

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-114-124

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ МЕТОДОМ ДМА

Д.А. Мельников¹, А.А. Громова¹, Н.А. Городилова¹, А.Г. Загора¹

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

Аннотация. Рассмотрены различные стандарты определения температуры стеклования методом динамического механического анализа и зависимости динамического модуля упругости от температуры. Выбрано два эпоксидных связующих расплавленного типа с близкими значениями температуры стеклования, но различным характером снижения динамического модуля упругости при нагревании. Изготовлены образцы, проведены испытания на растяжение, после чего с использованием различных стандартов оценены полимерные матрицы и проведено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: динамический механический анализ, полимерный композиционный материал, температура стеклования, модуль упругости, связующее, матрица

Для цитирования: Мельников Д.А., Громова А.А., Городилова Н.А., Загора А.Г. Определение теплоустойкости эпоксидных матриц методом ДМА // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-114-124.

Scientific article

DETERMINATION OF HEAT RESISTANCE OF EPOXY MATERIXES BY DMA METHOD

D.A. Melnikov¹, A.A. Gromova¹, N.A. Gorodilova¹, A.G. Zagora¹

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

Annotation. Various standards for determining the glass transition temperature by dynamic mechanical analysis and the dependence of the dynamic modulus of elasticity on temperature are considered. Two melt-type epoxy binders with similar values of glass transition temperature, but different nature of the drop in the dynamic modulus of elasticity upon heating, were selected. Samples were made, a tensile test was carried out, after which the polymer matrices were evaluated using various standards and the results were compared.

Keywords: dynamic mechanical analysis, polymer composite material, glass transition temperature, elastic modulus, binding, matrix

For citation: Melnikov D.A., Gromova A.A., Gorodilova N.A., Zagora A.G. Determination of heat resistance of epoxy matrixes by DMA method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-114-124.

Введение

Значение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в современной промышленности, науке и технике достаточно трудно переоценить [1–4]. Они эксплуатируются во многих областях промышленности, причем основным типом используемых ПКМ являются композиты на основе термореактивных матриц.

Ускоренное развитие современной авиационной техники требует разработки новых композиционных материалов, способных работать в экстремальных условиях при воздействии повышенных температур. К подобным материалам относятся ПКМ на основе современных расплавных эпоксидных связующих. Данное направление успешно развивается как за рубежом, так и на территории Российской Федерации. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на основе расплавных эпоксидных связующих разработана широкая номенклатура препрегов, применяемых в изделиях авиационной техники.

Полимерные композиционные материалы должны обладать способностью сопротивляться воздействию внешних нагрузок, которые возникают в момент эксплуатации, и при этом не разрушаться. Волокнистые наполнители в ПКМ определяют механические свойства, а матрица сохраняет эти свойства при разных температурах. Когда матрицу нагревают, она переходит из стеклообразного в высокоэластическое состояние, а это в свою очередь влияет на механические свойства материала. В связи с этим термомеханические свойства определяют диапазон безопасной эксплуатации ПКМ и изделий из них. Для того чтобы изделия из ПКМ оставались жесткими при одновременном воздействии нагрузки и температуры, они должны иметь определенное значение теплостойкости [5–12]. Определить теплостойкость возможно с помощью температуры стеклования (точка T_g) [13], значение которой используют, когда необходимо определить область применения новых ПКМ, т. е. диапазон температур, при которых будет работать материал, а также при разработке технологических процессов изготовления и др. [14]. Температура стеклования указывает на предельную рабочую температуру полимерной матрицы в композиционном материале. Это граница перехода ее из стеклообразного состояния в высокоэластическое при нагревании. Наиболее часто ПКМ используют, когда полимерная матрица находится в стеклообразном состоянии, поэтому температура стеклования является одной из важных характеристик, определяющих максимальную температуру эксплуатации таких материалов.

Для определения температуры стеклования можно использовать температурную зависимость любого свойства, связанного с тепловым движением звеньев цепи полимера – например, изменение удельного объема, удельной теплоемкости, тангенса угла диэлектрических потерь, коэффициента диффузии, коэффициента газопроницаемости, величины деформации [15]. Наиболее распространенными и относительно простыми методами измерения температуры стеклования являются дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), термический механический анализ (ТМА) и динамический механический анализ (ДМА), которые чувствительны к переходу из стеклообразного в высокоэластическое состояние в приблизительном соотношении 1:10:100.

