

УДК 678.8

Е.А. Вешкин<sup>1</sup>**ОСОБЕННОСТИ БЕЗАВТОКЛАВНОГО  
ФОРМОВАНИЯ НИЗКОПОРИСТЫХ ПКМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7

*Рассмотрены методы снижения пористости в ПКМ, изготовленных методом вакуумного формования. Исследованы технологические свойства эпоксидного связующего и препрега на его основе с помощью приборов Brookfield Cap 2000+, DSC 204F1 и ИПФ 2003. На основании проведенных исследований подобраны параметры технологического режима отверждения ПКМ. Проведено исследование механических свойств стеклопластика на испытательной машине Z050 фирмы Zwick/Roell.*

**Ключевые слова:** эпоксидное связующее, препрег стеклопластика, методики контроля технологических свойств, стеклопластик.

*Methods of decrease in porosity in PCM manufactured by vacuum molding are considered. Technological properties of epoxy binder and prepreg on its basis are studied with the use of instruments of Brookfield Cap 2000+, DSC 204F1 and IAP 2003. On the basis of these studies parameters of technological mode of curing of PCM are selected. The study of the mechanical properties of fiberglass is carried out on testing machine Zwick/Roell Z050.*

**Keywords:** epoxy binder, prepreg of fiberglass, control techniques of technological properties, fiberglass, thermal analysis.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Совершенствование материалов и технологий их переработки является основной движущей силой для развития авиационной техники [1]. В этой связи полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря целому комплексу уникальных свойств, основными из которых являются удельная прочность и жесткость, а также возможности изготовления из них крупногабаритных деталей, постепенно вытесняют металлы из конструкции летательных аппаратов (ЛА). По прогнозам развития мирового рынка гражданской авиации можно ожидать увеличения спроса на летательные аппараты [2, 3]. В таких условиях вопрос снижения издержек при сохранении качества в производстве деталей для ЛА выходит на первый план и заставляет производителей искать пути снижения их себестоимости путем внедрения новых материалов и энергосберегающих технологий. В этой связи широкое применение при изготовлении слабо- и средненагруженных деталей из ПКМ для ЛА находят безавтоклавные методы формования (out-of-autoclave – ООА) [4–6]. Процессы формования деталей из ПКМ под вакуумным мешком в термопечи или на обогреваемой оснастке позволяют получать крупногабаритные детали сложной пространственной формы без использования дорогостоящего оборудования, такого как автоклав. Однако ПКМ, изготовленные на основе большинства используемых серийно полимерных связующих отечественного производства, имеют сниженные на 10–15% прочностные показатели в сравнении с пластиками, изготовленными вакуум-автоклавным и прессовым методами, ввиду повышенной пористости и

большей величины монослоя из-за разницы применяемого избыточного давления при формовании [7, 8].

В свою очередь пористость в ПКМ влияет на их эксплуатационные характеристики. Так, по мере накопления в объеме пор воды снижаются термомеханические свойства ПКМ, а термоциклирование от минусовых до плюсовых температур при эксплуатации может привести к образованию внутренних дефектов и сокращению ресурса конструкций [9, 10].

В зарубежной литературе приводятся сведения о применении препрегов, специально разработанных для безавтоклавных технологий формования, обеспечивающих получение низкопористых ПКМ [11, 12]. Это обусловлено тем, что импортные компоненты связующих имеют низкий уровень примесей низкомолекулярных веществ, улетучивающихся при нагреве [13]. Что касается смол, произведенных отечественной промышленностью, то присутствие в них массовой доли летучих веществ доходит до 1,5%, поэтому, как отмечалось ранее, изготовление низкопористых ПКМ на их основе достигается приложением высокого давления при формовании.

В России в последние годы также разрабатываются связующие и технологии для изготовления ПКМ методами вакуумного формования [14, 15]. Однако их внедрение в серийное производство – длительный процесс. В настоящее время в отечественной авиационной промышленности используются в основном связующие, разработанные еще в 80-х годах прошлого века и предназначенные для вакуум-автоклавного метода формования. В связи с вышеизложенным необходимо повышать качество деталей из ПКМ, полученных методом вакуумного формования, и применять дополнительные технологические приемы при приготовлении связующего, подготовке и пропитке наполнителей, а также при сборке технологического пакета и отверждении ПКМ.

