

В. Г. Мартыненко

Ю. Н. Ульянов, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина
e-mail: gradedegree@gmail.com
martynenko.volodymyr@gmail.com

Ключевые слова: анизотропная вязкоупругость, композиционный материал, экспериментальное исследование, повышенная температура, кривая релаксации.

УДК 620.172.251.226 / 620.172.251.282

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ПРОЦЕДУРА ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Описан процесс модернизации установки, предназначенной для проведения длительных испытаний стальных и алюминиевых цилиндрических образцов на высокотемпературную ползучесть, под экспериментальные исследования анизотропных прочностных и вязкоупругих характеристик плоских композиционных образцов при повышенных температурах. Для реализации данной цели была предложена схема перестройки держателей образцов в экспериментальной машине, а также метод их крепления. Разработанный, спроектированный и построенный блок автоматического регулирования температурного режима электропечи позволил поддерживать повышенную температуру с достаточно малой погрешностью при продолжительной её работе и регулировать температуру нагрева в заданном диапазоне, что было необходимо для исследования механических свойств композиционных образцов. Проведение экспериментального исследования мгновенных и длительных механических свойств продемонстрировало эффективность усовершенствований, выполненных для экспериментальной установки, применительно к реализации такого рода экспериментов.

Введение

Полимерные армированные композиционные материалы (ПАКМ) используются в областях автомобиль-, авиа- и космического строительства, в тяжёлой промышленности и производстве товаров общего потребления [1, 2].

Во время эксплуатации композиционные элементы конструкций и машин подвергаются влиянию повышенных температур и высоких уровней нагрузок. Поскольку обычно они являются тонкостенными элементами, для поддержания их работоспособности важно точно рассчитать их поведение под влиянием переменных температур и высоких нагрузок [3–5].

Таким образом, исследование механических свойств композиционных материалов – актуальная на данный момент задача, поскольку моделирование механического поведения и определения прочности композиционных элементов машин крайне важно при их проектировании.

Из-за наличия направленных армирующих волокон механические свойства композиционных материалов являются анизотропными. Кроме того, свойства полимерной матрицы ПАКМ очень чувствительны к изменению температур [6], особенно при переходе через температуру стеклования – такое значение температуры, при превышении которого полимер меняет свою микроструктуру, а форма его молекул становится подвижной под влиянием внешних нагрузок [7]. Это приводит к проявлению вместе с эффектом упругости (то есть линейного изменения деформаций тела под влиянием нагрузок вследствие изменения расстояний между молекулами) явления вязкоупругости – процесса роста деформаций во времени при постоянных напряжениях и релаксации напряжений во времени при постоянных деформациях [8]. Линейная вязкоупругость характеризуется интегральной пропорциональностью между деформациями и напряжениями, а также является обратимым процессом – при снятии нагрузок вязкоупругие деформации с течением времени возвращаются к начальному уровню [9].

Экспериментальное исследование квазистатических вязкоупругих свойств было выполнено в работах [10] для плоского нагружения сатинового углеродно-эпоксидного композита, [11] для межслоевого модуля сдвига слоистых композитов, [12] для модулей в виде рядов Прони и времен релаксации, а также температурной сдвиговой функции эпоксидных соединений, [13] для свойств ползучести эпоксидного клея, [14] для ортотропных вязкоупругих свойств плоского композита из стеклянной ткани при повышенных температурах, [15] для вязкоупругих параметров сжатия заполненной резины, [16] для зависимости армирования расслоенной нанопластины графитового оксида от механических и вязкоупругих свойств натурального каучука, [17] для изотропной вязкоупругой реакции тканого композита. В работе [18] были представлены объёмные эксперименты на вязкоупругость клея между композитными и металлическими элементами. В [19] анализ вязкоупругости и экспериментальная проверка анизотропных композитных оберточных цилиндров позволили адекватно моделировать такой тип систем.

Итак, исследование анизотропных вязкоупругих свойств ПАКМ является сложной инженерной задачей. Ее решение требует, во-первых, выполнения экспериментов на растяжение композиционных образцов, вырезанных в разных направлениях, количество которых зависит от степени анизотропии механических свойств, во-вторых, правильного закрепления образцов в экспериментальной машине во избежание нежелательных деформаций в держателях, в-третьих, нагрева образцов однородным и неизменным во времени температурным полем и, в-четвертых, точного замера деформаций вязкоупругости на протяжении достаточно большого промежутка времени.

Таким образом, разработка экспериментального оборудования и проведение исследования анизотропных вязкоупругих свойств ПАКМ при повышенных температурах является актуальной на данный момент инженерной и научной задачей.

1. Описание экспериментальной машины АИМА 5-2

На рис. 1 показана принципиальная схема машины для испытаний на длительную прочность АИМА 5-2, которая была использована для проведения эксперимента [20].

Для исходной конструкции машины испытуемый образец 12 закрепляется резьбовыми концами в захватах 3 и 11. Нижний захват 3 соединён с верхней частью ходового винта 2 силового редуктора.