Существует большое количество публикаций, связанных со сравнительным определением температуры стеклования методами ДМА, ТМА и ДСК как на матрицах, так и на ПКМ. В работе [16] проведены сравнительные измерения температуры стеклования отвержденного связующего и ПКМ на его основе и установлено, что определяемое значение этой температуры зависит от используемого метода измерения. Однако наиболее широкое распространение для определения температуры стеклования в ПКМ на основе термореактивных матриц получил метод ДМА, который позволяет оценивать теплостойкость в поперечном сечении элементарного образца с учетом адгезии между волокном и матрицей. Методами ДМА определяют компоненты комплексных модулей упругости E или сдвига G при периодических (синусоидальных) изгибных или крутильных колебаниях стержней из ПКМ на частоте 10^{-1} – 10^3 Гц [15]. С помощью ДМА-анализаторов типа DMA 2980 в образцах ПКМ способом трехточечного изгиба возбуждают периодические деформации вида

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

где ε – деформация в момент времени t ; ε_0 – максимальная деформация; ω – круговая частота.

Величины модулей E' и E'' определяют комплексный динамический модуль упругости E материала, который представляют в виде

$$E = E' + iE''. \quad (2)$$

Действительная часть E' комплексного модуля упругости известна как динамический модуль упругости или модуль накопления, так как она соответствует изменению потенциальной энергии при периодических деформациях. Мнимую часть E'' называют модулем потерь, поскольку она связана с энергией, переходящей в тепло при колебаниях [15].

Плоский прямоугольный образец помещают в прибор для ДМА и подвергают его колебаниям с номинальной частотой 1 Гц и нагреву со скоростью 5 °С/мин. В целях сопоставления результатов для различных образцов используют одинаковую частоту нагружения и скорость нагрева. Температуру стеклования в методе ДМА определяют как температуру, при которой наблюдается значительное снижение значений динамического модуля упругости E' [15].

Для определения температуры стеклования методом ДМА существует ряд отечественных и зарубежных стандартов. Однако из-за того, что стеклование (застекловывание или расстекловывание) является релаксационным процессом, имеющим определенные временные границы, возникает проблема точного определения точки перехода. Например, в ГОСТ Р 56753–2015 (который является модифицированным по отношению к международному стандарту ИСО 6721-11:2012) температуру стеклования определяют как температуру точки перегиба на кривой модуля упругости в области перехода стеклования (рис. 1, точка 1).

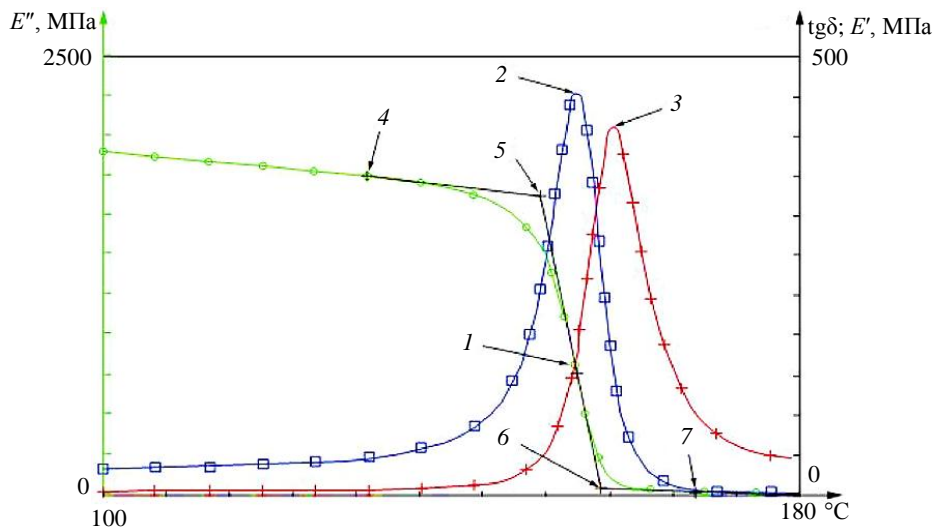


Рис. 1. Температурные зависимости изменения механических характеристик: 1 – точка перегиба на кривой модуля упругости; 2 – пик на кривой модуля потерь; 3 – пик на кривой тангенса угла механических потерь; 4 – начало перехода на кривой модуля упругости; 5 – экстраполированное начало перехода на кривой модуля упругости; 6 – экстраполированное окончание перехода на кривой модуля упругости; 7 – окончание перехода на кривой модуля упругости; E' – динамический модуль упругости; E'' – модуль потерь; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла механических потерь [15]

По ГОСТ Р 57739–2017 [17], модифицированному по отношению к стандарту ASTM D7028-07, и в стандарте ASTM E1640-09 температура стеклования определяется как экстраполированное начало перехода на кривой модуля упругости (рис. 2, точка T_g).

