

*Л. Герайше<sup>a\*</sup>, М. Тарфауи<sup>b</sup>, Х. Османи<sup>c</sup>*

*<sup>a</sup>LMT, University of Jijel, 18000 Jijel, Algeria*

*<sup>b</sup>ENSTA Bretagne, IRDL - UMR CNRS 6027, F-29200 Brest, France*

*<sup>c</sup>LMNM/IOMP, University of Setif-1, 19000 Setif, Algeria*

## **ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ В ГОРЯЧЕЙ ВОДЕ НА КОМПРЕССИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ<sup>1</sup>**

*L. Gueraiche\*, M. Tarfaoui, and H. Osmani*

### **EFFECTS OF HOT-WATER AGING ON THE COMPRESSION PROPERTIES OF E-GLASS/EPOXY COMPOSITES AT VARYING STRAIN RATES**

**Keywords:** glass-fiber-reinforced plastics, unidirectional reinforcement, hygrothermal effects, compressive strength, property approximation

The effects of hot-water aging on the quasi-static and dynamic compression properties of unidirectional E-glass/epoxy laminates were investigated. E-glass/epoxy specimens were aged in water at 60°C for 4900 h and then aged and unaged specimens were tested in tension at a rate of  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  and by a split Hopkinson pressure bar apparatus at varying strain rates. Their diffusion behavior was successfully described by the two-stage model whose parameters were found by the nonlinear regression method. The strain-rate-sensitivity of aged and unaged E-glass-reinforced epoxy specimens in the longitudinal direction was studied. Their dynamic and static compression properties were compared for specimens with the same dimensions. Empirical models were proposed to predict dynamic properties as functions of strain rate. SEM micrographs showed a low degradation of the resin matrix and fiber-matrix interface at hot-water aging for a time up to 4900 h.

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [gueraiche.larbi@univ-jijel.dz](mailto:gueraiche.larbi@univ-jijel.dz)  
Corresponding author: [gueraiche.larbi@univ-jijel.dz](mailto:gueraiche.larbi@univ-jijel.dz)

<sup>1</sup>Перевод с англ.

**Ключевые слова:** стеклопластики волокнисто-армированные, армирование однонаправленное, эффекты гидротермические, прочность при сжатии, аппроксимация свойств

Исследовано влияние старения в горячей воде на квазистатические и динамические свойства при сжатии однонаправленных слоистых эпоксидных стеклопластиков. Образцы стеклопластика выдерживали в воде при 60 °С в течение 4900 ч. Затем состаренные и несостаренные образцы испытывали на сжатие с использованием универсальной испытательной машины для квазистатических испытаний со скоростью деформирования  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и с помощью разрезного стрержня Гопкинсона при разной скорости деформирования для динамических испытаний. Диффузию влаги успешно описали двухэтапной моделью, параметры которой определили методом нелинейной регрессии. Изучили чувствительность к скорости деформирования состаренных и несостаренных образцов стеклопластика в продольном направлении. Сравнили динамические и статические свойства при сжатии образцов одного размера. Предложили эмпирические модели для предсказания динамических свойств в зависимости от скорости деформирования. СЭМ-микрофотографии продемонстрировали малую степень деградации матрицы и поверхности раздела волокно—матрица при старении в горячей воде в течение до 4900 ч.

## Введение

Композитные материалы, используемые в судостроении, подвержены воздействию морской среды, ударам других судов, плавучих обломков, доков, посадки на мель, а также в ходе изготовления [1, 2]. Поэтому очень важно понимать влияние разных условий окружающей среды, например, старения в горячей воде, на механические свойства композитных материалов при ударных нагрузках.

Для объяснения процессов влагопоглощения, наблюдаемых в волокнисто-армированных стеклопластиках, можно использовать разные модели диффузии. Самая простая — одномерная изотропная модель Фика [3], но часто наблюдаются отклонения от нее, особенно для волокнисто-армированных пластиков с высоким содержанием пустот [4]. В [5] продемонстрировали нефиковское поведение однонаправленных эпоксидных стеклопластиков. Двухэтапное описание поведения с регулируемыми стадиями диффузии и релаксации, предложенное в [6], успешно применили при изучении влагопоглощения эпоксидными стеклопластиками. Возможные механизмы влагопоглощения связаны с объемным распределением воды в полимерной сетке и ее поглощением на поверхности вакуолей [7]. Модель типа Ленгмюра использовали для предсказания двухэтапной диффузии влаги в эпоксидных композитах [8]. Эта модель аномальной диффузии

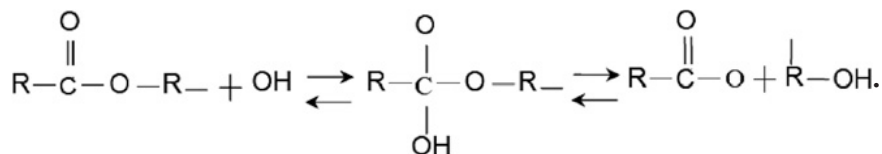
рассматривает существование подвижных и связанных молекул воды внутри полимерной сетки.