В разъединённом состоянии силовой редуктор вращают вручную штурвалом 1, что необходимо при установке образца или быстрой разгрузке образцов, например, при длительном выключении напряжения и охлаждении образцов.

При вращении червячного колеса силового редуктора ходовой винт 2 перемещается вверх и вниз. Перемещение винта в пределах 70 мм ограничивается конечным выключателем. Верхний захват 11 соединён с шаровой подвеской, которая является конечным звеном трёхрычажного погружного устройства, состоящего из силового 5, промежуточного 7 и весового 10 рычагов. Рычаги связаны между собой с помощью сержек 6. На весовом рычаге 10 крепится держатель грузов 9, необходимый для работы системы рычага при соотношении плеч 1:100. Весовой рычаг соединен с указателем горизонтального положения рычагов 4, который выведен на лицевую сторону машины. Общее передающее число рычага 100:1 (силовой рычаг 8:1, промежуточный 5:1, весовой 2,5:1). Каждый из рычагов сбалансирован своим контргрузом. Испытуемый образец помещают в электропечи 13, которая обеспечивает необходимую температуру испытания.

Машина позволяет проводить испытание образцов в диапазоне нагрузок 50-400 Н в режиме непосредственного нагружения. В этом случае к нижнему концу образца крепят специальную тягу с захватом.

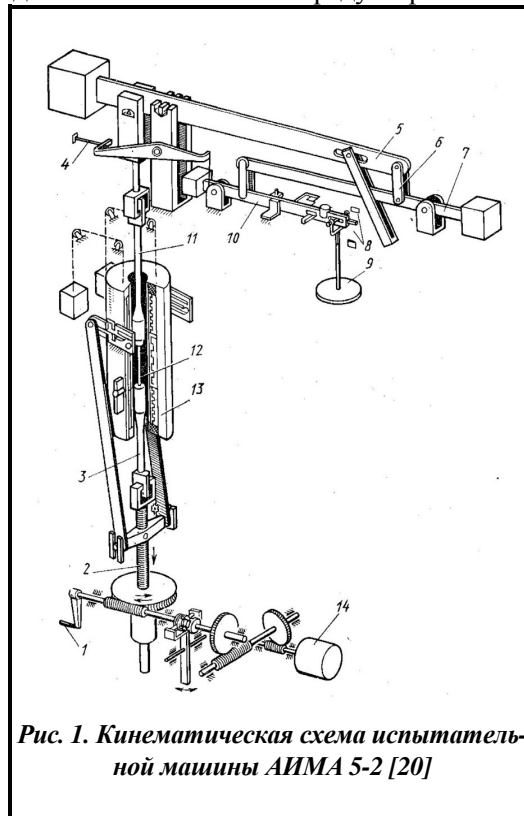


Рис. 1. Кинематическая схема испытательной машины АИМА 5-2 [20]

2. Подготовка образцов к проведению эксперимента

Рассматриваемый композиционный материал является объединением эпоксидной смолы с длинными стеклянными направленными волокнами [21], [22]. Схема ортогонального плетения материала обеспечивает высокие прочностные свойства тонких оболочек, изготовленных из этого материала, которые подвергаются силам растяжения или изгиба, сохраняя при этом его легкий вес (приблизительно четверть сравнительно с аналогичным значением для стали). В то же время этот композиционный материал не настолько прочный, как углепластик, из-за более слабых механических свойств стекловолокна, но значительно более дешевый благодаря низкой цене их производства в сравнении с углеродными волокнами.

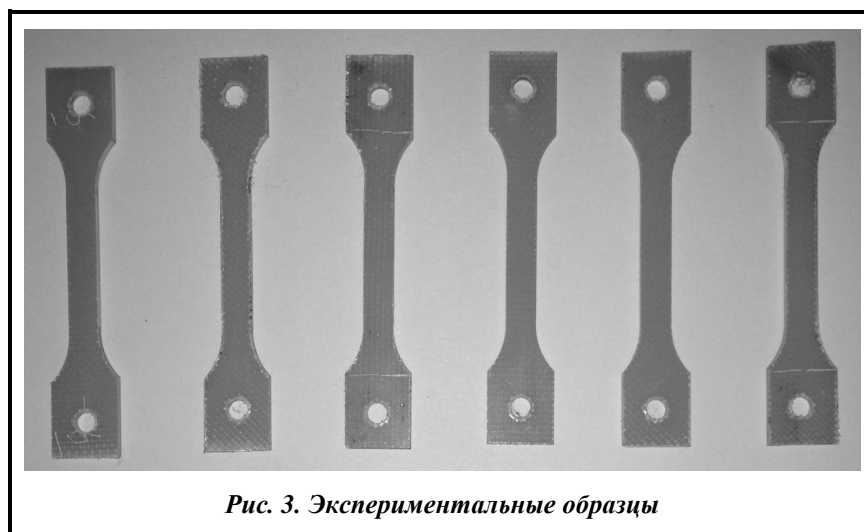
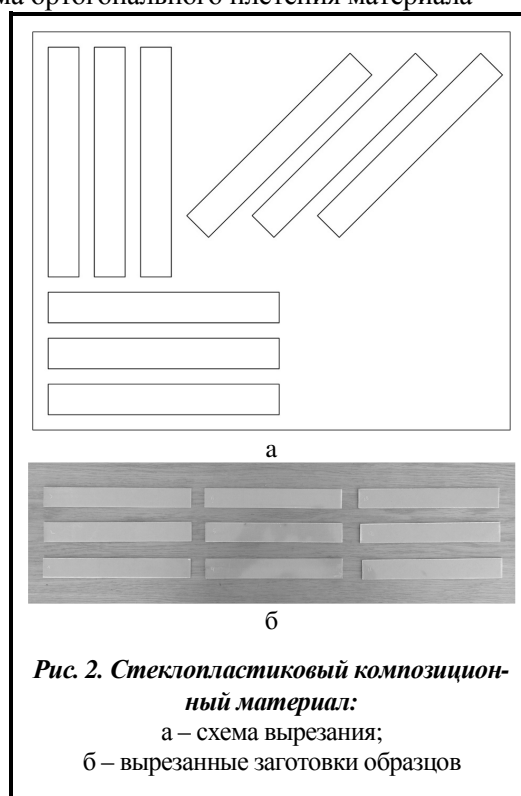
Обобщенные механические свойства эпоксидной смолы и стеклянных волокон представлены в работах [23], [24] и [25], [26] соответственно.

