

УДК 678.8:678.019.3

М.Р. Павлов¹, Е.В. Николаев¹, Н.П. Андреева¹, С.Л. Барботько¹**К ВОПРОСУ О МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11

Представлен обзор современных методик проведения испытаний полимерных материалов на старение под действием естественных и искусственных факторов светопогоды. Описаны механизмы термо- и фотодеструкции полимеров под действием солнечного излучения. Приведены основные параметры оборудования, используемого для проведения испытаний. Проведено сравнение спектрального распределения интенсивности естественного солнечного света и излучения, создаваемого дуговой ксеноновой лампой. Проведено сравнение и выявлены различия в режимах проведения ускоренных лабораторных испытаний для российских и зарубежных стандартов. Сделаны выводы о необходимости актуализации действующей в Российской Федерации базы нормативных документов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования», 18.3. «Моделирование и прогнозирование климатической стойкости» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: полимерные материалы, натурные климатические испытания, ускоренные климатические испытания, факторы светопогоды, фотохимическая стабильность, плотность потока излучения, ксеноновая газоразрядная лампа.

An overview of modern methods of polymer materials testing on aging under the influence of natural and artificial weathering factors is presented. The mechanisms of thermal and photodegradation of polymers under the influence of solar radiation are described. The basic parameters of equipment used for testing are shown. A comparison of the spectral distribution of the intensity of natural sunlight radiation and a radiation generated by the arc xenon lamp is performed. A comparison is conducted and found differences in the methods of accelerated laboratory tests for Russian and foreign standards are presented. The conclusions are made about the need to update the existing regulations in the Russian Federation.

The work is executed within the frames of the complex scientific directions 18.2. «Development of methods of climatic tests and instrumental methods of research», 18.3. «Modeling and forecasting of climatic resistance» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: polymer materials, outdoor weathering, accelerated weathering test, weathering factors, photochemical stability, irradiance, xenon discharge lamp.

¹Федеральное 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

В настоящее время доля применения полимерных материалов (ПМ) и полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства неуклонно возрастает. В авиационной промышленности ПКМ используются для

изготовления неотчетственных и малонагруженных элементов конструкций [2]. Снижение массы авиационных конструкций благодаря применению новых материалов дает возможность увеличить полезную нагрузку без повышения расхода топлива, а следовательно, повысить рентабельность техники [1, 3, 4]. Распространение полимерных материалов в различных отраслях промышленности связано с их стойкостью к климатическим факторам, от которой зависит их срок службы и возможность применения. Наряду с основными факторами климата, такими как влажность и температура окружающей среды [5–10], к снижению рабочих характеристик материала приводит ультрафиолетовая (УФ) составляющая спектра солнечного излучения [11].

Воздействие УФ составляющей приводит к фотодеструкции поверхности материала, образованию напряжений, трещин и, наконец, к разрушению поверхности. В случае с ПКМ происходит оголение поверхностных слоев наполнителя, которые не могут нести нагрузку, воздействующую на материал, но при этом их толщина учитывается при проведении испытаний на прочность. При разрушении поверхности материала образуются дефекты и места концентрации напряжений. В работе [12] показана определяющая роль дефектов в формировании комплекса прочностных свойств материалов, вводится понятие масштабного фактора – зависимость прочности от размеров и формы образца. На рис. 1 приведены кривые распределения значений прочности σ_p для образцов ненаполненных резин из бутадиен-стирольного каучука (БСК) с разной толщиной: 2,2; 1,1 и 0,4 мм.

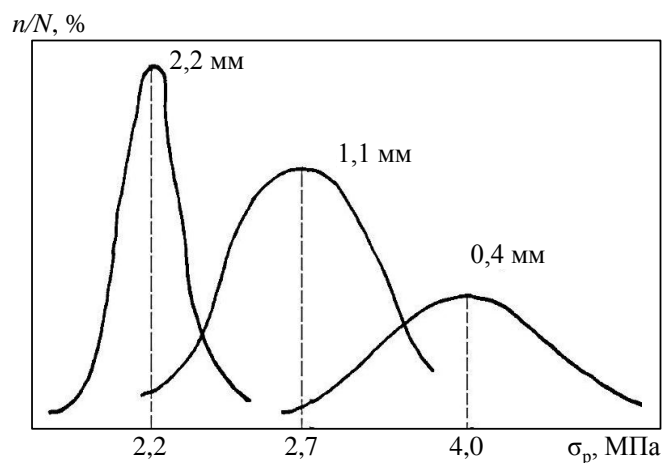


Рис. 1. Зависимость прочности от количества дефектов (n – дефекты на поверхности; N – общее количество дефектов) при разной толщине образцов ненаполненных резин из бутадиен-стирольного каучука

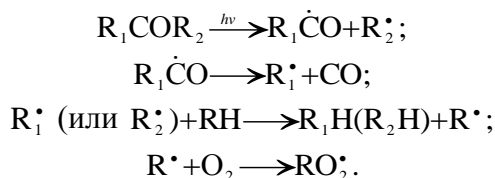
Чем толще образец, тем больше его поверхность и больше количество опасных дефектов, сосредоточенных на поверхности, следовательно, тем меньше прочность образца. В тонком образце поверхность наименьшая, дефектов относительно мало, поэтому прочность высокая. Но каждый дефект на поверхности в тонком образце особенно опасен, поэтому увеличивается разброс значений показателей прочности.

