

чений. Это обусловлено снижением температуры горения угольных частиц из-за пониженного содержания кислорода в рабочей ячейке (по сравнению с атмосферным) в результате газовой выделения при пиролизе угольного порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин Л. Г., Менделеева О. Л., Сметкин В. А. Теория и технология химико-термической обработки. — М.: Новое знание, 2010. — 304 с.
2. Домбровский Ю. М., Степанов М. С. Микродуговая цементация стальных изделий в порошковых средах / Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12. С. 25 – 29.
3. Химия и переработка угля / В. Г. Липович, Г. А. Калабин, И. В. Калечиц и др. Под общ. ред. В. Г. Липовича. — М.: Химия, 1988. — 336 с.
4. Глушенко И. М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых. — М.: Metallurgiya, 1990. — 296 с.
5. Химическая технология твердых горючих ископаемых / Под ред. Г. Н. Макарова, Г. Д. Харламповича. — М.: Химия, 1986. — 496 с.
6. Девисилов В. А., Дроздова Т. И., Тимофеева С. С. Теория горения и взрыва: практикум: учебное пособие / Под общ. ред. В. А. Девисилова. — М.: ФОРУМ, 2012. — 352 с.
7. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
8. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.

REFERENCES

1. Voroshnin L. G., Mendeleeva O. L., Smetkin V. A. Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki [Theory and technology of chemical heat treatment]. — Moscow: Novoe znanie, 2010. — 304 p. [in Russian].
2. Dombrovskiy Yu. M., Stepanov M. S. Mikrodrugovaya tsementatsiya stal'nykh izdelii v poroshkovykh sredakh [Microarc carburizing of steel products in powder environments] / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2013. N 12. P. 25 – 29 [in Russian].
3. Lipovich V. G., Kalabin G. A., Kalechic I. V., et al. Khimiya i pererabotka uglya [Chemistry and processing of coal]. — Moscow: Khimiya, 1988. — 336 p. [in Russian].
4. Glushchenko I. M. Teoreticheskie osnovy tekhnologii goryuchikh iskopayemykh [Theoretical bases of technology of combustible minerals]. — Moscow: Metallurgiya, 1990. — 296 p. [in Russian].
5. Makarov G. N., Kharlampovich G. D. (eds.). Khimicheskaya tekhnologiya tverdykh goryuchikh iskopayemykh [Chemical technology of solid fuels]. — Moscow: Khimiya, 1986 — 496 p. [in Russian].
6. Devisilov V. A., Drozdova T. I., Timofeeva S. S. Teoriya goreniya i vzryva: praktikum: uchebnoe posobie [Theory of combustion and explosion: workshop: tutorial]. — Moscow: FORUM, 2012. — 352 p. [in Russian].
7. Pomerantsev V. V., Aref'ev K. M., Akhmedov D. B., et al. Osnovy prakticheskoi teorii goreniya: uchebnoe posobie dlya vuzov [Fundamentals of practical combustion theory]. — Leningrad: Énergoatomizdat, 1986. — 312 p. [in Russian].
8. Babii V. I., Kuvaev Yu. F. Gorenie ugol'noi pyli i raschet pyleugol'nogo fakela [Combustion of coal dust and calculation of coal-fired torch]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1986. — 208 p. [in Russian].

УДК 54.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ ВЛАЖНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© А. А. Шимкин, М. А. Хасков¹

Статья поступила 19 декабря 2014 г.

Определение температуры стеклования влажных образцов осложнено десорбцией влаги в процессе измерения, что приводит к завышенным результатам, особенно при низких скоростях нагревания. Исследование возможности устранения этой проблемы при использовании методики экстраполяции, описанной в ISO 6721–11, показало ограниченную применимость метода, поскольку при определенных степенях влагонасыщения линейная зависимость температуры стеклования от скорости нагревания нарушается. Отмечено, что в качестве характеристической температуры стеклования вместо точки перегиба на кривой динамического модуля упругости может использоваться максимум модуля механических потерь, при этом наблюдается линейная зависимость экстраполированной температуры стеклования от времени кипячения образцов.