В работах [7, 16–19] авторами проведен анализ причин возникновения пористости и методов ее снижения в ПКМ, получаемых вакуумным формованием, и применение данных методов при подготовке связующего. Однако отсутствует комплексный подход ко всему циклу изготовления ПКМ.

### Материалы и методы

В этой связи целью данной работы являлось исследование влияния подготовительных операций на стадиях изготовления ПКМ, перерабатываемых методом вакуумного формования, на их пористость и основные свойства. Объектами исследования были эпоксидное связующее ЭДТ-69НР (расплавного типа), а также препрег и стеклопластик на его основе и стеклоткани Т-10-14.

Исследования технологических свойств связующего и препрега проводили на приборах: Brookfield cap 2000+ (измерение условной вязкости), термоанализатор DSC 204F1 (определение температуры начала активной реакции отверждения связующего и температуры максимума реакции отверждения связующего в препреге, а также количество выделившегося тепла), ИПФ 2003 (определение времени гелеобразования препрега); на лабораторном прессе исследовали массовую долю текучей смолы в препреге, на испытательной машине Z050 фирмы Zwick/Roell определяли физико-механические свойства.

### Результаты

Связующее имеет огромное значение для стабильности свойств ПКМ: обеспечивает монолитность композиционного материала, его устойчивость к различного рода воздействиям внешней среды, химическую и термическую стойкость, поэтому от стабильности качества связующего в процессе производства зависят свойства отформованных

ПКМ [19]. В этой связи процесс получения полимерного связующего – важная операция на стадии создания ПКМ.

Полимерное связующее ЭДТ-69НР расплавное, однако получаемые на его основе методами вакуумного и прессового формования стеклопластики имеют пористость до 6%. Одной из основных причин возникновения пористости является наличие некоторого количества массовой доли летучих веществ (примесей). Летучие вещества – это побочные продукты синтеза смол, применяемых в связующем, и низкомолекулярные соединения, образующиеся в процессе реакции поликонденсации, а также сорбированная в процессе их хранения вода. Содержание летучих веществ в компонентах связующего доходит до 1,5% (по массе). Представленные в работе [7] данные термогравиметрического анализа (ТГА) и визуализация поведения полимерного связующего ЭДТ-69НР при изотермической выдержке под вакуумом подтверждают активное газовыделение из его объема.

При вакуумном формовании объем газов, образованных низкомолекулярными летучими веществами совместно с захваченными газами воздуха и водой в связующем и межволоконном пространстве, увеличивается в разы. В этом случае по закону Бойля–Мариотта из формулы  $PV=vRT$  следует, что снижение давления под вакуумным мешком в  $N$  раз приведет к увеличению в  $N$  раз объема газа, содержащегося в объеме связующего. Отметим, что это происходит при условии изотермической выдержки. При повышении температуры эта цифра будет увеличиваться в случае отсутствия сопротивления в виде давления со стороны вакуумного мешка. Увеличиваясь в объеме, выделившийся газ начнет выталкивать полимерное связующее из наполнителя за пределы технологического пакета.

Анализируя указанную выше зависимость, можно заключить, что для снижения образования пор в ПКМ необходимо снизить массовую долю летучих веществ в связующем до минимального значения. Это поможет повысить температуру вскипания связующего при его нагреве и действии вакуума. Для этого необходимо: определить количественную долю легколетучей составляющей, присутствующей в компонентах связующего, и минимальный предел ее содержания. Динамика изменения массы компонентов полимерного связующего ЭДТ-69НР при изотермической выдержке в вакууме ( $T=150^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{вак}}=-0,095$  МПа) показала, что у всех компонентов происходит снижение массы в процессе выдержки в указанных условиях (рис. 1).

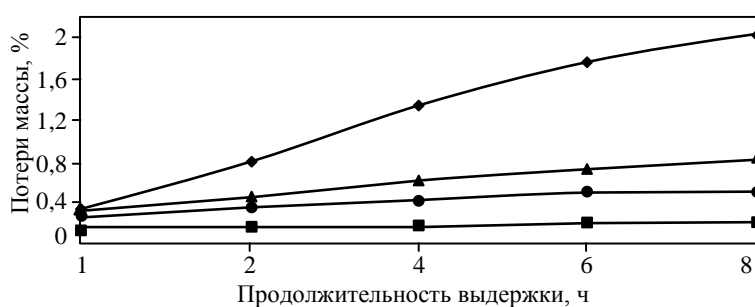


Рис. 1. Изменение массы компонентов связующего ЭДТ-69НР – компаунда КДА (♦), бромсодержащей смолы УП-631 (■), смолы ЭТФ (▲) и отвердителя №9 (●)

Результаты исследований показали, что наибольшее изменение массы наблюдается у смолы КДА, наименьшее – у бромсодержащей смолы УП-631. С течением времени динамика уменьшения массы снижается, однако потеря массы у компонентов связующего продолжается и после 8 ч выдержки в указанных условиях.