Рис. 2 демонстрирует вид заготовок для производства образцов из стеклопластика. На рис. 2, а показана схема вырезания заготовок экспериментальных образцов, которые представлены на рис. 2, б. Таким образом, каждый ряд образцов был нарезан в собственном направлении из одной большой пластины.

Полимерная природа матрицы эпоксидной смолы вызывает проявление явления вязкоупругости [27]. Вязкоупругие свойства ПАКМ не настолько заметны при комнатной температуре на протяжении периодов времени, которые могут наблюдаться, но относительно небольшое увеличение до температуры 100°C сокращает эти периоды до дней, часов и даже минут.

Таким образом, эксперименты с вязкоупругими свойствами ПАКМ нужно проводить при повышенной температуре, которая должна поддерживаться на протяжении продолжительного периода времени. Подготовка образцов проводилась согласно стандарту Американского общества испытаний материалов (American Society for Testing and Materials – ASTM) D618 [28]. Процедура А выбрана как адекватная подготовка для текущих целей тестирования. Геометрия образцов была разработана согласно стандарту ASTM D638 [29]. На рис. 3 изображены готовые образцы толщиной 2 мм.

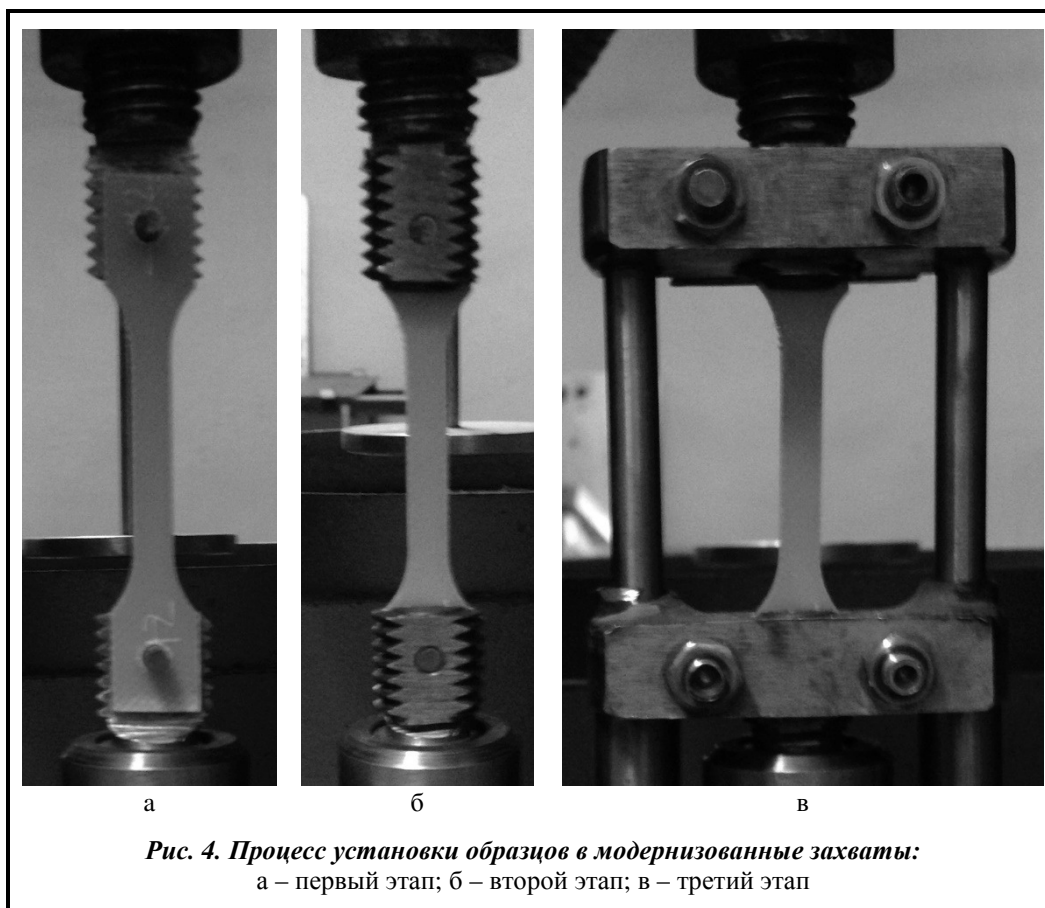
В образцах имеются отверстия диаметром 4 мм на концах, чтобы обеспечить их сборку в экспериментальной машине. После монтажа концы образцов были затянуты захватами во избежание концентрации напряжений вокруг отверстий и для обеспечения полной фиксации концов образца.