Ключевые слова: влагонасыщение; динамический механический анализ; композиционные материалы; модуль потерь; температура стеклования.

В последние годы в элементах конструкций металлические сплавы все чаще заменяют на полимерные композиционные материалы (ПКМ), что позволяет уменьшить массу изделий и снизить стоимость их обслуживания [1 – 4]. Кроме того, ПКМ все чаще при-

меняют при ремонте металлических и бетонных конструкций [5, 6]. В связи с тем, что сроки эксплуатации многих сооружений исчисляются десятками лет, к настоящему моменту опыт длительного использования в реальных условиях конструкций из ПКМ накоплен недостаточный [7 – 9]. Это стимулирует разработку методов ускоренного испытания материалов на термо-влажностное и климатическое старение, направлен-

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия;
e-mail: alexshimkin@gmail.com; shimkinaa@viam.ru

ных на определение сроков эксплуатации изделий [10, 11].

Один из наиболее значимых факторов, влияющих на свойства полимерных материалов, — влагонасыщение [12–14], приводящее, в частности, к уменьшению температуры стеклования — важнейшего показателя, во многом определяющего рабочую температуру материала [15, 16]. При этом точное определение температуры стеклования для влажных образцов представляет значительные трудности. Поскольку измерение проводится при нагревании, то часть воды десорбируется [17–19]. Однако подавляющее большинство исследований не учитывает процесс десорбции воды, который оказывает на результаты значительное влияние [17].

В международном стандарте ISO 6721–11 предложен способ определения температуры стеклования методом динамического механического анализа (ДМА), заключающимся в экстраполяции данных, полученных при различных скоростях нагревания, к нулевому значению скорости нагревания. Это позволяет свести к минимуму влияние температурного лага (получения завышенных результатов из-за отставания температуры образца от температуры печи) на результаты измерения [20]. В настоящей работе исследована возможность использования подхода, предложенного в стандарте ISO 6721–11, для определения температуры стеклования влажных образцов.

Подробности подготовки образцов изложены в работе [17], посвященной исследованию влияния влагонасыщения на значения температуры стеклования, определяемые классическими способами: по экстраполированному началу падения динамического модуля упругости и максимуму тангенса угла механических потерь [21].

В качестве объекта исследования выбрали экспериментальное эпоксидное связующее, из которого изготовили отливки длиной $50,5 \pm 0,1$, шириной $10,72 \pm 0,15$ и толщиной $5,82 \pm 0,15$ мм. Влагонасыщение проводили при кипячении образцов в дистиллированной воде в течение заданных промежутков времени [22]. После извлечения из воды образцы промокивали ватой и охлаждали до комнатной температуры в герметичном боксе. Измерения проводили на приборе динамического механического анализа Netzsch DMA 242 C (Германия) с использованием держателя образца для трехточечного изгиба с базовой длиной 40 мм в режиме постоянной амплитуды (14 мкм). Частота приложения нагрузки составляла 1 Гц. Камеру образца продували синтетическим воздухом со скоростью 80 мл/мин. Согласно стандарту ISO 6721–11 температурную калибровку прибора не проводили.

Влияние десорбции влаги в процессе измерения на температуру стеклования должно быть наиболее выражено для материалов, характеризующихся температурой стеклования выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. В связи с этим в качестве объекта исследований выбрали образцы отвер-

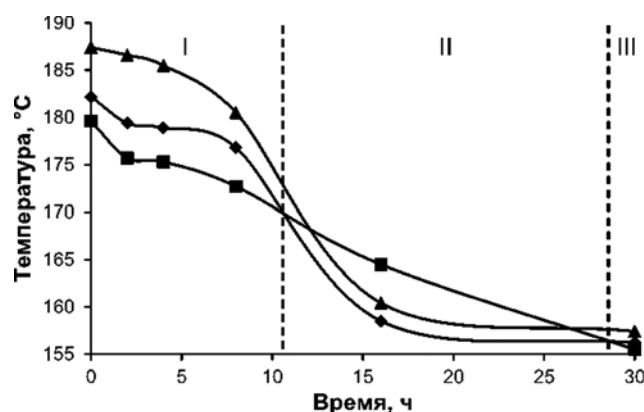


Рис. 1. Зависимости температуры в точке перегиба на кривой динамического модуля упругости от времени кипячения образцов (скорость нагревания, $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$: ■ — 3, ◆ — 5, ▲ — 10)