С целью оценки эффективности дегазации компонентов связующего проведено исследование, в котором определяли начало активного газовыделения в компонентах

исходного и дегазированного связующих при различных температурах и давлениях. Для этого контрольные образцы помещали в герметичную прозрачную емкость и нагревали до заданной температуры. После этого в емкости плавно создавали разрежение и фиксировали давление вакуума, при котором происходит образование и рост объема пузырьков газа. Результаты исследований приведены на рис. 2. Установлено, что в дегазированных компонентах активное газовыделение при изотермических выдержках при разных температурах начинается при более высокой величине вакуума во всем диапазоне измерений. Так, при 130°C газовыделение в компонентах недегазированного связующего начинается при величине вакуума 0,064 МПа, а в дегазированных – при 0,082 МПа. Однако дегазирование не дает полного исключения газовыделения в компонентах связующего, а только снижает его. В этой связи необходимы технологические решения на дальнейших стадиях изготовления ПКМ.

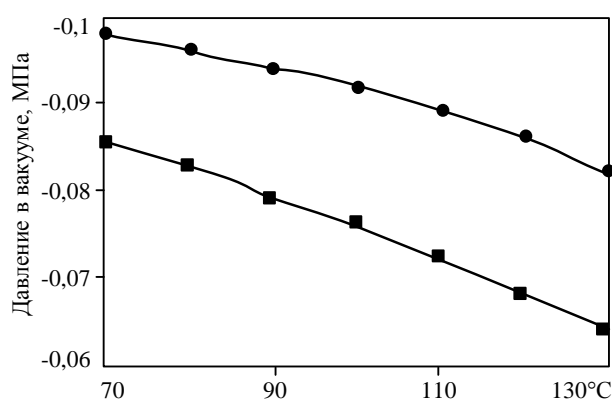


Рис. 2. Кривые начала активного газовыделения в смеси компонентов связующего ЭДТ-69НР (без отвердителя №9) в зависимости от температуры и давления в исходном состоянии без дегазации (■) и после дегазации при изотермической выдержке (●)

Для оценки влияния длительности термообработки компонентов связующего ЭДТ-69Н на изменение его технологических свойств проведено их исследование и сравнение со свойствами серийных образцов.

Методы термоанализа являются оперативными методами контроля свойств полуфабрикатов ПКМ [21, 22]. Проведенные исследования партий связующего ЭДТ-69НР методами ДСК, ТГА, ДТГА, вискозиметрии и определение времени желатинизации не выявили существенных различий между технологическими свойствами партий связующих с дегазированными и серийно используемыми компонентами.

Стоит отметить, что для удаления газовых включений, захваченных при совмещении компонентов связующего и дисперсного отвердителя №9, проводили дегазацию связующего в реакторе при приготовлении.

Следующим этапом на пути снижения пористости в ПКМ является подготовка наполнителя к операции пропитки. Известно, что волокна стеклянных наполнителей на своей поверхности имеют аппрет, который наносится на стадии их изготовления. Для данной работы выбрана стеклянная конструкционная ткань Т-10-14, на волокна которой нанесен силановый аппрет. Содержание аппрета по ГОСТ 19170 – не менее 0,3%.

Наиболее простым способом подготовки наполнителя является его прокаливание при повышенной температуре. Исследование стеклоткани Т-10-14 при изотермической выдержке при температуре 650°C показало снижение массы на 0,49%. Однако из имеющегося опыта известно, что удаление аппрета ведет к резкому снижению прочностных показателей ПКМ, а термообработка стеклоткани при температурах >200°C

ведет к ее разупрочнению. В этой связи проведенные исследования термообработки стеклоткани Т-10-14 в течение 60 с показали, что динамика снижения массы при 180 и 160°C составляет 0,32 и 0,16% соответственно, поэтому выбран режим термообработки, который обеспечивает удаление сорбированной воды из наполнителя и не оказывает значительного влияния на аппрет, нанесенный на поверхность наполнителя.