3. Модернизация механической части экспериментальной машины

Экспериментальная машина АИМА 5-2 разработана для испытания цилиндрических металлических образцов, которые крепятся с помощью резьбовых соединений. Для исследования механических свойств композиционного материала нужно было разработать крепление плоских образцов, которое обеспечивало бы защемление их концов. Такие крепления были разработаны на базе стальных цилиндрических образцов с резьбой на концах. Рис. 4 иллюстрирует процесс монтажа плоских композиционных образцов в модернизированных захватах.

Сначала образец фиксируется в исходном положении с помощью отверстий на его концах и штифтов на половинках захватов, как это показано на рис. 4, а. Далее на штифты надеваются вторые половинки резьбовых креплений таким образом, чтобы полностью охватить концы образцов резьбой (рис. 4, б). Наконец, на резьбу с двух концов образца крепится измерительная рамка, содержащая на других своих концах индикаторы часового типа, которые должны измерять относительное перемещение захватов. Измерительная рамка затягивается на концах образца с помощью четырёх болтов и гаек, как это показано на рис. 4, в. В результате достигается эффект затяжки захватов по боковым поверхностям концов образца, то есть он становится защемленным в двух захватах, как это требует процедура проведения экспериментов на плоских композиционных образцах.



4. Автоматический регулятор температурного режима в электрической печи

Разработанный и созданный автоматический регулятор температурного режима в электропечи (АРТРЕП), внешний вид которого показан на рис. 5, построен по структурной схеме, представленной на рис. 6.

В качестве термодатчиков в автоматическом регуляторе применены полупроводниковые термисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Основанием для отказа от использования традиционных термодатчиков с биметаллической пластиной явились их низкая точность срабатывания и существенная инерционность как терморегуляторов в заданном рабочем интервале температур $75^{\circ}\text{C} - 125^{\circ}\text{C}$.