Чувствительность волокнисто-армированных композитов к скорости деформирования и ориентации волокон широко исследовали на образцах, не подвергавшихся воздействию воды. В [9] динамическое поведение однонаправленных эпоксидных стеклопластиков с ориентацией волокон  $0, 10, 30, 45, 60, 90^\circ$  при скорости деформирования  $265 \text{ с}^{-1}$  изучали с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). Установили, что композиты при всех рассмотренных ориентациях волокон чувствительны к скорости деформирования. Динамическая прочность превышала квазистатическую почти на 100% при ориентации волокон  $0^\circ$ , на 80% — при  $10^\circ$  и примерно на 45% — при всех остальных ориентациях. Разрушение преимущественно путем расщепления в силу растяжения имело место при ориентации  $0^\circ$  и от сдвига — при других ориентациях. В [10] динамические характеристики толстых однонаправленных (с укладкой  $[0^\circ]$  и  $[90^\circ]$ ) и ортогонально армированного (с укладкой  $[(0^\circ_8 / 90^\circ_8)_2 / \bar{0}^\circ_8]_s$ ) эпоксидных углепластиков при скорости деформирования до  $1800 \text{ с}^{-1}$  определяли методом падающего груза и РСГ. Однонаправленный с укладкой  $[0^\circ]$  и ортогонально армированный углепластики продемонстрировали значительное увеличение прочности и предельной деформации с повышением скорости деформирования и лишь небольшое увеличение модуля упругости. Углепластик с укладкой  $[90^\circ]$  с повышением скорости деформирования продемонстрировал увеличение модуля упругости и прочности, но без значительных изменений предельной деформации. В [11] исследовали чувствительность к скорости деформирования ортогонально армированных угле- и стеклопластиков с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$  при скорости деформирования  $10^{-3}$  и  $450 \text{ с}^{-1}$ . С повышением скорости деформирования наблюдали увеличение динамической прочности стеклопластика, тогда как разрушающая деформация образцов обоих композитов уменьшалась. В [12] исследовали реакцию однонаправленного (с укладкой  $[0^\circ]_{32}$ ) и ортогонально армированного (с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]_{16}$ ) эпоксидных углепластиков при высокоскоростном сжатии с использованием установки РСГ при трех разных скоростях деформирования. Образцы ортогонально армированного углепластика испытывали при нагружении в плоскости и по толщине. Образцы однонаправленного углепластика нагружали вдоль и поперек армирующих волокон. Динамическая прочность (за исключением таковой ортогонально армированного углепластика, нагруженного по толщине) и жесткость значительно возросли по сравнению со статическими значениями в исследуемом диапазоне скоростей деформирования.

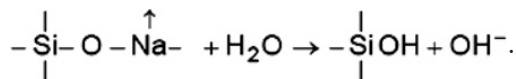
В [13—15] исследовали влияние укладки слоев в эпоксидном стеклопластике на его поведение при динамическом сжатии в плоскости в диапазоне скорости деформирования  $200—2000 \text{ с}^{-1}$  при ориентации волокон  $0, \pm 20, \pm 30, \pm 45, \pm 60, \pm 70, 90^\circ$ . Результаты показали высокую чувствительность материала к скорости деформирования и ориентации волокон. Акты разру-

шения были разными в зависимости от укладки слоев в стеклопластике. В [16] динамическое сжатие состаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[\pm 55^\circ]_{20}$  изучали с использованием РСГ в диапазоне скорости деформирования  $560\text{—}1025\text{ с}^{-1}$ . Динамический модуль упругости зависел от скорости деформирования, но наблюдали пороговый эффект динамической прочности и предельной деформации. Пороговый эффект объяснили вязкоупругой природой полимерной матрицы, характером накопления повреждений, зависящим от времени, и значительным повышением температуры в образцах. Образцы стеклопластика с укладкой  $[\pm 55^\circ]_{20}$  разрушались преимущественно в силу расслоения, сдвига и расщепления на несколько блоков.

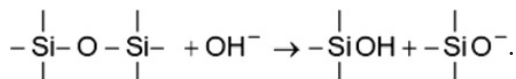
Дегградация физических свойств полимеров происходит в силу комбинации процессов физического и химического старения. К физическим процессам относят пластификацию, релаксацию и набухание полимера. Первичный процесс химической дегградации — это гидролиз полимерной матрицы [17]. Полярная природа молекулы воды позволяет ей устанавливать водородные связи с гидроксильными группами, общими для полимерных цепей, разрывая существовавшие ранее межцепочные водородные связи. Такие модификации водородной связи между полимером и молекулами воды приводят к пластификации с увеличением сегментарной подвижности и набуханию с увеличением длины межцепочной связи, как показано в уравнении [18]



Дегградация стекловолокон в воде происходит путем выщелачивания и травления. Главная реакция при растворении стекла в воде — выщелачивание, означающее диффузию ионов щелочных металлов из стекла, как показано в уравнении [18]



Травление — вторая важная реакция, в которой ионы гидроксила разрушают  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ , как показано в уравнении [18]



Разрушение поверхности раздела между волокнами и матрицей затруднено. В [19] предположили, что это происходит за счет трех механизмов повреждения: осмотического растрескивания матрицы, потери межповерхностного сцепления и расслоения.