Как отмечалось ранее, в ПКМ, изготавливаемых методом вакуумного формования, величина монослоя выше, чем в ПКМ, изготавливаемых прессовым или автоклавным методами. В этой связи исследована динамика уплотнения слоев ткани Т-10-14 в зависимости от прилагаемого давления. Установлено (рис. 3), что при удельном давлении 0,095 МПа величина монослоя пакета из 5, 10 и 20 слоев составляет 0,22–0,24 мм соответственно. В зависимости от поверхностной плотности наполнителя эта величина меняется незначительно.

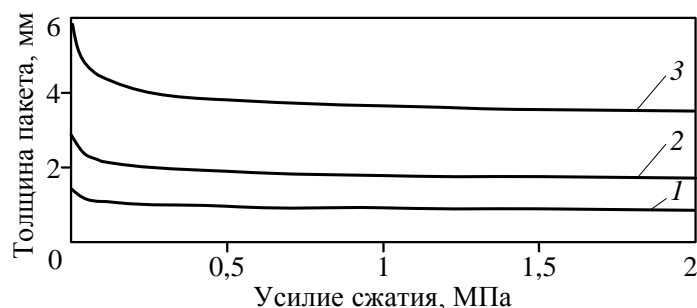


Рис. 3. Зависимость величины уплотнения пакета стеклоткани Т-10-14 из 5 (1), 10 (2) и 20 слоев (3)

Теоретически по формуле рассчитано массовое содержание связующего в беспористом стеклопластике марки СТ-69Н-14 [18]:

$$C_{\text{св}} = \frac{\left( V - \frac{m_{\text{ТК}}}{\rho_{\text{СТ}}} \right) \cdot \rho_{\text{св}}}{\left( V - \frac{m_{\text{ТК}}}{\rho_{\text{СТ}}} \right) \cdot \rho_{\text{св}} + m_{\text{ТК}}} \cdot 100,$$

где  $V$  – объем беспористого пластика, см<sup>3</sup>;  $m_{\text{ТК}}$  – поверхностная плотность стеклоткани Т-10-14 ( $m_{\text{ТК}}=283-297$  г/см<sup>2</sup>);  $\rho_{\text{СТ}}$  – плотность стеклянных нитей, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{св}}$  – плотность связующего ЭДТ-69Н (значение 1,35 г/см<sup>3</sup> получено экспериментальным путем).

Результаты расчета представлены в графическом виде на рис. 4. Установлено, что при изготовлении стеклопластика автоклавным или прессовым методом толщина монослоя составляет 0,21 мм, расчетное содержание связующего в стеклопластике СТ-69Н-14 при этом будет меняться от 29,8 до 32,08% (по массе) в зависимости от поверхностной плотности наполнителя. Однако для стеклопластика той же марки, полученного вакуумным методом формования (величина монослоя 0,24 мм), расчетное массовое содержание связующего будет меняться от 35,9 до 38,09%. В связи с этим рассчитана необходимая норма связующего ЭДТ-69Н для препрега стеклопластика СТ-69Н-14: она должна составлять не менее 39 и не более 41%.

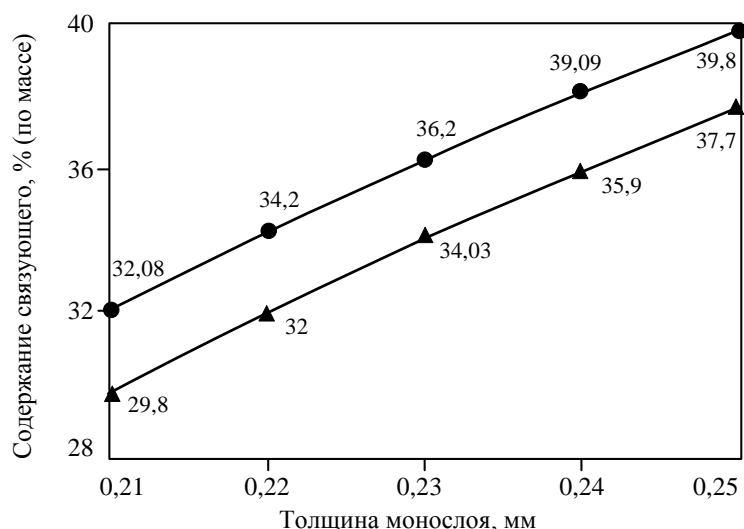


Рис. 4. Расчетные значения массового содержания связующего в беспористом стеклопластике марки СТ-69Н-14 в зависимости от поверхностной плотности стеклоткани Т-10-14: 283 (●) и 297 г/см<sup>2</sup> (▲)