жденного эпоксидного связующего с температурой стеклования в сухом состоянии около $170\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 приведены зависимости температуры в точке перегиба на кривой динамического модуля упругости T_g (температуры стеклования, согласно стандарту ISO 6721–11) от времени кипячения образцов в воде при различных скоростях нагревания. На начальном этапе влагонасыщения (область I) T_g увеличивается с ростом скорости нагревания, что обусловлено завышением ее значений из-за того, что термopара, расположенная рядом с образцом, нагревается быстрее образца (температурный лаг). Затем (область II) зависимость T_g от скорости нагревания изменяется. Это можно объяснить взаимным влиянием трех факторов: температурного лага, завышающего значения T_g , пластифицирующего действия сорбированной воды и ее частичной десорбции в процессе нагревания. При этом десорбция влаги максимальна при самой низкой скорости нагревания ($3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), что также ведет к завышению температуры стеклования. И, наконец, в области III наблюдается первоначальная зависимость вследствие неполной десорбции влаги (даже при нагревании с наиболее низкой скоростью). Положение зон, по-видимому, непостоянно и зависит как от природы анализируемого материала, так и от характеристик используемого оборудования и условий измерения.

На рис. 2 приведены зависимости T_g от скорости нагревания. Обращает на себя внимание изменение угла наклона аппроксимирующей прямой при изменении содержания влаги в образце, что делает некорректным использование ускоренной методики определения температуры стеклования влажных образцов, подразумевающей постоянство угла наклона калибровочного графика. Отметим также значительное снижение коэффициента детерминации для линейной регрессии R^2 при промежуточных степенях влагонасыщения (см. таблицу), что, по-видимому, связано с влиянием десорбции влаги в процессе нагревания.

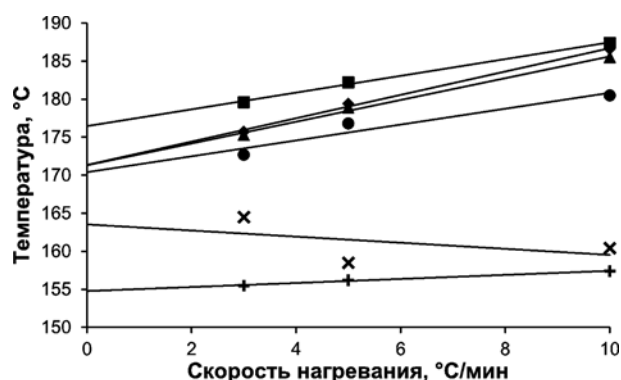


Рис. 2. Зависимости температуры в точке перегиба на кривой динамического модуля упругости от скорости нагрева для образцов с различной степенью влагонасыщения: ■ — сухие образцы; ◆, ▲, ●, ×, + соответствуют 2, 4, 8, 16 и 30 ч кипячения

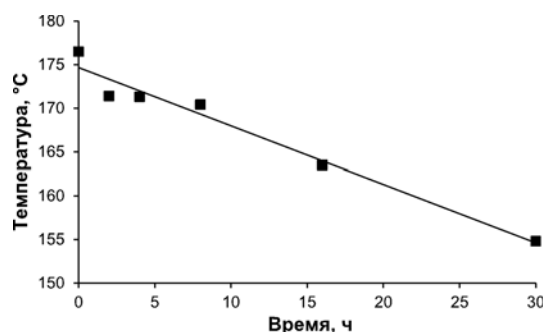


Рис. 3. Зависимость экстраполированной температуры стеклования от времени кипячения