При деструкции и эрозии поверхности образца из ПМ за счет действия УФ-излучения его толщина может уменьшаться, а количество дефектов растет, следовательно, это приводит к снижению свойств материала. Разрушение поверхности ПКМ приводит к увеличению количества сорбированной влаги вследствие увеличения удельной поверхности и образованию новых полярных центров.

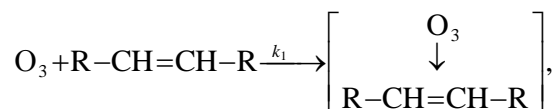
Рассмотрим возможные варианты деструкции полимерного материала под действием солнечного излучения.

Фотодеструкция

В начале процесса фотодеструкции кислород- и азотсодержащие группы, двойные связи, ароматические ядра, примеси металлов переменной валентности (остатки катализаторов реакции полимеризации) поглощают свет с длиной волны 290 нм. Поглощенный свет приводит к образованию радикалов и сопровождается процессом деструкции [13]:

**Озонное старение**

При взаимодействии солнечного УФ-излучения с кислородом воздуха происходит образование озона. Озон, являясь сильным окислителем, вступает в химическую реакцию с органическими молекулами полимерного материала, и таким образом протекает процесс озонного старения. Скорость реакции озона со связью C=C значительно выше, чем со связью C-C, вследствие чего реакция озонного старения идет по двойным связям:

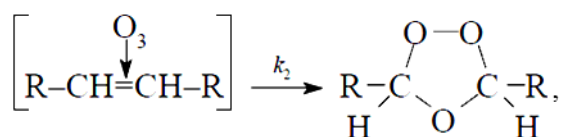


где k_1 – константа скорости первой стадии процесса озонного старения.

Данная стадия старения протекает быстро уже при отрицательных температурах.

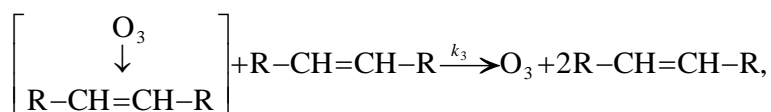
Далее процесс может протекать двумя различными путями:

– возможна стадия образования молозонида



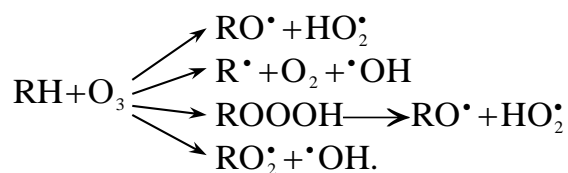
где k_2 – константа скорости процесса образования молозонида;

– или при взаимодействии с молекулой олефина может образоваться исходный продукт по реакции



где k_3 – константа скорости процесса образования исходных продуктов.

В случае предельных соединений озон является инициатором обычной реакции окисления:



Воздействие солнечной радиации приводит к значительному перегреву образцов материалов в процессе эксплуатации и может достигать 50°C в зависимости от коэффициента черноты материала [13].

За счет разогрева образца солнечным излучением также может протекать процесс термодеструкции и термоокислительной деструкции.

Термическая деструкция

Различают два типа распада полимерной цепи: деполимеризация и распад по закону случая, когда разрыв любой связи в полимерной цепи равновероятен. Деполимеризация протекает с конца макромолекулы, распад по закону случая – с середины.

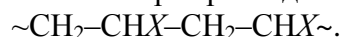
Константа скорости отщепления мономера от концевого радикала для процесса термодеструкции рассчитывается по формуле:

$$K \approx 10^{13} \cdot e^{-E/RT},$$

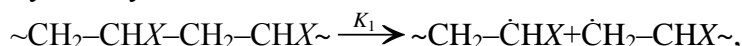
где 10^{13} – предэкспоненциальный множитель, равный числу колебаний атомов A и B в связи $A-B$; $E = E_p - q$, E_p – энергия активации присоединения мономера к макромолекуле; q – теплота присоединения мономера к макрорадикалу.

Таким образом, чем меньше значение q , тем выше вероятность деполимеризации.

Рассмотрим общий вид механизма термораспада полимера состава

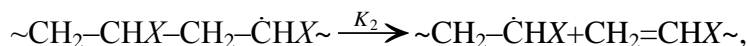


Распад полимера по цепному механизму начинается со стадии инициирования и идет по случайному закону:



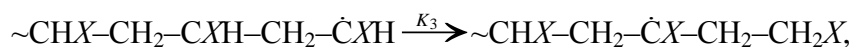
где X – боковой заместитель (атом или группа); K_1 – константа скорости стадии инициирования процесса термораспада полимера.

После распада макромолекулы полимера образуются два макрорадикала, в дальнейшем макрорадикал может подвергаться процессу деполимеризации с образованием мономера:

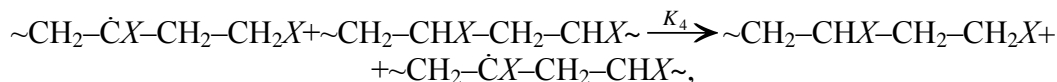


где K_2 – константа скорости стадии деполимеризации макрорадикала.