С учетом проведенных исследований на установке УПР-4 изготовлен препрег стеклопластика СТ-69Н-14 расплавного типа. Исследование технологических свойств препрега показало его соответствие нормам технических условий на данный вид продукции. Содержание связующего в препреге изменялось от 38 до 41% (по массе).

На следующей стадии послойной выкладки технологического пакета на формообразующую оснастку важной задачей являлось удаление воздуха из пространства между слоями. Для его удаления каждый слой препрега прикатывали шпателем к предыдущему вдоль направления основы с приложением усилия. Технологический пакет после укладки определенного количества слоев вакуумировали.

Для выбора температурного режима формования проведено исследование связующего ЭДТ-69Н методом термоанализа с дегазированными компонентами (рис. 5).

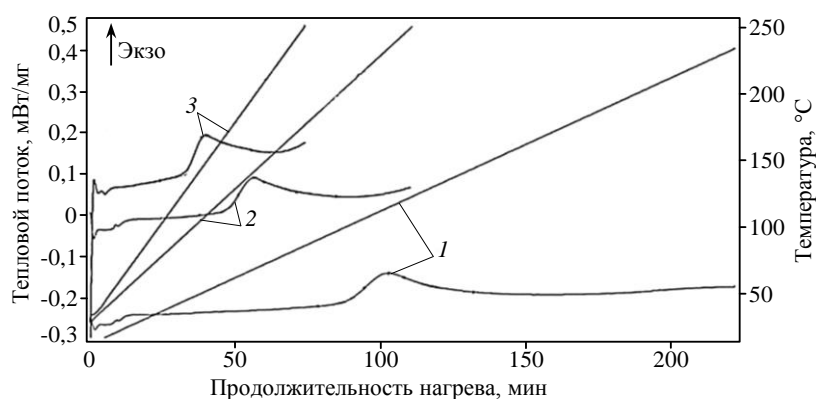


Рис. 5. Кривые тепловых эффектов при нагреве образцов связующего ЭДТ-69НР со скоростями нагрева 1 (1), 2 (2) и 3 °C/мин (3)

Из полученных кривых изменения интенсивности выделения или поглощения тепла при нагреве препрега СТ-69Н-14 установлено, что в зависимости от скорости нагрева соответственно 1, 2 и 3 °C/мин температура начала активной реакции составляет 115,66, 122,44 и 127,37 °C, температурный пик: 130,06, 140,49 и 147,33 °C, температура окончания активной реакции: 149,38, 168,67 и 175,80 °C.

Реакция полимеризации без образования резко выраженного пика наблюдается при скорости нагрева  $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Данная скорость выбрана для режима нагрева при изготовлении образцов.

Важным условием при формовании ПКМ вакуумным методом является получение оптимальной величины монослоя. Это связано с тем, что на этапе нагрева технологический пакет под действием избыточного давления должен уплотниться по мере удаления из него избытка связующего. С увеличением толщины детали этот процесс может занять длительное время. В этом случае дополнительно в температурный режим отверждения вводится изотермическая выдержка, при которой вязкость связующего меняется незначительно, что позволяет завершить процесс уплотнения технологического пакета.

С целью выбора температуры и продолжительности изотермической выдержки с помощью испытательной машины Z050 фирмы Zwick/Roell исследована динамика уплотнения технологического пакета, состоящего из 10 слоев препрега стеклопластика марки СТ-69Н-14, при нагреве до  $120^{\circ}\text{C}$  и изотермических выдержках при температурах 80, 90, 100 и  $110^{\circ}\text{C}$  с приложением избыточного давления  $0,095\text{ МПа}$ . Кроме того, при указанных температурах определены значения условной вязкости исследуемого связующего и его время гелеобразования, а также на приборе ДСК проведено исследование тепловыделения в процессе нагрева по ступенчатым температурным режимам (рис. 6–10).