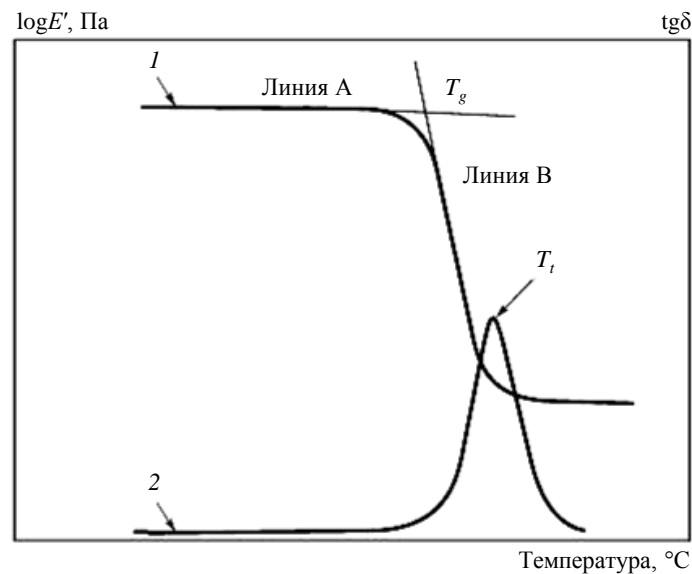


Рис. 2. Определение температуры стеклования (T_g) методом динамического механического анализа и пика тангенса угла механических потерь: 1 – график логарифма динамического модуля упругости E' ; 2 – график тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$; T_t – температура пика тангенса угла механических потерь [17]

Таким образом, значения температуры T_g , определенные по ГОСТ Р 57739–2017 и ГОСТ Р 56753–2015, будут отличаться. В ГОСТ Р 57739–2017 температура стеклования определяется как экстраполированное начало перехода на кривой модуля упругости и характеризует начало перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние образца, а в ГОСТ Р 56753–2015 температура стеклования определяется в точке перегиба на кривой модуля упругости и характеризует середину перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние образца. Далее в работе будет использована методика определения температуры T_g как экстраполированное начало перехода на кривой модуля упругости по ГОСТ Р 57739–2017.

Значения температуры T_g , определенные методом ДМА, широко используются при разработке новых полимерных связующих и ПКМ: они приводятся в технических описаниях (datasheet) зарубежных фирм-производителей композиционных материалов (Hexcel, Cytec, TenCate), применяются разработчиками для определения верхней границы диапазона температур эксплуатации ПКМ, по сохранению значений температуры T_g полимерной матрицы или ПКМ делаются выводы о работоспособности материала после длительного воздействия высоких температур/влажности.

Помимо различий в стандартах для определения температуры стеклования методом ДМА, накопленный опыт определения этой температуры в полимерных матрицах на основе отверждающихся синтетических смол и ПКМ на их основе позволяет выделить две основные температурные зависимости:

- равномерное снижение значений динамического модуля упругости при нагревании (рис. 3);
- незначительное снижение значений модуля упругости до начала расстекловывания с последующим резким падением после начала перехода на кривой модуля упругости (рис. 4).