Полученные данные позволяют говорить о том, что предложенная в ISO 6721–11 методика имеет ограничения при анализе влажных образцов, поскольку линейная зависимость T_g от скорости нагрева

Значения температуры (°C) стеклования отвержденного связующего в процессе влагонасыщения и коэффициента детерминации для линейной регрессии R^2

Время кипячения в воде, ч	Скорость нагревания, °C/мин			$T_{g(0)}$	R^2
	3	5	10		
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости T_g					
0	179,6	182,2	187,4	176,5	1,00
2	175,7	179,4	186,6	171,4	1,00
4	175,3	178,9	185,5	171,3	0,99
8	172,7	176,8	180,5	170,4	0,93
16	164,5	158,5	160,4	163,5	0,22
30	155,5	156,2	157,4	154,8	0,99
Максимум модуля механических потерь T_{loss}					
0	176,3	177,9	184,9	172,1	0,99
2	172,2	173,4	177,5	169,8	0,99
4	168,3	170,5	172,3	167,2	0,91
8	162,9	161,2	159,7	163,8	0,92
16	157,9	150,6	154,7	155,7	0,04
30	147,3	150,8	154,5	145,0	0,95

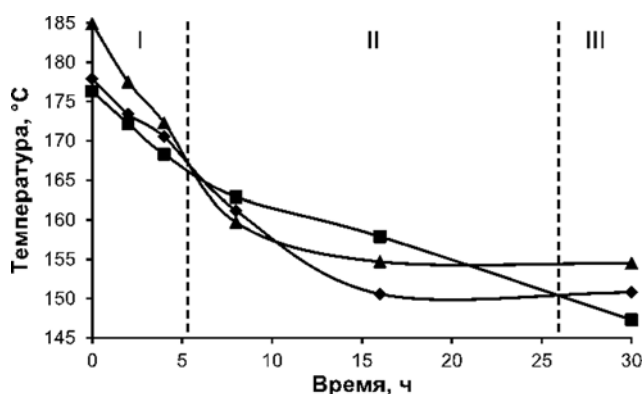


Рис. 4. Зависимости температуры максимума на кривой модуля потерь от времени кипячения (скорость нагрева, °C/мин: ■ — 3, ◆ — 5, ▲ — 10)

при определенных степенях влагонасыщения нарушается. Использование повышенных скоростей нагрева (например, 5, 10 и 20 °C/мин) может улучшить результаты, поскольку в этом случае возможен возврат в область линейной зависимости T_g от скорости нагрева.

Принципиальное отличие ISO 6721–11 от других стандартов определения температуры стеклования методом ДМА заключается в устранении влияния температурного лага экстраполяцией данных, полученных при различных скоростях нагрева, на нулевую скорость нагрева. Получаемое при этом значение $T_{g(0)}$ не зависит от особенностей оборудования и характеризует исключительно природу материала.

Если рассмотреть зависимость экстраполированной температуры стеклования $T_{g(0)}$ от времени кипячения образцов (см. таблицу, рис. 3), то можно заметить, что она близка к линейной ($R^2 = 0,97$). Наибольшее отклонение наблюдается для образцов с низким влагоудержанием.

Ранее было предложено использовать в качестве характеристической температуры стеклования вместо точки перегиба на кривой динамического модуля упругости максимум модуля потерь, поскольку это повышает воспроизводимость результатов измерений [23]. На рис. 4 приведены зависимости температуры максимума на кривой модуля потерь T_{loss} от времени кипячения, которые аналогичны полученным для точек перегиба на кривых динамического модуля упругости. Можно заметить, что область II (см. рис. 4), характеризующаяся аномальной зависимостью T_{loss} от скорости нагрева, приурочена к меньшему уровню влагонасыщения образцов, чем в случае T_g (см. рис. 1).

Максимум модуля потерь гораздо сильнее зависит от содержания влаги при малом времени кипячения (до 5 ч) по сравнению с точкой перегиба на кривой динамического модуля упругости. Так, если для образца после 4 ч кипячения значение T_g , измеренное при 10 °C/мин, понижается на 1,9 °C (1,0 %), то аналогичное значение T_{loss} изменяется на 12,6 °C (6,8 %).