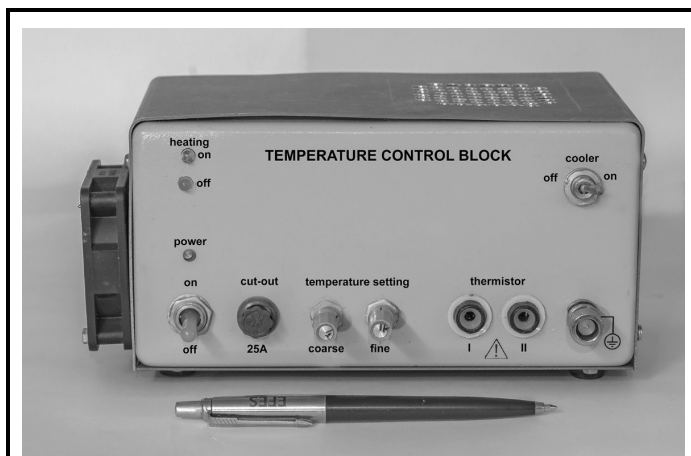


Рис. 5. Внешний вид АРТРЭП

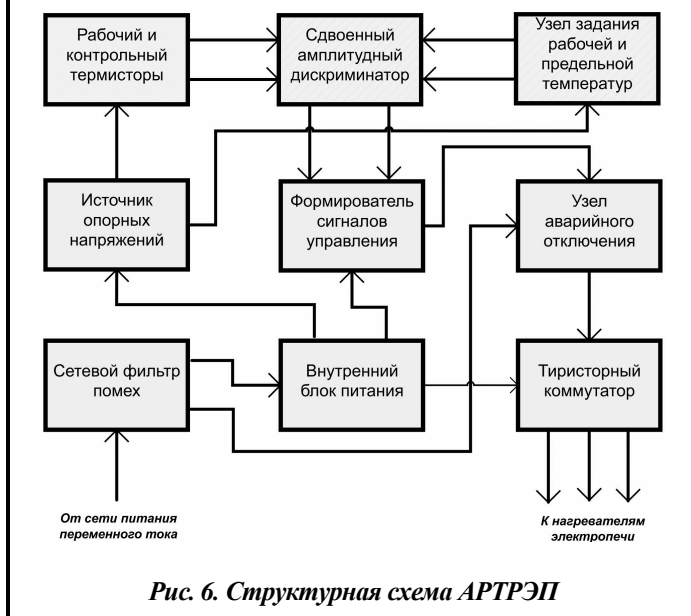


Рис. 6. Структурная схема АРТРЭП

Подключенный к выходу сдвоенного амплитудного дискриминатора блок формирователя сигналов управления (БФСУ) по существу является логическим устройством, реализующим операцию логического сложения ИЛИ-НЕ с отрицательным результатом. Таким образом, в аппаратной реализации выходной сигнал БФСУ на открытие блока тиристорного коммутатора (БТК) формируется, если не превышен установленный температурный порог в отношении рабочей или предельной температур. Сходную управляющую функцию выполняет узел аварийного отключения (УАО), блокирующий прохождение сигнала запуска к БТК в случае поступления командного сигнала от магнитоуправляемого датчика перегрузки, размещенного в блоке сетевого фильтра помех (СФП).

Дополнительно необходимо отметить, что для снижения величины колебаний рабочей температуры автоматического регулятора и сокращения времени на первичный пуск реализован ступенчатый режим переключения нагревательного элемента электропечи. Так, непосредственно после включения блока АРТРЭП в работе участвуют все три части нагревательного элемента, включенных параллельно в однофазную сеть переменного тока 220 В. По достижении заданного значения рабочей температуры электропечи и после ее выключения по сигналу БФСУ блок тиристорного коммутатора переводит все три части нагревательного элемента в режим последовательного питания, который не изменяется до следующего перезапуска всего блока АРТРЭП.

Для обеспечения устойчивой бесперебойной работы блока АРТРЭП в условиях влияния различного рода помех по питающей сети переменного тока промышленной частоты в состав блока введен блок

Работа блока АРТРЭП осуществляется по способу двухпозиционного регулирования средней мощности электропечи, необходимой для поддержания в ее рабочей камере заданной температуры. По условиям экспериментальных исследований зона нечувствительности задана на уровне $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Ширина этой зоны обусловлена динамическим запаздыванием полупроводниковых термодатчиков, вносимым их металлическими защитными чехлами, заполненными внутри непроводящей термопастой, а также их трубчатыми металлическими держателями. Временной интервал запаздывания составляет около 25 с.

Главным измерительным элементом автоматического регулятора температуры является сдвоенный амплитудный дискриминатор, реализованный на интегральном компараторе типа LM-311. Компараторы осуществляют переключение величины выходного напряжения согласно превышению входными сигналами предварительно установленных уровней. Таких уровней в автоматическом регуляторе два:

- уровень рабочей температуры электропечи;
- уровень предельной температуры электропечи.

Формируются эти уровни рабочим и предельным измерительными мостами соответственно за счет включенных в них термисторов под воздействием поля температуры. Предварительной балансировкой измерительных мостов, подключенных к входам компараторов, выполняется задание значений рабочей и предельной температур электропечи.

СФП. Электрическая схема этого фильтра включает пассивные индуктивные и емкостные элементы в виде дросселей со встречной и согласной намоткой, высоковольтные неполярные конденсаторы, а также ограничитель бросков напряжения – варистор. Построенный на индуктивно-емкостных элементах двухступенчатый помехозащитный фильтр обеспечивает подавление высокочастотных синфазных сетевых помех на уровне 96 дБ и ограничение одиночных бросков напряжения амплитудой сверх 240 В. Дополнительно, для организации быстродействующей защиты блока АРТРЭП от перегрузки и коротких замыканий, в схему СФП введен магнитоуправляемый электронный переключатель на микросхеме X791151, выход которой подключен ко второму входу узла аварийного отключения, как показано на рис. 6.

Основные технические характеристики разработанного и созданного блока автоматического регулятора температурного режима в электропечи, предназначенной для экспериментальных исследований прочностных характеристик изучаемых образцов слоистых стеклопластиков, приведены ниже.

– Потребляемая средняя мощность	10 Вт
– Напряжение питания блока	220 В
– Максимальная мощность электропечи (в режиме первичного прогрева)	3,9 кВт
– Мощность электропечи в рабочем режиме	1,3 кВт
– Рабочее напряжение электропечи	100 В
– Диапазон поддерживаемых температур в электропечи	70÷130°С
– Временной интервал выхода на рабочий режим	15÷20°мин.
– Амплитуда пульсаций температуры в электропечи	±0,2°С
– Предельная температура электропечи	150°С
– Пороговое значение тока нагрузки блока (в аварийном режиме)	20 А

5. Процедура проведения экспериментального исследования

Процедура и детали набора экспериментов были запланированы согласно стандартам ASTM [29–31].

Образцы вырезаны из одной композиционной пластины толщиной 2 мм в направлении 0°, 45° и 90°, см. рис. 2, а. Они нагружались в направлении их длинной стороны. В зависимости от направления вырезания это приведет к одному из трех состояний, показанных на рис. 7.