Почти во всех предыдущих работах, в которых исследовали влияние погружения в горячую воду и влаги на механические свойства волокнисто-армированных композитов, сделан вывод о негативном влиянии ста-

рения в горячей воде. Диффузия воды в композитах с полимерной матрицей способна вызвать набухание, пластификацию, уменьшение остаточной прочности и температуры стеклования  $T_g$ , деградацию характеристик материала. В [20] исследовали влияние старения в горячей воде на разрушение при растяжении механических соединений эпоксидных стеклопластиков и наблюдали уменьшение их прочности при более высокой температуре воды; деградация происходила постепенно при длительном погружении. В [21] изучали влияние гигротермического старения на свойства эпоксидных углепластиков при динамическом сжатии по толщине. Углепластики продемонстрировали чувствительность характеристик разрушения к скорости деформирования при одинаковой энергии удара и при низких, и при высоких температурах. Наблюдали, что поглощенная энергия линейно зависела от скорости деформирования при низких температурах и была относительно постоянной при высоких температурах. В [22] изучали влияние гигротермического старения на поведение клеевых композитных соединений при высоких скоростях деформирования. Результаты показали, что воздействие температуры 50 °С и относительной влажности 80% уменьшает максимальное напряжение с увеличением времени старения при нагрузках с высокой скоростью деформирования.

Таким образом, выполнено значительное количество исследований волокнисто-армированных несостаренных композитов при малых и высоких скоростях деформирования и стеклопластиков, подвергнутых гидротермальному старению, при квазистатических нагрузках. Однако мало или совсем отсутствуют работы по экспериментальному изучению влияния эффектов гигротермического старения на свойства однонаправленных эпоксидных стеклопластиков при динамическом сжатии. Поэтому цель данного исследования — оценка влияния старения в горячей воде при температуре 60 °С в течение 4900 ч на модуль упругости, максимальное напряжение и соответствующую деформацию однонаправленного эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при испытаниях на сжатие с помощью РСГ и квазистатического нагружения с использованием универсальной испытательной машины Zwick. Свойства состаренных и несостаренных слоистых композитов оценивали экспериментально. Полученные результаты показали, что старение в горячей воде ухудшает свойства эпоксидных стеклопластиков при сжатии.

## 1. Материалы и методы

**1.1. Материал и процесс изготовления.** Целевой однонаправленный эпоксидный стеклопластик с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  изготовили из ткани E-стекловолокон 2400 текс и связующего, включающего преполимер EPO-LAM, отвердитель EPO-LAM 2020 и ускоритель 2020 (Axson Technologies). Ткань полотняного переплетения: 90% пряжей в основе и 10% в утке. Однонаправленные панели с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  изготовили способом инфузии. Для изготовления стеклопластика из смолы EPO-LAM с температурой стеклования 80 °С и максимальными значениями механических свойств,

Табл. 1

Механические свойства чистой смолы EPO-LAM 2020 после отверждения при температуре 60 °С в течение 16 ч или 24 ч при комнатной температуре

Свойство	Стандарт	Значение
Модуль упругости при изгибе, МПа	ISO 178 :2001	3100
Прочность при изгибе, МПа	ISO 178 :2001	126
Прочность при растяжении, МПа	ISO 527 :1993	78
Твердость по Шору D 15	ISO 868 :2003	88
Температура стеклования, °С	ISO 11359: 2002	80
Время извлечения из формы при комнатной температуре без ускорителя, ч	LT 051: 1998	48
Полное время отверждения при комнатной температуре, дни	—	7

указанными в табл. 1, панели отверждали при 60 °С в течение 16 ч. Квадратные панели размером 500×500 мм разрезали на кубические образцы размером 13×13×13 мм (рис. 1). Объемное содержание стекловолокон, определенное путем выжигания, ~ 53%.

**1.2. Процесс старения.** Для ускорения старения образцов однонаправленного эпоксидного стеклопластика использовали климатическую камеру Ascott. Образцы стеклопластика размером 13×13×13 мм перед испытанием на сжатие с помощью РСГ погрузили в водопроводную воду при температуре 60 °С на время до 4900 ч. Значение водопоглощения усредняли по данным пяти образцов. Первые четыре дня мониторинг водопоглощения проводили ежедневно, т.е. каждые 24 ч, а затем с интервалом 168 ч (через семь дней) до достижения 4900 ч выдержки. Для каждого измерения водопоглощения образец вынимали из водяной бани, очищали и взвешивали на прецизионных весах Precisa XT220A ( $\pm 0,1$  мг). После взвешивания образец снова погружали в воду. Температура стеклования  $T_g$  смолы EPO-LAM 2020

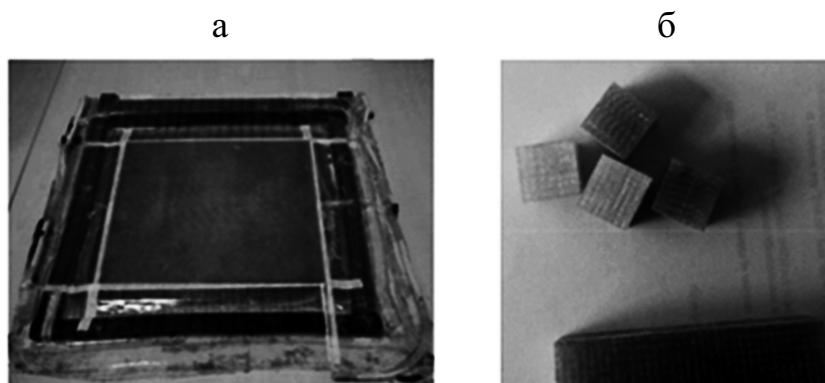


Рис. 1. Панели, изготовленные методом инфузии (а) и кубические образцы (б).