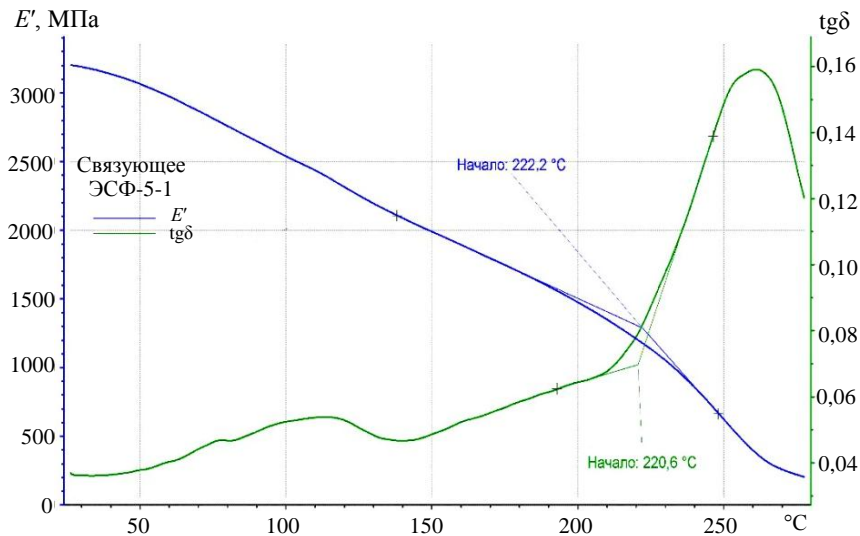


Рис. 3. Температурная зависимость равномерного снижения динамического модуля упругости при нагревании при частоте нагружения 1 Гц

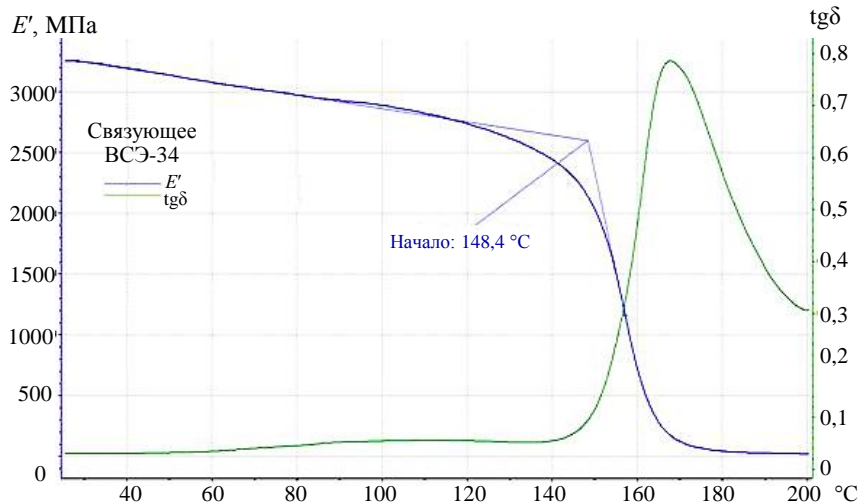


Рис. 4. Температурная зависимость незначительного снижения модуля упругости до начала расстекловывания с последующим резким падением после начала перехода на кривой модуля упругости при частоте нагружения 1 Гц

При столь различном характере снижения значений динамического модуля упругости при нагревании, определенная таким образом температура T_g не в полной мере отражает теплостойкие свойства полимерной матрицы и может ввести в заблуждение как разработчика, так и потребителя. Данные особенности поведения динамического модуля упругости связаны с химической и физической структурой полимера. Известно несколько факторов, обусловленных химической или физической структурой сетчатых полимеров, существенно влияющих на характер снижения значения модуля упругости при нагревании и их температуру T_g : молекулярная масса участка полимерной цепи между узлами сетки и частота узлов, жесткость или обратная ей величина – гибкость полимерных цепей, а также различные факторы, связанные со свободным объемом в структуре полимера и наличием петель и свободных концов в структуре полимерной сетки.

Цель данной работы – изучение зависимости механических характеристик от динамического модуля упругости, определяемого методом ДМА, для эпоксидных матриц с различным характером снижения значений E' при нагревании.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны два максимально аналогичных эпоксидных связующих расплавного типа, пригодных для препреговой технологии переработки с близкими значениями температуры T_g , но с различным характером снижения значений динамического модуля упругости при нагревании. Первое связующее марки ВСЭ-34 (ТУ 1-595-12-1424–2014) применяется для изготовления ПКМ, рекомендованных к эксплуатации в интервале температур от -60 до $+100$ °С длительно (в течение 1000 ч). Второе связующее – экспериментальная композиция под условной маркой НКЛ-23 – рекомендуется на рабочую температуру от -60 до $+120$ °С в течение 2000 ч.

В качестве метода оценки температуры T_g для полимерных матриц применяли метод ДМА по ГОСТ Р 57739–2017 (ASTM E1640-09) на термомеханическом динамическом анализаторе DMA 242С.

Испытания при растяжении проводили по ГОСТ 11262–2017 на универсальной разрывной машине, предназначенной для квазистатических испытаний образцов материалов, с номинальной силой 5 кН, электромеханическим приводом и тензорезисторным датчиком силы, размещенным на траверсе.