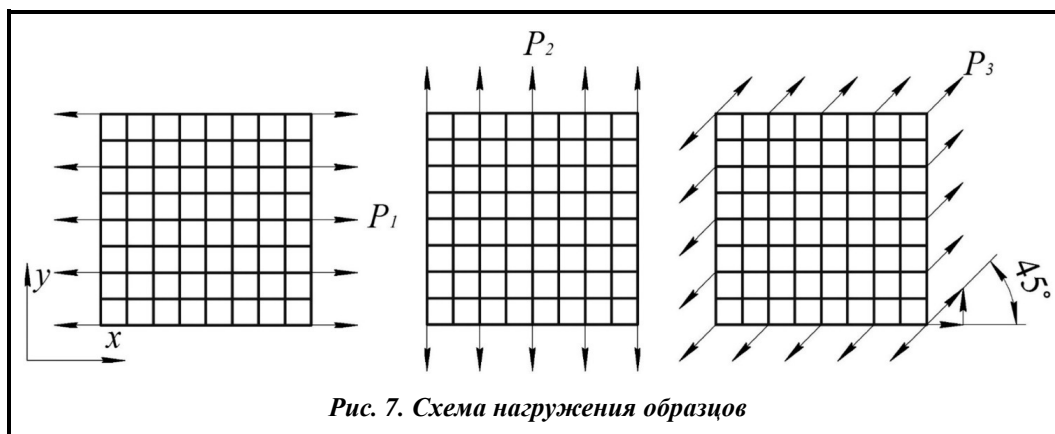


Рис. 7. Схема нагружения образцов

Такие схемы нагружения позволили получать плоские механические свойства композиционного материала. Определение механических свойств в третьем направлении (перпендикулярно к плоскости пластины) требует испытаний на растяжение или сжатие в этих направлениях, которые тяжело реализовать. Однако при моделировании механического поведения тонких композиционных пластин и оболочек, которые подвергаются силам растяжения и изгиба, существует потребность лишь в плоских свойствах.

На рис. 8 показан полный вид экспериментальной установки. Образец I фиксируется в захватах (держателях) II, тогда как нагревательный элемент (нагреватель) III расположен вокруг него. Относительное перемещение захватов измеряется двумя датчиками IV, а постоянность температуры контролируется датчиком V. Нагреватель обеспечивает плавное повышение температуры до 100 °С, поддерживая ее в пределах не больше ± 2°С, как это требуется в стандарте ASTM D2990 [30].

Для проверки правильности заземления образцов они были нагружены до разрыва, как это показано на рис. 9 для образцов, вырезанных под 0° и 45° к первому направлению армирования соответствен-

но. Как видно из рис. 9, а, б, разрыв происходит в месте рабочей части образцов, что свидетельствует об эффективности разработанных захватов.



Рис. 8. Экспериментальная машина:
а – общий вид; б – вид захватов

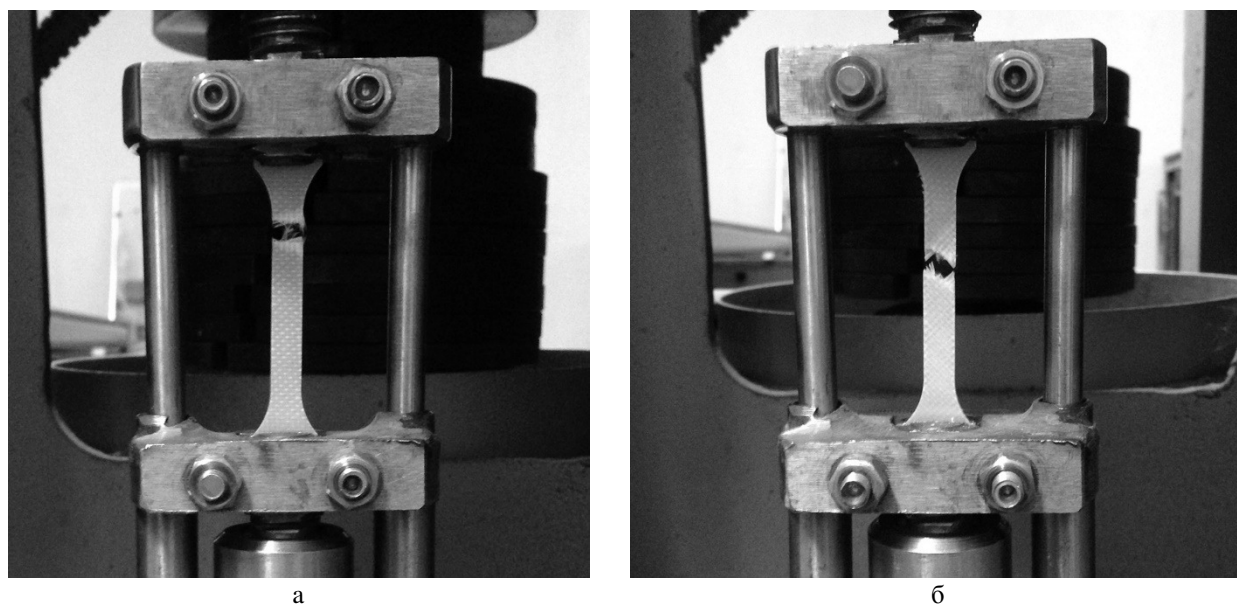


Рис. 9. Разрыв образцов:
а – образец вырезан под углом 0° к ориентации волокон;
б – образец вырезан под углом 45° к ориентации волокон

В результате экспериментальных исследований были построены искомые графики, показанные на рис. 10: диаграммы растяжения (рис. 10, а) в разных направлениях и кривые ползучести для разных уровней нагрузок (рис. 10, б) соответственно.