Рис. 6. Изменение толщины пакета (1) препрега марки СТ-69Н-14 в зависимости от приложенного давления сжатия при нагреве со скоростью  $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  (2 – температурный режим)

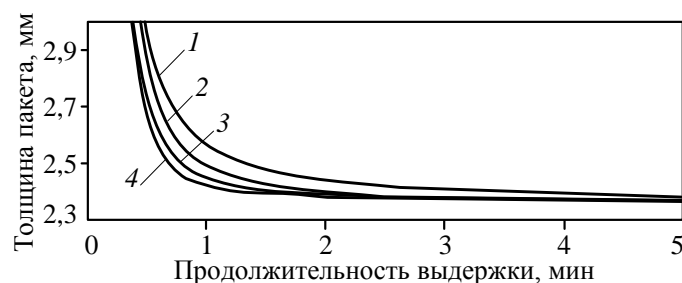


Рис. 7. Изменение толщины пакета препрега марки СТ-69Н-14 от приложенного давления сжатия при изотермических выдержках при температурах 80 (1), 90 (2), 100 (3) и  $110^{\circ}\text{C}$  (4)

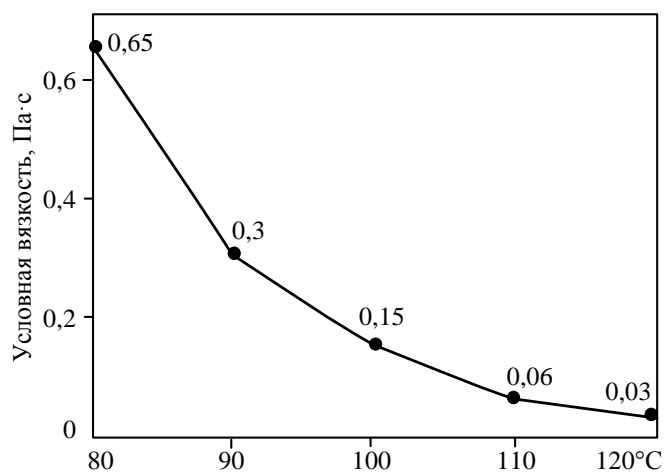


Рис. 8. Температурная зависимость условной вязкости связующего ЭДТ-69НР

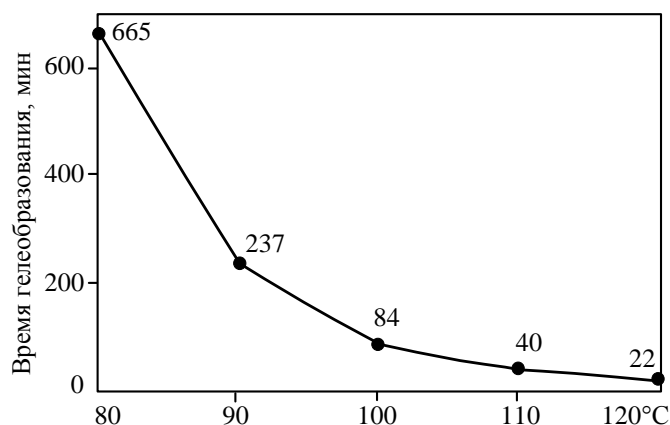


Рис. 9. Зависимость времени гелеобразования связующего от температуры изотермической выдержки

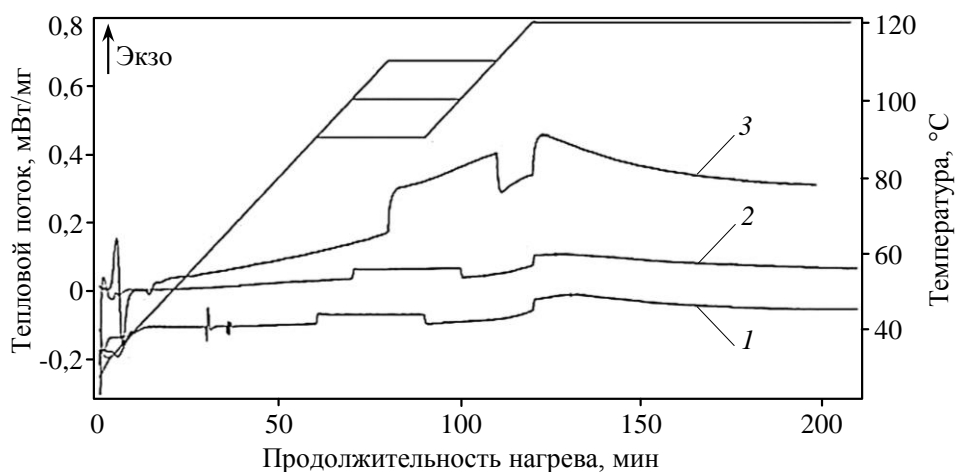


Рис. 10. Кривые изменения тепловыделения при нагреве препрега СТ-69Н-14 по режиму №2 (1), №3 (2) и №34 (3)