Далее возможны стадии внутримолекулярной или межмолекулярной передачи цепи:

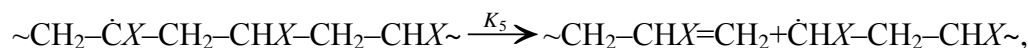


где K_3 – константа скорости стадии внутримолекулярной передачи цепи;



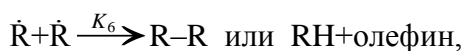
где K_4 – константа скорости стадии межмолекулярной передачи цепи.

Стадия деструкции макромолекулы протекает следующим образом:



где K_5 – константа скорости стадии деструкции макромолекулы.

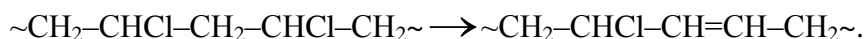
При встрече двух радикалов протекает процесс обрыва цепей:



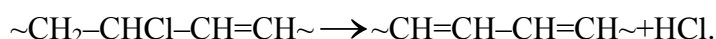
где K_6 – константа скорости стадии обрыва цепей.

Одним из вариантов термодеструкции полимера является распад по ионному механизму. Примером такого механизма может служить распад поливинилхлорида (ПВХ).

В процессе повышения температуры отщепляется молекула HCl и образуется связь $>C=C<$:



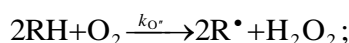
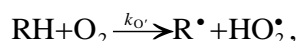
Группировка $>C=C<$ значительно ускоряет процесс дегидрохлорирования, который в дальнейшем протекает по атому Cl, ближайшему к двойной связи:



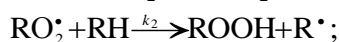
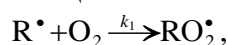
Термоокислительная деструкция

Термоокислительная деструкция – процесс, происходящий при одновременном воздействии кислорода и температуры:

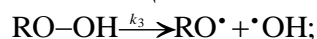
– первой стадией процесса термоокислительной деструкции соединения RH является *зарождение* цепей, которое сопровождается протеканием в жидкой фазе реакций с образованием гидропероксидов



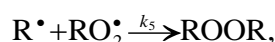
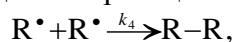
– далее следует стадия *продолжения* цепей



– а затем – *вырожденное разветвление* цепей



– окончанием процесса термоокислительной деструкции является стадия обрыва цепей, которая может протекать по одной из реакций



где $k_{O'}$, $k_{O''}$, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 – константы скорости соответствующих возможных реакций процесса термоокислительной деструкции.

Константа скорости k_1 на порядки превышает значение k_2 , при этом пероксидных радикалов RO_2^\bullet значительно больше, чем алкильных радикалов R^\bullet , так скорость окисления W рассчитывается по уравнению:

$$W = \frac{k_2}{\sqrt{k_6}} [RH] \sqrt{w_i},$$

где w_i – скорость инициирования процесса окисления.

Методы проведения климатических испытаний

В настоящее время существует различная нормативно-техническая документация, регламентирующая проведение испытаний на воздействие солнечного излучения

как в натуральных, так и лабораторных условиях. Актуальность проведения испытаний на воздействие солнечного излучения весьма высока, однако выбор метода испытания в зависимости от условий предполагаемой эксплуатации является сложным вопросом.

Натурные климатические испытания

Наиболее достоверным методом определения стойкости материала к факторам климата являются натурные испытания, при которых происходит комплексное воздействие климатических факторов. Основным нормативно-техническим документом, регламентирующим проведение испытаний полимерных материалов в России, является ГОСТ 9.708–83, который определяет проведение испытаний на климатических станциях в течение заданного времени. Его зарубежными аналогами являются стандарты ASTM G7/G7M и ASTM D 1435, основное отличие которых от ГОСТ 9.708–83 состоит в угле наклона стенда для натуральных испытаний. Отечественный ГОСТ 9.708–83 регламентирует угол наклона стенда, равный широте размещения климатической станции. В табл. 1 приведены углы наклона поверхности испытываемых образцов к линии горизонта.

Таблица 1

Углы наклона поверхности испытываемых образцов к линии горизонта	
Географическая широта, град	Угол наклона, град
От 0 до 10	5
От 10 до 20	15
От 20 до 30	25
От 30 до 40	35
От 40 до 50	45

Стандарты ASTM G7/G7M и ASTM D 1435 регламентируют угол наклона 45 град относительно линии горизонта. Оба подхода имеют свои положительные и отрицательные стороны, требование ГОСТ 9.708–83 подкрепляется наибольшей продолжительностью воздействия УФ-излучения на образцы материалов. В случае с ASTM G7/G7M и ASTM D 1435 данное значение наклона стенда способствует попаданию наибольшей части УФ-излучения в течение дня и смыву с поверхности образцов частиц пыли. Один и тот же угол наклона стенда позволяет более корректно сопоставлять получаемые результаты в различных климатических зонах.

В обоснованных случаях, которые регламентируются в нормативной документации на материал и местом проведения экспозиции, допускается расположение образцов горизонтально или под углом 90 град к горизонту. Способ крепления образцов на стенде показан на рис. 2. Однако при испытании образцов, расположенных под углом 90 град, на них могут осаждаться частички пыли, которые препятствуют проникновению УФ-излучения к материалу.