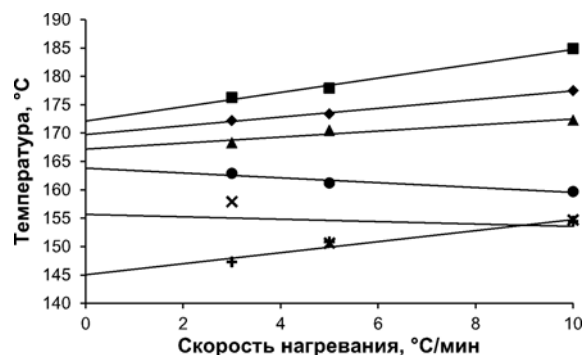


Рис. 5. Зависимости температуры максимума на кривой модуля потерь от скорости нагревания для образцов с различной степенью влагонасыщения: ■ — сухие образцы; ◆, ▲, ●, ×, + соответственно 2, 4, 8, 16 и 30 ч кипячения

Зависимости T_{loss} от скорости нагревания (рис. 5) аналогичны зависимостям T_g (см. рис. 2). Угол наклона аппроксимирующей прямой зависит от степени влагонасыщения образцов. При промежуточных степенях влагонасыщения коэффициент детерминации для линейной регрессии также понижен (см. таблицу).

Зависимость экстраполированной температуры стеклования $T_{g(0)}^{\text{loss}}$ от времени кипячения в этом случае оказывается еще ближе к линейной ($R^2 = 0,99$) (рис. 6).

Таким образом, установлено, что описанный в стандарте ISO 6721–11 метод экстраполяции ограниченно применим для анализа влажных образцов, поскольку при некоторых степенях влагонасыщения линейная зависимость температуры стеклования от скорости нагревания нарушается. Кроме того, угол наклона аппроксимирующей прямой зависит от степени влагонасыщения, что делает некорректным использование методики контроля качества (стандарт ISO 6721–11) для сравнения образцов с различным содержанием влаги. Показано, что в качестве характеристической температуры стеклования вместо точки перегиба на кривой динамического модуля упругости может использоваться максимум модуля механических потерь. При этом экстраполированная температура стеклования $T_{g(0)}^{\text{loss}}$ линейно зависит от времени кипячения образцов.

ЛИТЕРАТУРА

- Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications / Bai J. (ed.). — Woodhead Publishing: Philadelphia, 2013. — 906 p.
- Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction — state-of-the-art review / J. Compos. Constr. 2002. Vol. 6. N 2. P. 73–87.
- Власенко Ф. С., Раскутин А. Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях / Труды ВИАМ. 2013. № 8. Ст. 3.
- Чурсова Л. В., Ким М. А., Панина Н. Н., Швецев Е. П. Наномодифицированное эпоксидное связующее для строительной индустрии / Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 40–47.

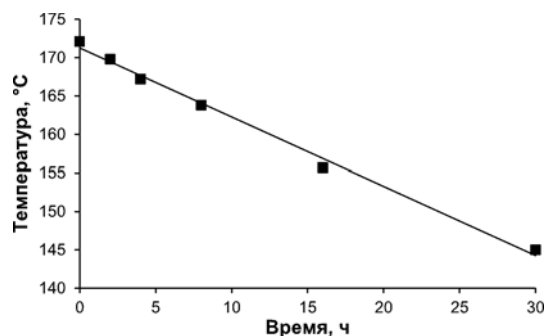


Рис. 6. Зависимость экстраполированной температуры стеклования, полученной из максимумов на кривых модуля потерь, от времени кипячения