равна 80 °С, что объясняет выбор температуры старения 60 °С в соответствии данными работы [23], рекомендовавшей температуру термического старения эпоксидных смол на 20 °С меньше температуры стеклования.

Содержание воды  $M_t$ , поглощенной каждым образцом, рассчитывали в соответствии с его массой до  $w_0$  и после  $w_t$  экспонирования:

$$M_t = \frac{w_t - w_0}{w_0} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Изменение размеров кубических образцов (длины  $L$ , ширины  $W$  и высоты  $H$ ) измеряли штангенциркулем с точностью до  $10^{-2}$  мм. Для проведения этих измерений при комнатной температуре образцы извлекали из контейнеров для кондиционирования. Для измерения размеров образцов из эпоксидного стеклопластика использовали три образца в сухом состоянии и после 4900 ч содержания в воде при 60 °С.

**1.3. Испытания на сжатие с помощью разрезного стержня Гопкинсона (РСГ),** часто называемого стержнем Кольского, обычно используют для изучения поведения материалов при высокой скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$  в диапазоне от 102 до 104 с<sup>-1</sup>. Установка РСГ лаборатории IRDL (Франция), использованная в настоящем исследовании, состояла из ударника (0,4 м) с закругленным концом, падающего стержня (1,985 м) и передающего стержня (1,845 м) (рис. 2). Три стержня диаметром 20 мм изготовлены из мартенситностареющей стали. Ударник приводили в движение с начальной скоростью удара, зависящей от давления пневматической пушки. Удар по свободному торцу падающего стержня вызвал волну сжимающего напряжения, которая распространялась через падающий стержень к поверхности раздела падающий стержень—образец. В силу несоответствия импеданса образец—стержень часть волны напряжения отражалась в падающем стержне, проходила сквозь образец и передающий стержень. Пара полумостов

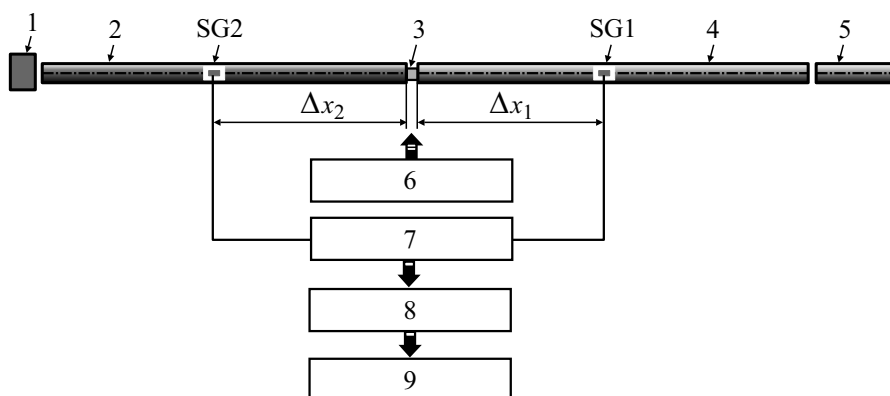


Рис. 2. Схема установки разрезного стержня Гопкинсона (лаборатория IRDL, Франция): 1 — ограничитель; 2 — передающий стержень; 3 — образец; 4 — падающий стержень; 5 — ударник; 6 — высокоскоростная фотография; 7 — мосты Уитсона; 8 — цифровой осциллограф Nicolet Odyssey; 9 — компьютер.



Уитстона, расположенных на расстоянии  $\Delta x_1 = 0,9635$  м и  $\Delta x_2 = 0,959$  м от поверхностей раздела образец—стержень, использовали для регистрации волн деформации (см. рис. 2).

Напряжения тензодатчиков преобразовывали в значения падающей  $\varepsilon_i$ , отраженной  $\varepsilon_r$  и прошедшей  $\varepsilon_t$  деформаций с помощью уравнения

$$\varepsilon(t) = \frac{2\Delta Em(t)}{k(U_0 - 2\Delta Em(t))} = \frac{1}{\frac{kU_0}{2\Delta Em(t)} - k}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon(t)$ ,  $U_0$ ,  $\Delta Em(t)$  — деформация, питающее и выходное напряжение полумоста соответственно;  $k$  — коэффициент тензочувствительности ( $k = k_{\text{inc}} = k_{\text{trans}} = 2,105$ ). Измерения напряжения тензодатчиков регистрировали с помощью высокоскоростной системы сбора данных Nicolet Odyssey 3,26 с частотой отсчетов 1 МГц.