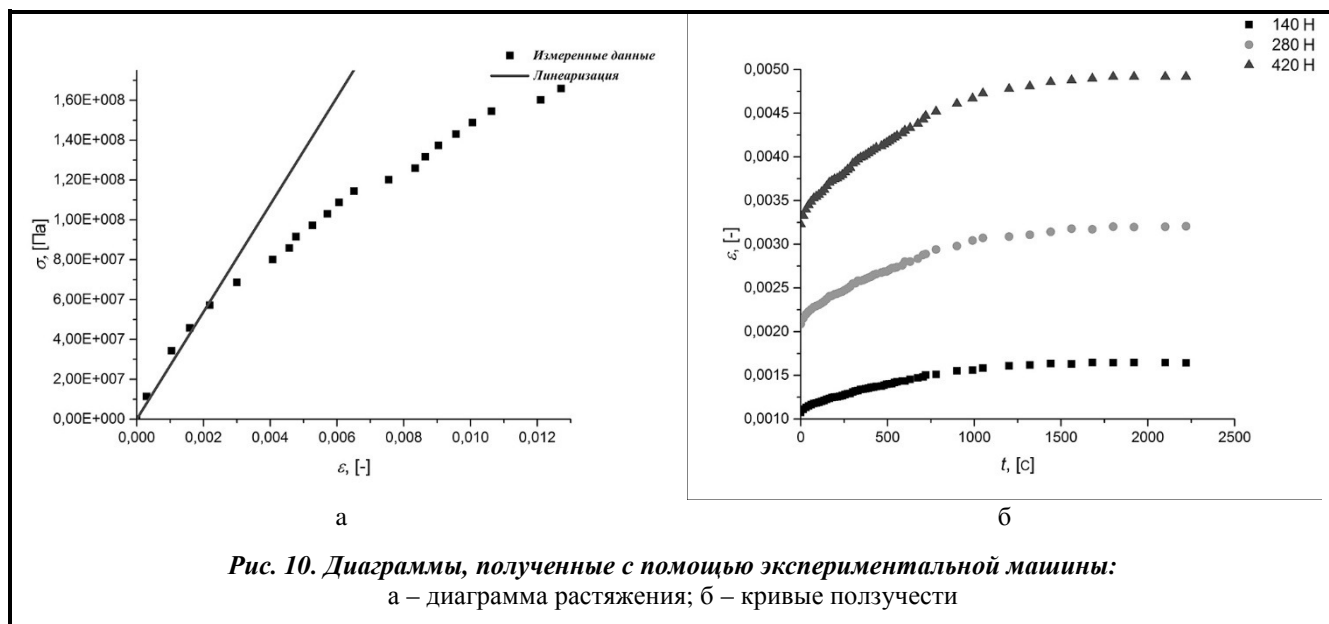


Рис. 10. Диаграммы, полученные с помощью экспериментальной машины:
а – диаграмма растяжения; б – кривые ползучести

После проведения серии экспериментов была установлена высокая повторяемость полученных результатов, их адекватность характерным для данного ПАКМ эффектам, а также применимость разработанной экспериментальной методики к определению механических свойств ПАКМ других типов благодаря достаточному диапазону возможных нагрузок, прикладываемых к образцу посредством экспериментальной машины, и температур, реализуемых с помощью усовершенствованной электрической печи.

Выводы

В результате модернизации экспериментальная машина была адаптирована для проведения исследований высокотемпературной вязкоупругости плоских композиционных образцов. Модифицированные захваты обеспечили эффективное закрепление образцов, которое было подтверждено экспериментами на их разрыв. Разработанный автоматический регулятор температурного режима в электрической печи благодаря способности поддерживать постоянную температуру в пределах $\pm 0.5^\circ\text{C}$ позволил удовлетворить требования стандартов к поддержанию температурного режима при исследовании механических свойств композиционных материалов. Вырезанные образцы обеспечили достаточно точное определение деформаций рабочей части, в результате чего были построены диаграммы растяжения и ползучести рассматриваемого ПАКМ.