- Mosallam A. S., Bayraktar A., Elmikawi M., et al. Polymer composites in construction: an overview / SOJ Mater. Sci. Eng. 2013. Vol. 2. N 1. P. 1–25.
- El-Maaddawy T. A. Mechanically fastened composites for retrofitting corrosion-damaged reinforced-concrete beams: experimental investigation / J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. N 2. P. 04013041-1–04013041-9.
- Zaman A., Gutub S. A., Wafa M. A. A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector / J. Reinf. Plast. Compos. 2013. Vol. 32. N 24. P. 1966–1988.
- Ерофеев В. Т., Мышкин А. В., Каблов Е. Н. и др. Стойкость полимерных композитов на основе полиэфиракрилатной смолы в условиях влажного морского климата / Региональная архитектура и строительство. 2014. № 3. С. 5–12.
- Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Деформация и разрушение материалов. 2010. № 11. С. 19–27.
- Кириллов В. Н., Старцев О. В., Ефимов В. А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 412–423.
- Кириллов В. Н., Вапиров Ю. М., Дрозд Е. А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 31–38.
- Ефимов В. А., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г., Кириллов В. Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях / Труды ВИАМ. 2013. № 1. Ст. 5.
- Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механических нагрузок на структуру и механические свойства ПКМ / Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4. С. 41–45.
- 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. 34–41.
- Энциклопедия полимеров / Под ред. В. А. Кабанова. — М.: Советская энциклопедия, 1977. — 498 с.
- Barbero E. J. Introduction to composite materials design. Second edition. — Boca Raton: CRC Press, 2010.
- Хасков М. А. О специфике определения температуры стеклования влагонасыщенных полимерных композиционных материалов методом динамического механического анализа / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 1. С. 25–31.
- Филистович Д. В., Старцев О. В., Кузнецов А. А. и др. Влияние влаги на анизотропию динамического модуля сдвига стеклопластиков / Доклады академии наук. 2003. Т. 390. № 5. С. 618–621.
- Sideridou I., Achillas D. S., Kyrikou E. Thermal expansion characteristics of light-cured dental resins and resin composites / Biomaterials. 2004. Vol. 25. N 15. P. 3087–3097.
- ISO 6721–11:2012. Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 11: Glass transition temperature.
- ASTM D 7028–07e1. Standard test method for glass transition temperature (DMA T_g) of polymer matrix composites by dynamic mechanical analysis (DMA).

22. ASTM D570–98(2010)e1. Standard test method for water absorption of plastics.
23. **Шимкин А. А.** Влияние продувочного газа на значение температуры стеклования / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 11. С. 40 – 43.

