of new polyimide composites with high temperature ability. *ECCM16 – 16th European Conference on Composite Materials* (Seville, June 22–26, 2014). Available at: <http://www.escm.eu/org/eccm16/assets/0600.pdf> (accessed: November 17, 2021).
9. Yang S.-Y., Ji M. Polyimide matrices for carbon fiber composites. *Advanced Polyimide Materials. Synthesis, Characterization and Applications*. Elsevier 2018, pp. 93–136. DOI: 10.1016/B978-0-12-812640-0.00003-2.
10. Boychuk A.S., Generalov A.S., Dikov I.A. FRP parts and structures testing by phased array technique. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
11. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Constructional polymer composites with functional properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
12. Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
13. Mikhailin Yu.A. Heat-resistant polymers and polymer materials based on them. *Polimernye materialy*, 2005, no. 8, pp. 23–26.
14. Aleksandrov N.A., Malysheva G.V., Nelyub V.A. Investigation of fracture surfaces of carbon fiber plastics made using melt and mortar technologies. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2011, no. 3, p. 7.
15. Zharinov M.A., Shimkin A.A., Akhmediyeva K.R., Zelenina I.V. Features and properties of solvent-free PMR-type polyimide resin. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.

#### Информация об авторах

**Колпачков Егор Дмитриевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Курносков Артем Олегович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Папина Светлана Николаевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Петрова Алефтина Петровна**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Egor D. Kolpachkov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Artem O. Kurnosov**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Svetlana N. Papina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleftina P. Petrova**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 28.04.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.05.2021.

The article was submitted 28.04.2021; approved and accepted for publication after reviewing 05.05.2021.