Для определения динамической зависимости между напряжениями и деформациями для РСГ необходимо обеспечить шесть условий [16]:

- 1) стержни должны оставаться упругими;
- 2) распространение волны напряжения в стержнях одномерное;
- 3) поверхности раздела образец—стержень всегда остаются плоскими;
- 4) эффекты инерции и трения в образце должны быть минимизированы;
- 5) скорость деформирования должна быть равномерной, а напряжение образца должно быть в равновесии;
- 6) образец должен быть несжимаемым.

После переноса историй тензодатчиков на поверхности образца с помощью быстрого преобразования Фурье для коррекции дисперсии инженерное напряжение, скорость деформирования и деформацию вычислили следующим образом:

$$\sigma(t) = \frac{EA}{2A_s} \left[ \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t) \right] \quad (\text{трехволновой анализ}), \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_b}{L_s} \varepsilon_r(t), \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_b}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt, \quad (5)$$

где  $E$ ,  $A$ ,  $c_b$  — модуль Юнга, площадь поперечного сечения и скорость упругих волн в стержнях соответственно;  $L_s$  и  $A_s$  — первоначальная длина и площадь поперечного сечения образца соответственно.

Истинное напряжение  $\sigma_T(t)$  и истинную деформацию  $\varepsilon_T(t)$  получили из инженерного напряжения и деформации:

$$\sigma_T(t) = (1 - \varepsilon(t))\sigma(t), \quad (6)$$



$$\varepsilon_T(t) = -\ln(1 - \varepsilon(t)), \quad (7)$$

где  $\varepsilon(t)$  и  $\sigma(t)$  — техническое напряжение и деформация соответственно. (Для получения более подробной информации о настройке установки разрезного стержня Гопкинсона для сжатия, предположениях о достоверности, ограничивающих импульсах и поправке на дисперсию см. [16].)

Испытания на динамическое сжатие состаренных и несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  проводили в плоскости вдоль волокон в диапазоне скорости деформирования  $\dot{\varepsilon} = 500\text{—}710 \text{ с}^{-1}$ . При анализе экспериментальных результатов учитывали величину первого пика скорости деформирования.

Испытания на динамическое сжатие состаренных образцов можно разделить на испытания при низком давлении, демонстрирующие упругий отклик с небольшим повреждением, и испытания при высоком давлении с преобладающим макроскопическим повреждением. На основе метода проб и ошибок выбрали четыре значения давления удара  $P$ : низкое (1,3 бар), два промежуточных (1,5 и 1,6 бар) и разрушающее (2 бар), соответствующих средним скоростям деформирования 564, 596, 606 и 663  $\text{с}^{-1}$ . Было сложно провести динамические испытания состаренных и несостаренных образцов при одинаковых скоростях деформирования, поскольку их проводили при фиксированных значениях  $P$ . Тем не менее удары с давлением 0,7, 0,8 и 0,9 бар позволили провести динамические испытания на сжатие несостаренных образцов стеклопластика в диапазоне скорости деформирования  $\dot{\varepsilon} = 500\text{—}710 \text{ с}^{-1}$ . Для обеспечения воспроизводимости результатов при каждом значении давления удара испытали не менее двух образцов. Историю повреждения образцов стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  отслеживали по месту с помощью высокоскоростной видеокамеры Photron Fastcam и изучили состояние образцов после динамического сжатия.

**1.4. Квазистатические испытания.** Для сравнения динамического отклика на сжатие с квазистатическим на универсальной испытательной машине Zwick при постоянной скорости перемещения траверсы 1 мм/мин ( $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ) выполнили квазистатические испытания на сжатие в плоскости как состаренных, так и несостаренных образцов однонаправленного эпоксидного стеклопластика, имеющих одинаковые размеры. Для воспроизводимости результатов выполнили четыре испытания. Зависимости нагрузка—перемещение в каждом испытании регистрировали с использованием программного обеспечения для испытания материалов testXpert II.

**1.5. Определение характеристик с помощью СЭМ.** Для анализа механизмов деградации эпоксидного стеклопластика при старении в горячей воде использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) MP12000040 (UDCMA, Сетиф, Алжир).

## 2. Результаты и обсуждение

**2.1. Водопоглощение и изменение размеров.** На рис. 3 показана зависимость водопоглощения  $M_t$  как функции квадратного корня времени  $\sqrt{t}$  для однонаправленного эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ . Данные рисунка по длительному водопоглощению иллюстрируют двухэтапную диффузию, начинающуюся с быстрой диффузии по закону Фика, за которой следует медленное постепенное увеличение водопоглощения. На первом этапе водопоглощение линейно зависело от величины  $\sqrt{t}$ , что можно объяснить диффузией воды в уже существующие элементы свободного объема (дефекты и поры) композита и водопоглощением эпоксидной смолы [24]. Вторая стадия характеризует релаксацию полимера, включающую более крупномасштабное и, следовательно, более медленное сегментное движение и приводит к перераспределению элементов свободного объема и зависящему от времени дополнительному водопоглощению [25]. Постепенная деградация эпоксидной матрицы и поверхности раздела волокно—матрица обусловили увеличение полостей (рис. 4) и вынудило образцы однонаправленного стеклопластика продолжать водопоглощение [20]. Диффузионное поведение однонаправленного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  успешно описано двухэтапной диффузионной моделью, предложенной в [6]:

$$M_t \approx M_{\infty 0} (1 + k\sqrt{t}) \left\{ 1 - \exp \left[ -7,3 \left( \frac{Dt}{h^2} \right)^{0,75} \right] \right\}, \quad (8)$$