REFERENCES

1. **Bai J.** (ed.). Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. — Woodhead Publishing: Philadelphia, 2013. — 906 p.
2. **Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., et al.** Fiber-reinforced polymer composites for construction — state-of-the-art review / J. Compos. Constr. 2002. Vol. 6. N 2. P. 73 – 87.
3. **Vlasenko F. S., Raskutin A. E.** Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v stroitel'nykh konstruktivnykh [The use of polymer composite materials in structures] / Trudy VIAM. 2013. N 8. P. 3 [in Russian].
4. **Chursova L. V., Kim M. A., Panina N. N., Shvetsov E. P.** Nanomodifitsirovannoe époksidnoe svyazuyushchee dlya stroitel'noi industrii [Nanomodified epoxy binder for the construction industry] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 1. P. 40 – 47.
5. **Mosallam A. S., Bayraktar A., Elmikawi M., et al.** Polymer composites in construction: an overview / SOJ Mater. Sci. Eng. 2013. Vol. 2. N 1. P. 1 – 25.
6. **El-Maaddawy T. A.** Mechanically fastened composites for retrofitting corrosion-damaged reinforced-concrete beams: experimental investigation / J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. N 2. P. 04013041-1 – 04013041-9.
7. **Zaman A., Gutub S. A., Wafa M. A.** A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector / J. Reinf. Plast. Compos. 2013. Vol. 32. N 24. P. 1966 – 1988.
8. **Erofeev V. T., Myshkin A. V., Kablov E. N. i dr.** Stoikost' polimernykh kompozitov na osnove poliéfirakrilatnoi smoly v usloviyakh vlazhnogo morskogo klimata [Persistence of polymer-based composites based on polyester acrylate resin in a humid maritime climate] / Regional. Arkhitekt. Stroitel. 2014. N 3. P. 5 – 12 [in Russian].
9. **Kablov E. N., Startsev O. V., Krotov A. S., Kirillov V. N.** Klimaticheskoe starenie kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya. I. Mekhanizmy stareniya [Climatic aging of aviation composite materials. I. Mechanisms of aging] / Deform. Razrush. Mater. 2010. N 11. P. 19 – 27 [in Russian].
10. **Kirillov V. N., Startsev O. V., Efimov V. A.** Klimaticheskaya stoikost' i povrezhdaemost' polimernykh kompozitsionnykh materialov, problemy i puti resheniya [Weather resistance and damaging of polymer composite materials, problems and solutions] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N 5. P. 412 – 423 [in Russian].
11. **Kirillov V. N., Vapirov Yu. M., Drozd E. A.** Issledovanie atmosfernoï stoikosti polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh atmosfery teplogo vlazhnogo i umerenno teplogo klimata [The study of atmospheric resistance of polymer composite materials in the atmosphere of moist warm and moderately warm climate] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N 4. P. 31 – 38 [in Russian].
12. **Efimov V. A., Shvedkova A. K., Koren'kova T. G., Kirillov V. N.** Issledovanie polimernykh konstruktivnykh materialov pri vozdествii klimaticheskikh faktorov i nagruzok v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [The influence of climatic factors and stress on polymeric structural materials in laboratory and field conditions] / Trudy VIAM. 2013. N 1. P. 5 [in Russian].
13. **Kirillov V. N., Efimov V. A., Shvedkova A. K., Nikolaev E. V.** Issledovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskie svoystva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical stress on the structure and mechanical properties of PKM] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2011. N 4. P. 41 – 45 [in Russian].
14. **Kablov E. N., Startsev O. V., Krotov A. S., Kirillov V. N.** Klimaticheskoe starenie kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya. III. Znachimye faktory stareniya [Climatic aging of aviation composite materials. III. Significant factors of aging] / Deform. Razrush. Mater. 2011. N 1. P. 34 – 41 [in Russian].
15. **Kabanov V. A.** (ed.). Éntsiklopediya polimerov [Encyclopedia of polymers]. — Moscow: Sovetskaya Éntsiklopediya, 1977. — 498 p. [in Russian].
16. **Barbero E. J.** Introduction to composite materials design. Second edition. — Boca Raton: CRC Press, 2010.
17. **Khaskov M. A.** O spetsifike opredeleniya temperatury steklovaniya vlagonasyshchennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov metodom dinamicheskogo mekhanicheskogo analiza [Some aspects of the glass transition temperature determination by dynamic mechanical analysis of the samples after hydrothermal aging] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2016. Vol. 82. N 1. P. 25 – 31 [in Russian].
18. **Filistovich D. V., Startsev O. V., Kuznetsov A. A. i dr.** Vliyanie vlagi na anizotropiyu dinamicheskogo modulya sdviga stekloplastikov [Effect of moisture on the anisotropy of the dynamic shear modulus of glass-fibre-reinforced plastics] / Dokl. RAN. 2003. Vol. 390. N 5. P. 618 – 621 [in Russian].
19. **Sideridou I., Achillas D. S., Kyrikou E.** Thermal expansion characteristics of light-cured dental resins and resin composites / Biomaterials. 2004. Vol. 25. N 15. P. 3087 – 3097.
20. ISO 6721–11:2012. Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 11: Glass transition temperature.
21. ASTM D 7028-07e1. Standard test method for glass transition temperature (DMA T_g) of polymer matrix composites by dynamic mechanical analysis (DMA).
22. ASTM D570–98(2010)e1. Standard test method for water absorption of plastics.
23. **Shimkin A. A.** Vliyanie produvochnogo gaza na znachenie temperatury steklovaniya [The effect of purge gas on a glass transition temperature] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2014. Vol. 80. N 11. P. 40 – 43 [in Russian].