Требования к размещению образцов в отечественной и зарубежной нормативно-технической документации схожи:

- образцы ПМ должны быть размещены на атмосферном стенде по направлению на юг;
- не допускается соприкосновение образцов друг с другом;
- материал, из которого изготовлен ложемент, должен быть инертен по отношению к образцам;
- необходимо обеспечивать устойчивость крепления образцов к атмосферным явлениям (порывы ветра, воздействие снега и др.);
- на образцах не допускаются точки (зоны) с концентрированной механической нагрузкой (испытание образцов в свободном состоянии);

– схема крепления образцов должна обеспечивать свободную рециркуляцию воздуха вокруг них;

– на атмосферный стенд не должна падать тень в светлое время суток, а также не должно быть воздействия искусственного источника света в темноте.

На рис. 3 приложена схема размещения образцов полимерных материалов в соответствии с ГОСТ 9.708–83.

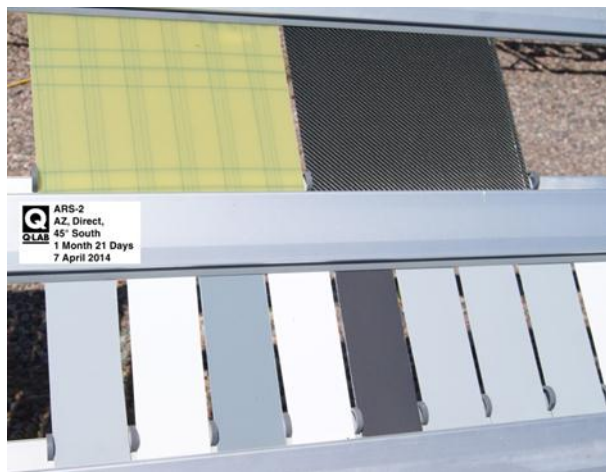


Рис. 2. Проведение испытаний образцов материалов в соответствии со стандартами ASTM G7/G7M и ASTM D 1435

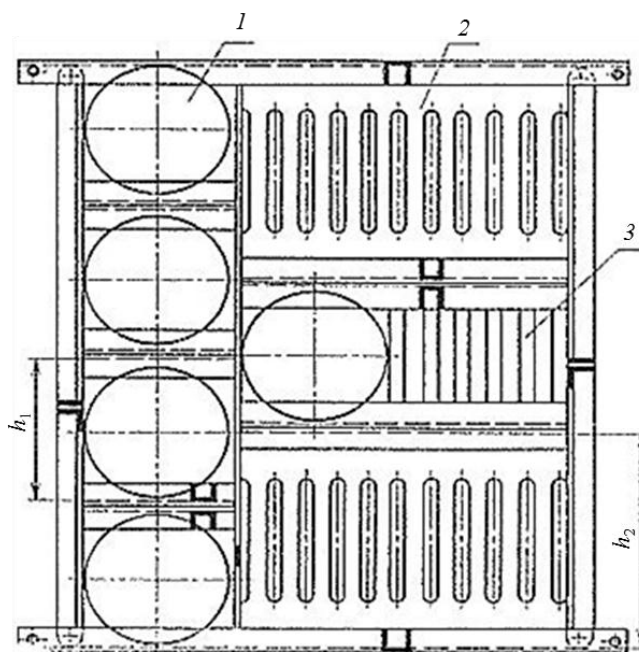


Рис. 3. Схема кассеты для крепления образцов на стенде:

1 – образец в форме диска; 2 – образец в форме лопатки; 3 – образец в форме бруска; h_1 – высота рамки для образца 1; h_2 – высота рамки для образца 2

Основным недостатком испытаний материалов в натуральных условиях является их большая продолжительность. Однако год от года значения климатических факторов могут отличаться, поэтому истинные значения изменений показателей, определяющих срок службы материала, могут быть получены только усреднением изменений за многолетний период. В соответствии с ГОСТ 15150–69 определение эффективных

значений температурно-влажностного комплекса и построение климатограммы для представительной точки географического района возможно за период не менее 10 лет.

Одним из примеров воздействия УФ-излучения в сочетании с другими факторами климата может служить изменение свойств поверхности стеклопластика СТ-69Н-15П на основе универсального эпоксидного связующего ЭДТ-69Н и полый стеклоткани Т-15П после проведения натуральных испытаний в течение 3 лет [14, 15], при которых определены зависимости изменения значений массы и блеска.

Образцы стеклопластика проходили натурную экспозицию в МЦКИ ВИАМ (промышленная атмосфера умеренного климата) согласно ГОСТ 9.708–83. Контроль изменения массы и блеска проводили с периодичностью 1, 3, 6, 9 и 12 мес, далее – не реже одного раза в год. На рис. 4 представлена зависимость изменения блеска и массы образца стеклопластика СТ-69Н-15П в процессе проведения натуральных климатических испытаний.

Согласно ММ1.595-20-361–2008 проводили определение изменения массы образцов с учетом увеличения массы образца за счет сорбции атмосферной влаги и снижения – за счет эрозии поверхности образца. Получена зависимость между климатическими сезонами, убылью массы образцов в результате эрозии поверхности и значениями блеска (рис. 4). Основными причинами эрозии поверхности можно считать фотохимическое воздействие солнечного излучения, механическое воздействие при выпадении осадков, песка и пыли, переносимых ветром. В зимний период образцы покрыты слоем снега и льда и таким образом защищены от прямого воздействия солнечной радиации, песка и пыли. Изменение массы образцов в зимние периоды 2007–2008 и 2008–2009 гг. минимально, поэтому и изменения блеска не наблюдается. Весной за счет нагрева солнечной радиацией температура образцов повышается выше нулевой отметки, при этом на их поверхности образуется водяная пленка. Влага проникает в дефекты поверхности образца и при замерзании может привести к их увеличению. После года натурной экспозиции за счет эрозии поверхностного слоя материала произошло оголение стекловолокна на лицевой стороне и частичное – на обратной. На основе полученных данных можно сделать вывод, что по изменению блеска можно судить о степени повреждения поверхности материала при его натурной экспозиции.