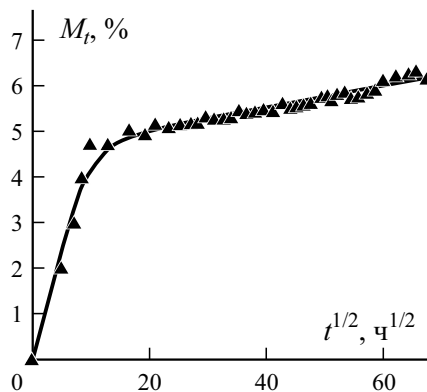


Рис. 3. Зависимость водопоглощения  $M_t$  от квадратного корня времени  $t$  однонаправленного эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , состаренного погружением в воду при  $60^\circ\text{C}$ : (—) — подгонка методом наименьших квадратов экспериментальных данных с помощью модели двухэтапной диффузии (8) при

$$M_{\infty 0} = 4,56\%, \quad k = 0,0053 \text{ ч}^{-1/2}, \quad h = 0,013 \text{ м}, \quad D = 3,37 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{ч}.$$

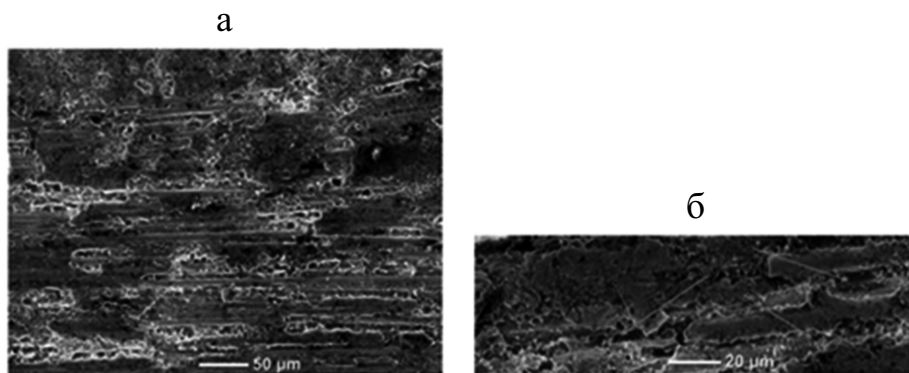


Рис. 4. Микрофотографии СЭМ фронтальной поверхности разрушения состаренного образца эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , сделанные с увеличением 250 (а) и 700 $\times$  (б), демонстрирующие малое повреждение поверхности раздела волокно—матрица и смолы даже после 4900 ч погружения в горячую воду (а) и локальную потерю сцепления и уменьшение количества смолы вокруг волокон (указано стрелками) (б).

где  $M_{\infty 0}$  — максимальное водопоглощение (псевдоравновесное значение) на первой стадии с преобладанием диффузии; член  $(1 + k\sqrt{t})$  характеризует управляемую релаксацией вторую стадию, где  $k$  связан со скоростью релаксации;  $D$  — коэффициент диффузии;  $t$  — время;  $h$  — толщина образца [26, 27]. Параметры модели двухэтапной диффузии, определенные с помощью программы Excel методом наименьших квадратов, путем аппроксимации экспериментальных гравиметрических данных, приведены на рис. 3.

Как видно из данных табл. 2, длина образцов возрастала с увеличением времени старения, т.е. в направлении стекловолокон происходило набухание стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , которое представляло предпочтительный путь для диффузии воды. Наблюдали усадку в поперечном направлении и по толщине, где волокна препятствовали диффузии воды.

Табл. 2

Изменение размеров образцов в силу водопоглощения при 60 $^\circ\text{C}$

Время, ч	Номер образца	$L$ , мм	$H$ , мм	$W$ , мм	Объем, мм $^3$
0	1	12,95	12,55	13,03	2117,67
	2	12,88	12,54	13,13	2120,69
	3	12,06	12,53	12,95	1956,90
4900	1	13,50	12,37	12,36	2064,06
	2	13,15	12,53	12,86	2118,94
	3	13,67	12,50	12,38	2115,43