Образцы изготавливали в блок-форме (рис. 5) с последующей механической обработкой (подробно преимущества метода изготовления подобных образцов для высоковязких расплавных связующих описаны в работе [18]). Все образцы изготавливали из полимерных блоков, отлитых и отвержденных за одну технологическую операцию из одной партии для каждого связующего. Для связующих ВСЭ-34 и НКЛ-23 разработаны режимы заливки и отверждения в блок-форме, а затем по ним изготовлены полимерные блоки, из которых на отрезном станке Brilliant с водяным охлаждением нарезаны образцы.

Выбранный метод изготовления позволил получить бездефектные образцы из полимерных матриц связующих ВСЭ-34 и НКЛ-23 с отклонениями по геометрическим размерам, не превышающими 0,005 мм. Качество изготовления таких образцов является важным аспектом в получении экспериментальных данных для выполнения целей, поставленных в данной работе.

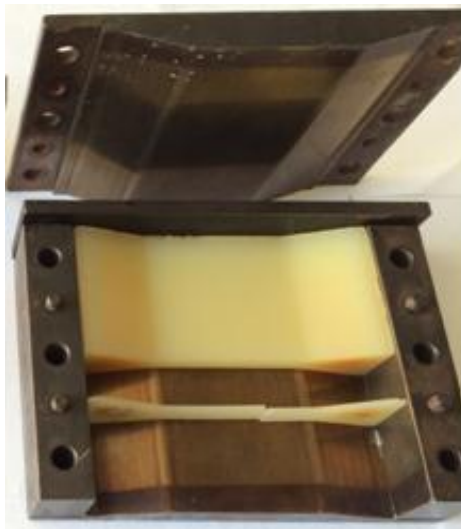


Рис. 5. Блок-форма для изготовления образцов из полимерных связующих

Испытания при растяжении проводили на образцах в форме лопаток в соответствии с ГОСТ 11262–80, определение температуры стеклования – на плоских образцах размером 50×10×2 мм.

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

Результаты и обсуждение

По ГОСТ Р 57739–2017 (ASTM E1640-09) проведены испытания образцов с помощью метода ДМА, полученные данные представлены на рис. 6.

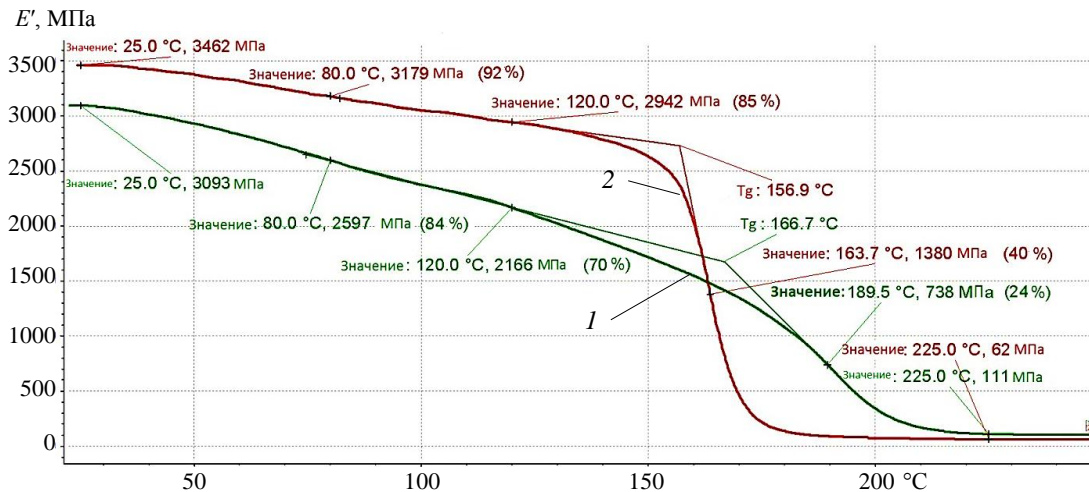


Рис. 6. Кривые динамического механического анализа для связующих НКЛ-23 (1) и ВСЭ-34 (2) при скорости нагрева 5 °С/мин