Рис. 4. Изменение массы (●) и блеска на лицевой (■) и обратной (▲) стороне в процессе натуральных испытаний стеклопластика СТ-69Н-15П

На рис. 5 представлено изменение поверхности стеклопластика СТ-69Н-15П. В исходном состоянии стекловолокно равномерно покрыто слоем связующего, после проведения натуральных испытаний в течение 5 лет происходит обнажение стекловолокна.

Вследствие выхода на поверхность материала открытых нитей стеклянного наполнителя значение величины блеска при экспозиции меняется незначительно. На обратной стороне материала волокно обнажается частично за счет меньшего воздействия осадков и отсутствия солнечной радиации.

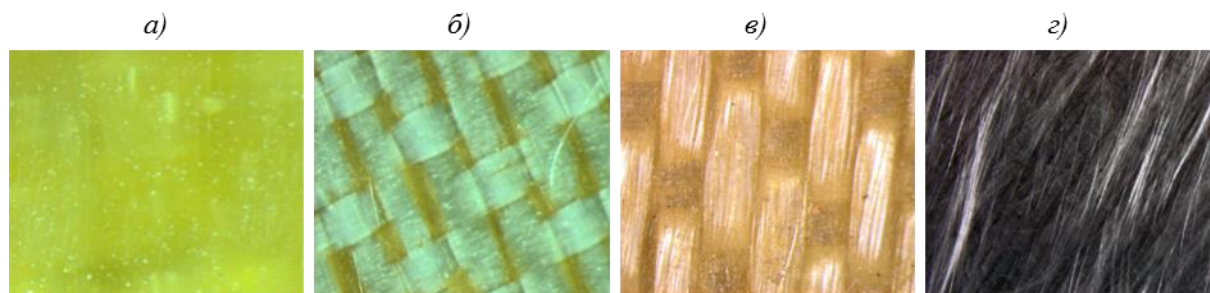


Рис. 5 Внешний вид ($\times 40$) изменения поверхности стеклопластика СТ-69Н-15П (а-в) и ВПС-31 (з) в зависимости от срока экспозиции:

а – исходное состояние; б, в – соответственно лицевая и обратная сторона после 5 лет натурной экспозиции; з – после 8 лет экспозиции

У стеклопластика ВПС-31 после 8 лет натурной экспозиции эрозия проникает вглубь материала, происходит оголение все больших слоев наполнителя на поверхности (рис. 5, з), это является косвенным показателем изменения прочности материала.

Ускоренные климатические испытания

Для сокращения сроков испытаний и сравнения данных о стойкости различных материалов к воздействию климатических факторов применяют ускоренные климатические испытания в лабораторных условиях. Современное испытательное оборудование позволяет искусственно создавать условия как для форсированного воздействия отдельных климатических или эксплуатационных факторов, так и создавать условия экспонирования, которые будут максимально приближены к реальным условиям эксплуатации, хранения и транспортировки. Действие каждого из приведенных факторов по отдельности может не оказать существенного влияния на свойства материала или изделия. Однако совместное влияние нескольких факторов может привести как к усилению воздействия, так и к ослаблению. Значительно больший эффект от воздействия климатических факторов можно получить также, если применять не статические режимы лабораторных испытаний, а динамические – например, изменение температуры (особенно с переходом через нулевое значение) и влажности воздуха, циклические изменения, имитирующие смену дня и ночи или времен года.

В настоящее время для определения устойчивости к старению под воздействием факторов светопогоды в лабораторных условиях применяется несколько российских и международных стандартов. Действующие российские стандарты следует разделить по объектам испытаний: испытания технических изделий и испытания материалов. Например, ГОСТ 16962.1–89 и ГОСТ 20.57.406–81 регламентируют испытания электротехнических изделий и изделий электронной техники, ГОСТ Р 51370–99 описывает методы испытаний любых технических изделий, ГОСТ 9.708–83 распространяется на пластмассы, ГОСТ 9.401–91 описывает методы испытаний лакокрасочных покрытий.

Ускоренные испытания в камере солнечной радиации проводятся несколькими методами:

1. Если определяется только фотохимическая стабильность, то испытания проводятся при непрерывном воздействии излучения. В течение всего испытания контролируется плотность потока излучения. Влажность в камере не нормируется и не контролируется.

ется. Дождевания образцов не производится. Критерием окончания испытаний является либо время выдержки образца в камере, либо накопление определенной дозы излучения.

2. Наряду с фотохимической стабильностью определяется стабильность материалов и изделий к воздействию повышенной температуры и изменений температуры.

3. Если необходимо проводить комплексные испытания, приближенные к натурным, то, наряду с облучением, образцы подвергаются воздействию повышенной влажности, циклической смене температуры и дождеванию. Облучение в этом случае может производиться в циклическом режиме, имитируя дневной и ночной периоды.