Установлено (см. рис. 6 и 7), что уплотнение технологического пакета, состоящего из 10 слоев препрега марки СТ-69Н-14, при изотермических выдержках занимает не более 5 мин, а при нагреве пакет окончательно уплотняется при температуре 65–70°C. Однако введение таких ступенчатых выдержек должно обеспечить дополнительную пропитку волокон наполнителя и уменьшить разброс температур при формировании крупногабаритных деталей.

Из полученных результатов исследований для ступенчатой выдержки выбрана температура 100°C, при которой связующее ЭДТ-69НР имеет условную вязкость 0,16 Па·с и время гелеобразования 84 мин. Длительность ступенчатой выдержки выбрана равной 30 мин, что должно обеспечить окончательную пропитку волокна за данный промежуток времени, так как при данной температуре вязкость связующего меняется незначительно. С учетом полученных результатов исследования тепловыделения препрега (см. рис. 8 и 9) определен температурный режим отверждения стеклопластика СТ-69Н-14.

Для определения манометрической составляющей режима проанализировано (рис. 11) и исследовано время начала гелеобразования связующего в препреге при выбранном температурно-временном режиме на приборе ИПФ 2003 и вискозиметре Брукфилда (рис. 10) [19, 23, 24].

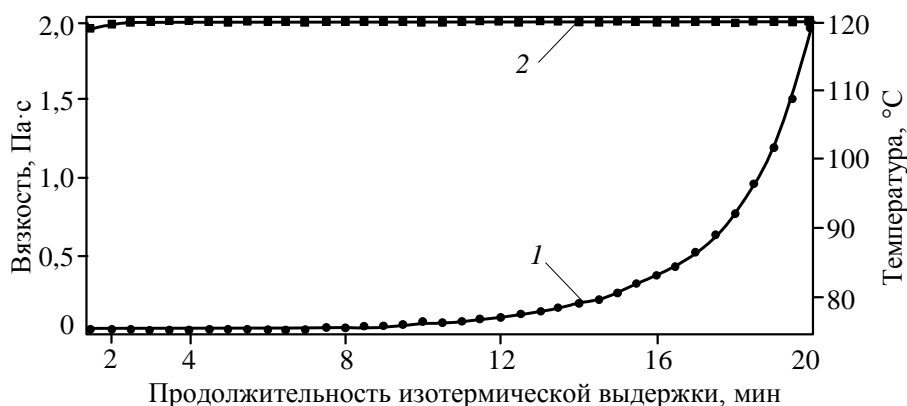


Рис. 11. Изменение вязкости связующего (1) марки ЭДТ-69НР при изотермической выдержке (2) при температуре 120°C

С помощью прибора ИПФ 2003 провели анализ изменения первой производной амплитуды ультразвука, прошедшего через образец, а именно – по верхнему пику, после которого можно условно считать, что скорость реакции полимеризации снижается. Исходя из полученных результатов определено время начала очень быстрого гелеобразования (температура ~120°C), которое составило ~14 мин. По изменению вязкости связующего ЭДТ-69НР установлено, что резкое нарастание вязкости начинается после 16 мин выдержки.

После анализа полученных результатов разработан режим отверждения стеклопластика марки СТ-69Н-14. С использованием данного режима отформована плита стеклопластика марки СТ-69Н-14, из которой вырезаны стандартные образцы для проведения испытаний в соответствии с ГОСТ 25601–80 – предел прочности при растяжении, ГОСТ 4651–78 – предел прочности при сжатии, ГОСТ 4648–71 – предел прочности при статическом изгибе. Испытания проводили на испытательной машине Z050 фирмы Zwick/Roell. Результаты исследований свойств стеклопластика в сравнении с аналогами, отформованными в автоклаве, прессе и термопечи, приведены в таблице.