Видно, что определяемая таким образом температура стеклования для связующего НКЛ-23 на 10 °С больше, чем у связующего ВСЭ-34, что, по сути, могло бы указывать на то, что матрица связующего НКЛ-23 обладает большей теплостойкостью. Однако, если принять значения динамического модуля упругости при комнатной температуре как исходные, то можно отметить, что при температуре T_g сохранение значения E' для связующего НКЛ-23 составляет 43 %, а для связующего ВСЭ-34: 69 %. Такая же тенденция наблюдается, например, при температуре 120 °С – сохранение значений динамического модуля упругости составило для связующего НКЛ-23: 70 %, а для связующего ВСЭ-34: 85 %. Подобная картина наблюдается вплоть до температуры T_g связующего ВСЭ-34, после которой динамический модуль упругости резко снижается. Сравнение полученных значений экстраполированного начала перехода с точкой перегиба на кривой приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение значений экстраполированного начала перехода с точкой перегиба на кривой для полимерных матриц ВСЭ-34 и НКЛ-23

Полимерная матрица	ВСЭ-34	НКЛ-23
Температура стеклования по ГОСТ Р 56753–2015 (ISO 6721-11:2012), определяемая как температура точки перегиба на кривой модуля упругости в области перехода к стеклованию, °С	164	189
Температура стеклования по ГОСТ Р 57739–2017 (ASTM D7028-07) и ASTM E1640-09, определяемая как температура экстраполированного начала перехода на кривой модуля упругости, °С	157	167

Температура стеклования, определяемая по ГОСТ Р 56753–2015, больше, чем температура стеклования, определяемая по ГОСТ Р 57739–2017, на 7 и 22 °С для связующих ВСЭ-34 и НКЛ-23 соответственно. Из полученных данных можно сделать вывод, что разница в определяемой температуре стеклования в зависимости от стандарта зависит от характера снижения динамического модуля упругости.

Для более наглядной оценки снижения динамического модуля упругости при нагревании построены температурные зависимости (рис. 7).

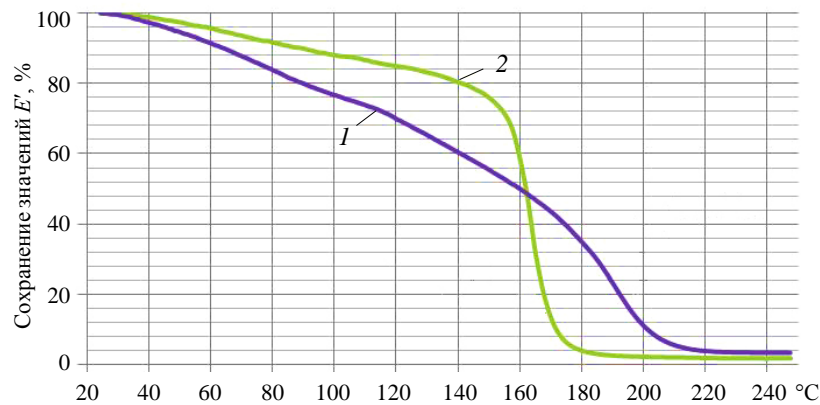


Рис. 7. Сохранение значений модуля упругости при нагревании со скоростью 5 °С/мин для связующих НКЛ-23 (1) и ВСЭ-34 (2)

Температурные зависимости снижения динамического модуля упругости E' с высокой степенью достоверности отражают теплостойкие характеристики полимерных матриц и позволяют прогнозировать упруго-прочностные свойства полимерных матриц при определении температуры эксплуатации.

Для проверки полученных данных о характере снижения значений динамического модуля упругости проведены статические испытания на определение модуля упругости и прочности при растяжении при температуре 20 и 120 °С. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Термомеханические свойства образцов связующих ВСЭ-34 и НКЛ-23 при различных температурах (приведены средние значения характеристик по пяти образцам, коэффициент вариации не превышал 5 %)

Связующее	Температура стеклования T_g , °C	Динамический модуль упругости, ГПа			Модуль упругости при растяжении, ГПа		Прочность при растяжении, МПа	
		при температуре, °C						
		T_g	25	120	25	120	25	120
ВСЭ-34	157	2,4	3,5	2,9	3,4	2,9	75	45,5
НКЛ-23	167	1,3	3,1	2,2	3,0	2,2	79	41,6