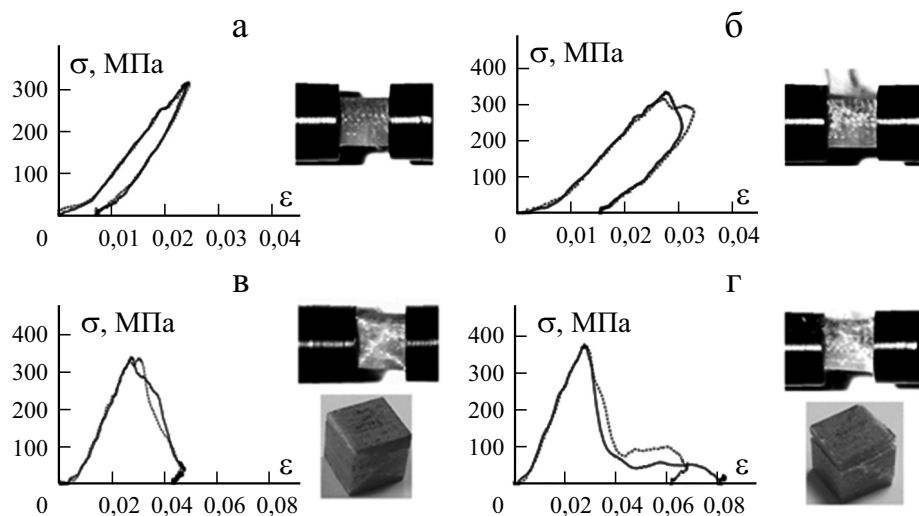


Рис. 5. Воспроизводимость кривых напряжение—деформация  $\sigma$  —  $\varepsilon$  и состояние состаренных образцов однонаправленного эпоксидного стеклопластика при  $\dot{\varepsilon} = 546$  (а); 596 (б); 606 (в); 663  $\text{c}^{-1}$  (г) и  $P = 1,3, 1,5, 1,6, 2$  бар. (—) и (- - -) — испытание 1 и 2.

Зависимость между водопоглощением и изменением размеров в продольном направлении волокон была линейной.

**2.2. Механическое поведение.** Динамические испытания провели на состаренных и несостаренных образцах эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ . Данные рис. 5 и 6 демонстрируют хорошую повторяемость результатов при каждом значении давления удара.

На рис. 7 приведены кривые деформирования напряжение—деформация  $\sigma$ — $\varepsilon$  состаренных и несостаренных образцов стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , подвергнутых статическому и динамическому сжатию в плоскости в направлении волокон. Состаренные образцы подвергли удару при четырех значениях  $P = 1,3, 1,5, 1,6$  и 2 бар, соответствующих средней скорости

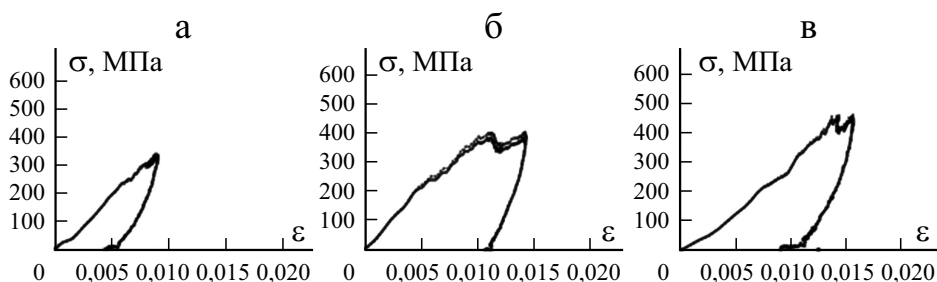


Рис. 6. Воспроизводимость кривых напряжение—деформация  $\sigma$  —  $\varepsilon$  несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика, испытанных при динамическом сжатии и  $\dot{\varepsilon} = 519$  (а); 611 (б); 733  $\text{c}^{-1}$  (в) и  $P = 0,7, 0,8, 0,9$  бар. (—) и (- - -) — испытание 1 и 2.

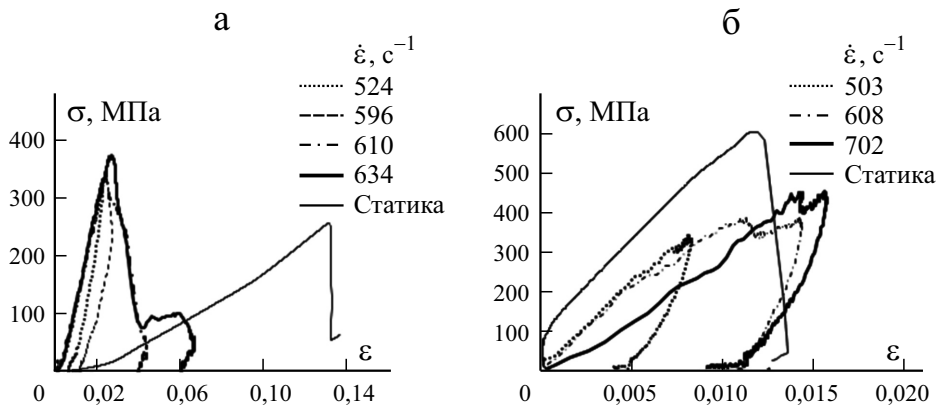


Рис. 7. Типичные кривые напряжение—деформация  $\sigma$ — $\varepsilon$  состаренных (а) и несостаренных (б) образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , испытанных динамическим сжатием в плоскости с разной скоростью деформирования  $\dot{\varepsilon}$ .