Фотохимическое воздействие облучения определяется интенсивностью и дозой УФ-излучения. Поскольку УФ-излучение имеет наибольшую энергию, то интенсивность излучения с длиной волны <400 нм будет определять степень фотохимического воздействия на образцы. С другой стороны, на поверхности Земли доля излучения с длиной волны <300 нм крайне незначительна. В связи с этим особое внимание уделяется источнику излучения, имитирующему солнечный свет. Ксеноновая газоразрядная лампа высокого давления может обеспечить наилучшую имитацию солнечной радиации. Сравнение излучения ксеноновой лампы с солнечным излучением при различных величинах толщины воздушной (оптической) массы представлено на рис. 6.

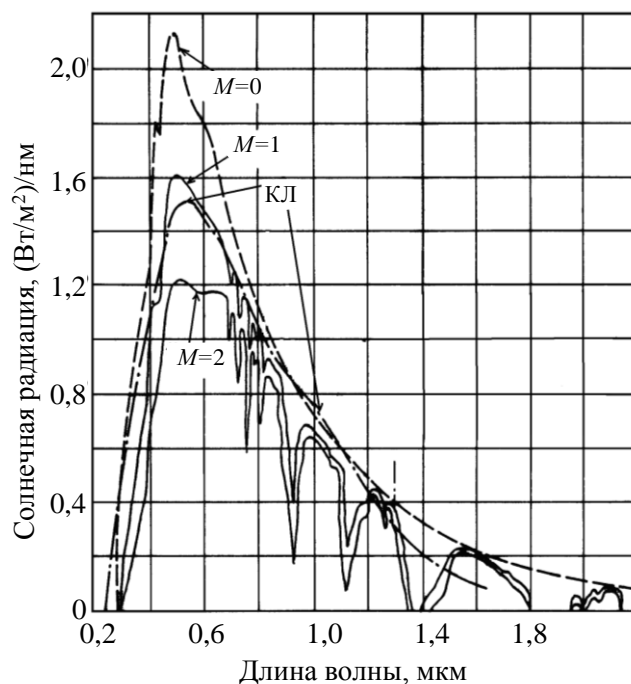


Рис. 6. Сравнение излучения ксеноновой лампы (КЛ) со спектром солнечного излучения при различной толщине воздушной (оптической) массы (M) и интенсивности солнечного излучения на поверхности Земли при условии отсутствия ($M=0$) и присутствия ($M=1$) земной атмосферы, в плоскости, перпендикулярной направлению излучения (солнце в зените), а также в присутствии земной атмосферы $M=2$, когда прямые солнечные лучи падают под углом 30 град к горизонту

Для российских стандартов на ускоренные испытания принята стандартная величина интегральной плотности потока излучения, равная 1120 Вт/м². Распределение плотности потока излучения по интервалам длин волн также стандартизовано и представлено в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика излучения	Область спектра					
	ультрафиолетовая		видимая			инфракрасная
Ширина полосы, мкм	0,28–0,32	0,32–0,4	0,4–0,52	0,52–0,64	0,64–0,78	0,78–3,0
Поверхностная плотность потока излучения, Вт/м ²	5	63	200	186	174	492
Допускаемое отклонение поверхностной плотности потока излучения, %	±35	±25	±10	±10	±10	±20

Примечание. Если применяемый источник излучения обеспечивает непрерывность во всей области спектра излучения, то допускается проверять характеристику излучения только по значениям интегральной поверхностной плотности потока излучения и по поверхностной плотности ультрафиолетовой части спектра; в этом случае допускаемые отклонения не превышают соответственно ±10 и 25%.

При проведении испытаний в соответствии с российскими стандартами источник излучения (ксеноновая лампа) всегда работает в одном, стандартном режиме. Изменение плотности потока излучения не допускается.

Стандарты США также ссылаются на эталонное спектральное распределение плотности потока солнечного излучения. Характеристики эталонного распределения представлены в стандарте ASTM G 177 или в более ранней версии этого стандарта – CIE-Publication Number 85.

Эталонное распределение плотностей потока излучения для стандартов США является справочным, и при проведении испытаний не требуется строгое соблюдение представленного в табл. 3 распределения. Однако должно быть соблюдено соотношение плотностей потока излучения в различных диапазонах длин волн. Так, доля УФ-излучения в суммарном видимом и УФ-излучении составляет 9,8% согласно стандарту ASTM G 177.

Таблица 3

Характеристика излучения	Область спектра					
	<0,29	0,29–0,32	0,32–0,36	0,36–0,4	0,29–0,4	0,29–0,8
Поверхностная плотность потока излучения, Вт/м ² , в соответствии с:						
ASTM G 177	0	3,748	25,661	34,762	64,171	652,3
CIE-85	0	4,06	28,45	42,05	74,56	678,78