**Результаты физических и упруго-прочностных испытаний стеклопластика  
марки СТ-69Н-14, отформованного разными способами**

Метод формовки	Предел прочности*, МПа, при				Толщина монослоя, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Содержание связующего
	растяжении	сжатии	изгибе	сдвиге				
В автоклаве	<u>715–790</u> 765	<u>510–625</u> 575	<u>940–995</u> 970	<u>57–66</u> 63	0,21	2,0	1,3	31,7
В прессе	<u>620–735</u> 690	<u>505–570</u> 535	<u>855–970</u> 920	<u>59–64</u> 62	0,21	2,0	3,7	30,0
В термопечи по стандартному режиму	<u>605–660</u> 640	<u>420–465</u> 450	<u>725–795</u> 755	<u>51–56</u> 54	0,23	1,8	7	32,6
По выбранному режиму дегазации	<u>730–770</u> 750	<u>530–565</u> 540	<u>890–970</u> 930	<u>59–62</u> 61	0,24	1,88	1,8	36,9

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Из данных таблицы видно, что по основным механическим свойствам стеклопластик, изготовленный из дегазированных компонентов и отформованный по выбранному режиму, с пористостью  $\leq 2\%$  превосходит образец, отформованный в термопечи методом вакуумного формования по традиционному режиму, и находится на уровне свойств образца, изготовленного методом автоклавного формования.

### Заключение

Проведенная дегазация компонентов связующего, выбор манометрических и температурных параметров режима формования на основании проведенных исследований позволили получить стеклопластик с пористостью 1,5–2% и повышенными механическими свойствами в сравнении с серийным аналогом. Данная методика может быть применена для выбора технологических параметров отверждения ПКМ на основе аналогичных связующих.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Прогнозы развития мирового рынка гражданской авиации // ТИ ЦАГИ. 2003. №3–4. С. 6.
3. Компания AIRBUS: [офиц. сайт]. URL: <http://www.airbus.com> (дата обращения: 18.03.2015).
4. COMPOSITESWORLD: [электронный ресурс]. URL: <http://www.compositesworld.com> (дата обращения: 18.03.2015).
5. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Застрогина О.Б., Сатдинов Р.А. Технология ускоренного формования трехслойных сотовых панелей интерьера самолета // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. №4 (4). С. 799–805.
6. Коган Д.И., Душин М.И., Борщев А.Н., Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Макрушин К.В. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 762–766.
7. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Особенности подготовки полимерного связующего для снижения пористости стеклопластиков, получаемых методом вакуумного формования // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. №4 (2). С. 462–468.
8. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
9. Геча Э.Я., Нестеренко В.А. К вопросу об определении коэффициента диффузии воды в полимерных материалах по кривым поглощения // Пластические массы. 2005. №5. С. 46–49.

10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кирилов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–26.
11. Компания GURIT: [офиц. сайт]. URL: <http://www.gurit.com> (дата обращения: 18.03.2015).
12. Компания CYTEC: [офиц. сайт]. URL: <http://www.cytec.com> (дата обращения: 18.03.2015).
13. Deraster R.L. Deracure curing agent DR. Product Datasheet, Finnester coating Oy. 3.11.2011.
14. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
15. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №10. С. 27–35.
16. Anjali, Sanjay Choudhry, Vijay Kumar. Effect of porosity on the mechanical strength of composite materials // International Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2012. V. 2. №3. P. 82–84.
17. Душин М.И., Коган Д.И., Хрульков А.В., Гусев Ю.А. Причины образования пористости в изделиях из полимерных композиционных материалов (обзор) // Композиты и наноструктуры. 2013. №3. С. 60–68.
18. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 834–839.
19. Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Влияние технологии подготовки препрега на свойства ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №9. С. 8–14.
20. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
21. Антюфеева Н.В., Комарова О.А., Павловский К.А., Алексашин В.М. Опыт применения калориметрического контроля реакционной способности препрега КМУ-11тр // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.03.2015).
22. Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Шимица Ю.Ю. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №6. С. 29–33.
23. Постнов В.И., Никитин К.Е., Бурхан О.Л., Петухов В.И., Орзаев В.Г. Исследование ультразвуковым методом структурных изменений в ПКМ в процессе формования полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 25–29.
24. Никитин К.Е., Бурхан О.Л., Постнов В.И., Петухов В.И. Лабораторная установка для исследования и отработки процессов формования ИПФ 2003 полимерных композиционных материалов ультразвуковым методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. №4. С. 38–41.