Модули упругости, определяемые при растяжении для связующих ВСЭ-34 и НКЛ-23, практически соответствуют динамическим модулям упругости, определяемым методом ДМА (скорость нагрева 5 °С/мин), как при 25, так и при 120 °С (рис. 8). Сохранение значения модуля упругости при растяжении при 120 °С для связующего ВСЭ-34 составило 85 %, а для связующего НКЛ-23: 73 %. Сохранение прочности при растяжении при 120 °С для связующего ВСЭ-34 составило 61 %, а для связующего НКЛ-23: 53 %. Полученные значения характеризуют теплостойкость матрицы ВСЭ-34 при 120 °С выше, чем аналогичное свойство матрицы НКЛ-23 (по абсолютным значениям и сохранению значений модуля упругости при нагревании до 120 °С), при том,

что при определении температур стеклования матрица НКЛ-23 будет считаться более теплостойкой, так как ее температура стеклования больше, чем у матрицы ВСЭ-34 на 10 °С. Полученные результаты испытаний позволяют расширить возможности применения метода ДМА для определения теплостойких характеристик полимерных матриц и ПКМ на их основе, что позволит сократить объем испытаний и сроки разработки новых полимерных матриц.

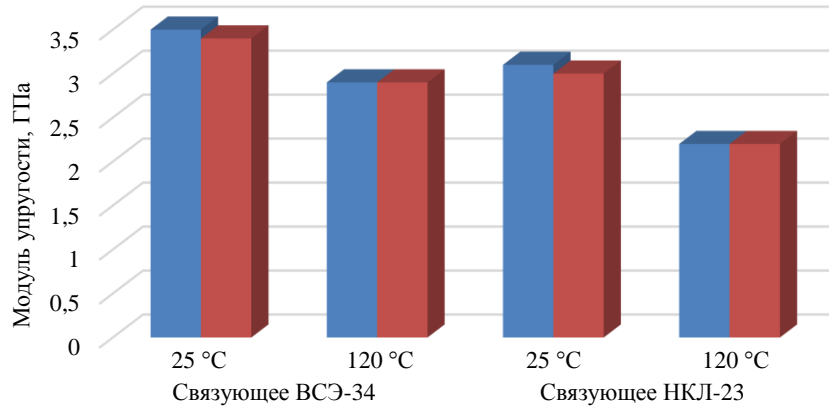


Рис. 8. Сравнение динамического модуля упругости E' (■) и модуля упругости при растяжении E (■) матриц на основе связующих ВСЭ-34 и НКЛ-23

Заключения

Результаты проведенной работы показывают, что получившая широкое распространение характеристика – температура стеклования T_g , определенная методом ДМА, в некоторых случаях может вводить в заблуждение потребителя или разработчика материала. При оценке этой характеристики важной особенностью является методика (или стандарт), по которой проводят определение температуры T_g .

Для более детальной оценки теплостойких характеристик полимерных связующих необходимо анализировать зависимость снижения динамического модуля упругости от температуры. Данный подход позволит более точно прогнозировать теплостойкие характеристики ПКМ еще на этапе разработки полимерного связующего.

Установлено, что значения динамического модуля упругости эпоксидных матриц, определяемые методом ДМА при номинальной частоте 1 Гц и скорости нагрева 5 °С/мин, близки по значению к значениям модуля упругости эпоксидных матриц, определяемых при испытании на растяжение.

Авторский коллектив продолжит работу по определению значений динамического модуля упругости E' методом ДМА на образцах ПКМ с последующим сравнением их со значениями модуля упругости при растяжении, а также по оценке длительного влияния внешних воздействующих факторов на определяемый методом ДМА характер снижения динамического модуля упругости E' .

Список источников

1. Блазнов А.Н., Атясова Е.В., Самойленко В.В. Анализ методов термомеханических испытаний композитных материалов и сравнение результатов // Южно-Сибирский научный вестник. 2017. № 1 (17). С. 54–69.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5-6. С. 40–44.
3. Создание термостойких полимерных композитов – одно из приоритетных направлений национального материаловедения // НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: [официальный сайт] URL: <https://viam.ru/news/2734> (дата обращения: 13.01.2023).
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.