Плотность потока излучения для американских и международных стандартов выбирается исходя из чувствительности материала к излучению. Наиболее часто применяется режим облучения с плотностью потока 0,35 Вт/(м²·нм) для длины волны 340 нм (это соответствует 40 Вт/м² для всего УФ-диапазона). В соответствии с международными стандартами ISO 4892 и ISO 11341, при стандартных испытаниях применяется плотность потока УФ-излучения 60 Вт/м² в интервале длин волн 300–400 нм. Для российских ГОСТ характерны большие значения плотности потока УФ-излучения: 68 Вт/м² в области длин волн <400 нм. Если для ускоренных испытаний используются ксеноновые лампы со стабильным спектром излучения, то величина плотности тока 68 Вт/м² в интервале длин волн 280–400 нм (или <400 нм) соответствует плотности потока УФ-излучения 65 Вт/м² в интервале длин волн 300–400 нм. Более высокая плотность потока излучения обеспечивает более быстрое накопление необходимой дозы излучения, а следовательно, и сокращение продолжительности ускоренных испытаний. Основываясь на различиях в плотности потока излучения для стандартных испытаний, можно было бы сделать вывод о том, что российские стандарты являются более жесткими по условиям воздействия на материалы, однако следует отметить, что стандарт ISO 4892 позволяет при необходимости проводить испытания при плотности потока УФ-излучения до 180 Вт/м². Стандарт ASTM G 155 позволяет испытывать ПИМ в еще

более широком диапазоне плотностей потока излучения. Такие испытания можно проводить при плотности потока излучения 0,35 и 0,55 Вт/(м²·нм) – для длины волны 340 нм, а также при плотности потока излучения 180 Вт/м² – в интервале длин волн 300–400 нм. Это делает иностранные стандарты более гибкими и позволяет подобрать такое значение интенсивности излучения, которое для каждого материала обеспечивает максимальную скорость накопления дозы излучения, и в то же время не вносит изменений в механизм фотохимического старения полимера, а также позволяет разделить механизмы теплового и фотохимического старения.

Если наряду с фотохимическим воздействием необходимо определить воздействие тепловых напряжений, возникающих в материале или изделии под действием солнечного излучения, то необходимо применять циклические методы испытаний. Воздействие теплового излучения вызывает локальный разогрев облучаемой поверхности. Степень воздействия теплового излучения проще и эффективней всего определять по температуре «черной панели». Чем выше интенсивность излучения, тем больше будет разница между температурой поверхности и температурой воздуха в испытательной камере. Применяя принудительную циркуляцию воздуха в рабочем объеме камеры, можно уменьшить разницу температур на поверхности и в глубине образца. Однако в случае оценки возникающих под действием солнечных лучей напряжений необходимо проводить испытания с минимальной скоростью потока воздуха в камере.

При оценке устойчивости изделия или материала к совместному воздействию изменения температуры и фотохимического старения испытания проводятся циклами. Варианты циклических испытаний представлены на рис. 7. Каждый из циклов имеет продолжительность 24 ч и включает фазу облучения, когда поверхность образца нагревается, и фазу темноты, когда поверхность остывает. Максимальная температура, до которой может разогреваться поверхность образца, зависит от климатического исполнения изделия.

При комплексном воздействии на образцы температуры, влажности, дождевания в соответствии с ГОСТ 9.708 температуру «черной панели» и относительную влажность в камере, в зависимости от типа испытываемой пластмассы и цели испытаний, выбирают из следующего ряда: 45, 55, 65°C и 35, 50, 65, 90%.

Значения температуры и влажности устанавливают в соответствии со стандартами или техническими условиями на пластмассы.

При необходимости дополнительного увлажнения образцов проводят дождевание в соответствии с данными табл. 4.

Таблица 4

Режимы дополнительного увлажнения в камере светопогоды

Продолжительность дождевания, мин	Продолжительность сухого периода, мин
1	29
3	17
5	25
12	48
18	102

В соответствии со стандартом ASTM G 155 наиболее часто применяемый метод испытаний имеет следующие параметры: температура «черной панели» 63°C, период орошения 18 мин, продолжительность сухого периода 102 мин. Температура и влажность воздуха в камере не контролируются.

В соответствии со стандартом ISO 4892 стандартный метод испытаний имеет следующие параметры: температура черной панели 63°C, период орошения 18 мин, продолжительность сухого периода 102 мин. Температура воздуха в камере 38°C, влажность воздуха 50% (для материалов, чувствительных к воздействию влаги, рекомендуется значение относительной влажности 65%).

Выбирая режим облучения образцов (при имитации естественных условий), необходимо опираться не только на фотохимическое воздействие ультрафиолетовой части солнечного света, но и на тепловое воздействие излучения, а также на действие влажности воздуха и орошения. В случае использования повышенных плотностей потока излучения влажность воздуха в камере будет ниже, а следовательно, и степень воздействия влаги на материал уменьшится. Если материал является чувствительным к воздействию влажности, следует выбирать для испытаний эффективные значения как влажности воздуха, так и плотности потока излучения.