Литература

1. Справочник по композиционным материалам: Любин Дж. (ред.). М.: Машиностроение, 1988. 448 с.
2. Карпинос Д. М. Композиционные материалы: справочник. Киев: Наук. думка, 1985. 588 с.
3. Кравчук А. С., Майборода В. П., Уржумцев Ю. С. Механика полимерных и композиционных материалов. М.: Наука, 1985. 304 с.
4. Капитонов А. М., Редькин В. Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 532 с.
5. Побердра Б. Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 336 с.
6. Уорд М. Механические свойства твёрдых полимеров. М.: Химия, 1975. 357 с.
7. Шен М. Вязкоупругая релаксация в полимерах. М.: Мир, 1974. 270 с.
8. Кристенсен Р. М. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 338 с.
9. Адамов А. А., Матвеев В. П., Труфанов Н. А. Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 411 с.

10. Abot J., Yasmin A., Jacobsen A. In-plane mechanical, thermal and viscoelastic properties of a satin fabric carbon/epoxy composite. *Comp. Sci. Technol.* 2004. Vol. 64. P. 263–268. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00279-3](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00279-3)
11. Chan A., Liu X. L. and Chiu W. K. Viscoelastic interlaminar shear modulus of fibre reinforced composites. *Comp. Struct.* 2006. Vol. 75. P. 185–191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.058>
12. Guojun H. A. theoretical and numerical study of crack propagation along a bimaterial interface with applications to IC packaging: a thesis ... doctor of philosophy in engineering / National University of Singapore, 2006.
13. Silva P., Valente T., Azenha M. Viscoelastic response of an epoxy adhesive for construction since its early ages: Experiments and modelling. *Comp. Part B Eng.* 2017. Vol. 116. P. 266–277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.047>
14. Seifert O. E., Schumacher S. C., Hansen A. C. Viscoelastic properties of a glass fabric composite at elevated temperatures: experimental and numerical results. *Comp. Part B. Eng.* 2003. Vol. 34. P. 571–586. doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00078-7](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00078-7)
15. Ciambella J., Paolone A., Vidoli S. A comparison of nonlinear integral-based viscoelastic models through compression tests on filled rubber. *Mech. Mater.* 2010. Vol. 42. P. 932–944. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2010.07.007>
16. Stanier D. C., Patil A. J., Sriwong C. The reinforcement effect of exfoliated graphene oxide nanoplatelets on the mechanical and viscoelastic properties of natural rubber. *Comp. Sci. Technol.* 2014. Vol. 95. P. 59–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.02.007>
17. Shrotriya P., Sottos N. Viscoelastic response of woven composite substrates. *Comp. Sci. Technol.* 2005. Vol. 65. P. 621–634. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.09.002>
18. Park S. J., Liechti K. M., Roy S. Simplified Bulk Experiments and Hygrothermal Nonlinear Viscoelasticity. *Mech. Time-Dependent Mater.* 2004. Vol. 8. P. 303–344. doi: <https://doi.org/10.1007/s11043-004-0942-3>
19. Tzeng J. T., Emerson R. P., O'Brien D. J. Viscoelasticity Analysis and Experimental Validation of Anisotropic Composite Overwrap Cylinders. *Mech. Solids, Struct. Fluids, ASME.* 2012. Vol. 8. P. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-87818>
20. Испытательная техника: справочник: Клюев В. В. (ред.). М.: Машиностроение, 1982. 560 с.
21. Sathishkumar T., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites - a review. *J. Reinf. Plast. Comp.* 2014. Vol. 33. P. 1258–1275. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
22. Stickel J. M., Nagarajan M. Glass Fiber-Reinforced Composites: From Formulation to Application. *Int. J. Appl. Glas. Sci.* 2012. Vol. 3. P. 122–136. doi: <https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2012.00090.x>
23. Yamini S., Young R. J. The mechanical properties of epoxy resins. *J. Mater. Sci.* 1980. Vol. 15. P. 1823–1831. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00550603>
24. Jordan J. L., Foley J. L. Mechanical properties of Epon 826/DEA epoxy. *Mech. Time-Dependent Mater.* 2008. Vol. 12. P. 249–272. doi: <https://doi.org/10.1007/s11043-008-9061-x>
25. Ou Y., Zhu D., Zhang H., Huang L., Yao Y., Li G. Mechanical Characterization of the Tensile Properties of Glass Fiber and Its Reinforced Polymer (GFRP) Composite under Varying Strain Rates and Temperatures. *Polymers.* 2016. Vol. 8. P. 1–16. doi: <https://doi.org/10.3390/polym8050196>
26. Dogan A., Atas C. Variation of the mechanical properties of E-glass/epoxy composites subjected to hygrothermal aging. *J. Compos. Mater.* 2016. Vol. 50. P. 637–646. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998315580451>
27. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons, 1980. 641 p.
28. ASTM D618-13. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing. *Am. Soc. Test. Mater.* 2013. 08.01. doi: <https://doi.org/10.1520/D0618>
29. ASTM D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *Am. Soc. Test. Mater.* 2014. 08.01. doi: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
30. ASTM D2990-17. Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics. *Am. Soc. Test. Mater.* 2017. 08.01. doi: <https://doi.org/10.1520/D2990-17>
31. ASTM D3039/D3039M-17. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. *Am. Soc. Test. Mater.* 2017. 15.03. doi: https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17

Поступила в редакцию 17.01.2018