5. Пичугина Е.В. Теплостойкость и методы ее изучения для полимерных материалов // Материалы XV Междунар. студенческой науч. конф. «Студенческий научный форум». 2020. № 9 (4). Ст. 03. URL: <https://scienceforum.ru> (дата обращения: 17.04.2023).
6. Способ и устройство для определения теплостойкости полимерных композиционных материалов: пат. 2651617 Рос. Федерация; заявл. 24.08.17; опубл. 23.04.18.
7. Атясова Е.В. Оптимизация рецептурно-технологических параметров, обеспечивающих максимальную теплостойкость полимерных композитов, определяемую усовершенствованными методами термомеханических испытаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 2016. С. 7–11.
8. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
9. 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.
10. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
11. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
12. Перепечко И.И. Введение в физику полимеров. М.: Химия, 1978. С. 50–70.
13. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Рахматуллин А.Э., Мантусова О.Ю., Никитин Е.К. Исследование влияния процессов постотверждения на температуру стеклования полимерно-композиционных материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 3-1 (34). С. 275–280.
14. Хасков М.А. О специфике определения температуры стеклования влагонасыщенных полимерных композиционных материалов методом динамического механического анализа // Западская лаборатория. Диагностика материалов, 2016. № 82 (1). С. 25–31.
15. ГОСТ Р 56753–2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 11. Температура стеклования. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
16. Старцев О.В., Каблов Е.Н., Махоньков А.Ю. Закономерности α -перехода эпоксидных связующих композиционных материалов по данным динамического механического анализа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение, 2011. № SP2. С. 104–113.
17. ГОСТ Р 57739–2017. Композиты полимерные. Определение температуры стеклования методом динамического механического анализа стеклования. М.: Стандартинформ, 2017. 23 с.
18. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносов А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120 // Труды ВИАМ. 2017. № 1 (49). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.01.2023). DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8.

References

1. Blaznov A.N., Atyasova E.V., Samoilenko V.V. Analysis of methods of thermomechanical testing of composite materials and comparison of results. South Siberian Scientific Bulletin. 2017, no. 1 (17), pp. 54–69.
2. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. Marketing and sales director. 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
3. *Creation of heat-resistant polymer composites – one of the priority areas of national materials science*. Available at: <https://viam.ru/news/2734> (accessed: January 13, 2023).
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2020 vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
5. Pichugina E.V. Heat resistance and methods of its study for polymeric materials. *Proceedings of the XV Intern. student scientific conf. "Student Scientific Forum"*, 2020, no. 9 (4), art. 03. Available at: <https://scienceforum.ru> (accessed: April 17, 2023).

6. *Method and device for determining the heat resistance of polymer composite materials*: pat. 2651617 Rus. Federation; appl. 24.08.17; publ. 23.04.18.
7. Atyasova E.V. *Optimization of recipe-technological parameters that ensure the maximum heat resistance of polymer composites, determined by improved methods of thermomechanical testing*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Biysk, 2016, pp. 7–11.
8. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: February 13, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
9. 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.
10. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 08, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
11. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
12. Perepechko I.I. *Introduction to polymer physics*. Moscow: Khimiya, 1978, pp. 50–70.
13. Postnov V.I., Burkhan O.L., Rakhmatullin A.E., Mantusova O.Yu., Nikitin E.K. Investigation of the influence of post-hardening processes on the glass transition temperature of polymer-composite materials. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2012, no. 3-1 (34), pp. 275–280.
14. Khaskov M.A. On the specifics of determining the glass transition temperature of moisture-saturated polymer composite materials by the method of dynamic mechanical analysis. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, no. 82 (1), pp. 25–31.
15. State Standard R 56753–2015. *Plastics. Determination of mechanical properties under dynamic loading. Part 11: Glass transition temperature*. Moscow: Standartinform, 2016, 12 p.
16. Startsev O.V., Kablov E.N., Makhonkov A.Yu. Patterns of the α -transition of epoxy binders of composite materials according to dynamic mechanical analysis. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2011, no. SP2, pp. 104–113.
17. State Standard R 57739–2017. *Polymer composites. Determination of glass transition temperature by dynamic mechanical analysis of glass transition*. Moscow: Standartinform, 2017, 23 p.
18. Melnikov D.A., Gromova A.A., Raskutin A.E., Kurnosov A.O. Theoretical calculation and experimental determination of modulus of elasticity and strength of GRP VPS-53/120. *Trudy VIAM*, 2017, no. 1 (49), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8.

Информация об авторах

Мельников Денис Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Громова Анна Анатольевна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Городилова Наталья Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Загора Артем Григорьевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Denis A. Melnikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna A. Gromova, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nataliya A. Gorodilova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem G. Zagora, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.05.2023.
The article was submitted 12.05.2023; approved and accepted for publication after reviewing 18.05.2023.