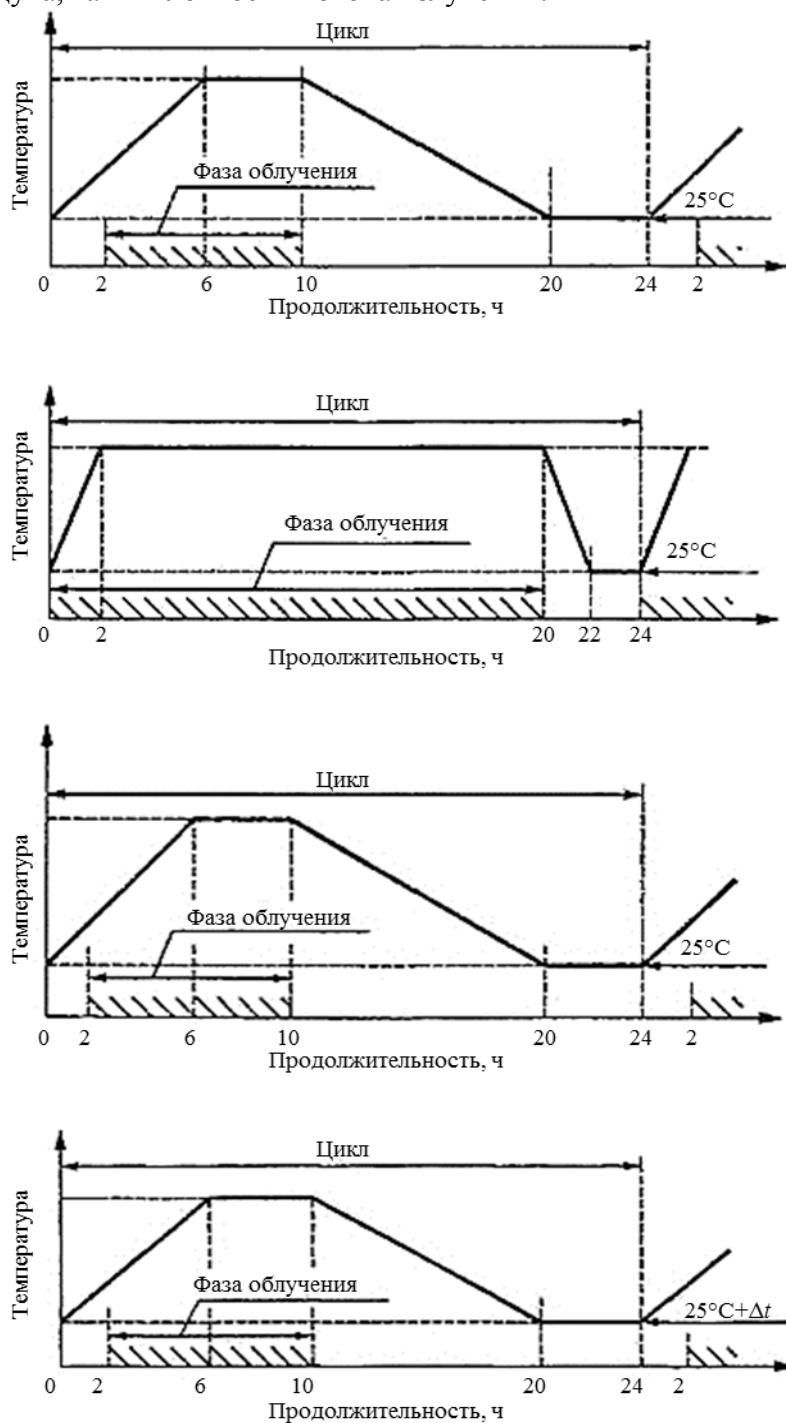


Рис. 7. Варианты циклического изменения температуры при испытаниях на термическое растрескивание

Продолжительность испытаний обычно определяется дозой УФ-излучения, которую должен накопить образец.

Заключение

Для всех материалов, эксплуатация и хранение которых предполагается на открытом воздухе, требуется применение комплексных методов испытаний на воздействие нескольких климатических факторов.

На основании проанализированных нормативных актов России, США и международных стандартов можно сделать вывод о том, что зарубежная нормативная база является более гибкой по сравнению с российскими стандартами. Обновление нормативных документов за рубежом проводится с интервалом в 1–2 года, что позволяет привлекать к проведению испытаний обновленное и усовершенствованное испытательное оборудование, а также корректировать интенсивность и продолжительность воздействующих факторов в соответствии с характеристиками вновь разработанных материалов.

Принимая во внимание все вышеизложенное, требуется разработка новых и пересмотр действующих на территории Российской Федерации ГОСТ, последняя актуализация которых прошла еще в девяностые годы двадцатого века.

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. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Mishra G., Mohapatra S.R., Behera P.R., Dash B., Mohanty U.K., Ray B.C. Environmental stability of GFRP laminated composites: an emphasis on mechanical behaviour // *Aircraft Eng. and Aerosp. Technol.* 2010. V. 82. №4. P. 258–266.
5. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Туманов А.Т. – инициатор создания композитов // *Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении: сб. тез. докл. Межотрасл. науч.-технич. конф.* М.: ВИАМ, 2009. С. 6–9.
6. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 38–42.
7. 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.
8. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н. Влияние климатических факторов на свойства углепластика на полифениленсульфидном связующем // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №1. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-10-10.
9. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Ямщикова Г.А., Тимошина Л.Н. Влияние внешней среды на свойства углепластика, полученного методом пропитки под давлением (RTM) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-8-8.

-
10. Ткачук А.И., Гребенева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №11. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2015).
 11. 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: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2015).
 12. Кулезнев В.Н., Ушакова О.Б. Структура и механические свойства полимеров. М.: МИТХТ, 2006. 86 с.
 13. Архиреев В.П. Старение и стабилизация полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 88 с.
 14. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Деев И.С. К вопросу о методике проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Сб. докладов VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2010». М., 2010. Ч. II. С. 102–106.
 15. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Гращенко Д.В. Московский центр климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» – региональный центр испытаний материалов в представительной зоне умеренного климата // Сб. докладов IX науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012». М. 2012. Ч. II. С. 202–208.