деформирования  $\dot{\varepsilon} = 546, 596, 606$  и  $663 \text{ c}^{-1}$  (см. рис. 5). Зависимости скорость деформирования—время на рис. 8—а — экспериментальные кривые реальных образцов, а не усредненные. Эволюция скорости деформирования чувствительна к величине давления удара  $P$  в камере пневматической пушки. Сначала скорость деформирования быстро возрастала при испытании неповрежденного образца при давлении 1,3 бар, а затем уменьшалась и оставалась почти постоянной. Скорость деформирования достигла отрицательных значений, соответствующих упругому последствию образца. Скорость деформирования не была постоянной во второй фазе при ударе с давлением от 1,5 до 2 бар (см. рис. 8—а). Наличие второго пика на кривых скорость деформирования—время свидетельствует о появлении макроскопических повреждений [14, 15]. Критическое давление их появления при-

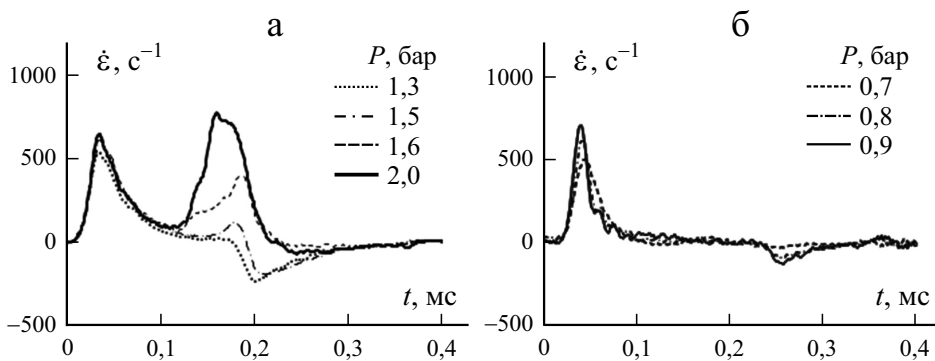


Рис. 8. Типичные кривые скорость деформирования—время  $\dot{\varepsilon}$ — $t$  состаренных (а) и несостаренных (б) образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , испытанных динамическим сжатием в плоскости с разным давлением удара  $P$ .

мерно 1,5 бар. Когда давление удара достигло 2 бар (скорость деформирования  $663 \text{ с}^{-1}$ ), второй пик зависимости скорости деформирования от времени превысил первый; однако упругое последствие образца стало незначительным. Основные характеристики динамического сжатия для состаренных и несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ , подвергнутых нагружению в плоскости при разном давлении удара, приведены в табл. 3.

Типичные кривые напряжение—деформация, полученные в статических и динамических испытаниях со скоростью деформирования 524, 596, 610 и  $634 \text{ с}^{-1}$ , показаны на рис. 7—*a*. Видно, что поведение состаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при динамическом сжатии при начальной линейной упругой деформации было одинаковым и модуль упругости практически не зависел от скорости деформирования. Динамическая жесткость состаренных образцов была больше статической. Среднее значение жесткости при статическом нагружении 2,8 ГПа, а при динамическом — 17,1, 17,4, 16,2 и 18,0 ГПа со скоростью деформирования 546, 596, 606 и  $663 \text{ с}^{-1}$  соответственно. Это свидетельствует о наличии механизма ужесточения при увеличении скорости деформирования от квазистатической до динамической, который может быть связан с изменением последовательности прогрессирующего разрушения стеклопластика при малой скорости деформирования, когда за разрушением матрицы следует разрушение волокон [11]. Максимальное напряжение, соответствующее моменту потери несущей способности образца, при динамическом нагружении было больше, чем при статическом, и возрастало с увеличением скорости деформирования. Среднее значение максимального напряжения при квазистатическом нагружении 254 МПа и 319, 326, 341 и 373 МПа — при динамическом со скоростью 546, 596, 606 и  $663 \text{ с}^{-1}$  соответственно. Увеличение максимального напряжения со скоростью деформирования может быть связано с поведением при сдвиге и изменением мод разрушения [28]. Испытания выявили остаточную деформацию образцов, возрастающую с увеличением скорости деформирования. В силу разных мод разрушения кривые напряжение—деформация продемонстрировали разную степень нелинейности. Деформация, соответствующая максимальному напряжению, при статическом нагружении была больше, чем при динамическом. Аналогичную тенденцию наблюдали в [11] и высказали предположение о том, что при малых скоростях нагружения у образцов эпоксидного стеклопластика было достаточно времени для распределения приложенной нагрузки, чтобы подвергнуться постоянной деформации. Однако при быстром нагружении материал имел тенденцию к более хрупкому поведению, обусловившему меньшую деформацию при максимальном напряжении. Значение деформации при максимальном напряжении практически не зависело от скорости деформирования и у состаренных образцов было больше. При максимальном напряжении среднее значение деформации при статическом нагружении 13,08% и 2,49, 2,73, 2,82 и 2,71% — при динамическом со скоростью деформирования 546, 596, 606 и  $663 \text{ с}^{-1}$  соответственно.

Табл. 3

Свойства состаренных и несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при динамическом сжатии в плоскости с разным давлением удара  $P$

Номер испытания	$L \times W \times H$ , мм	$P$ , бар	$\dot{\varepsilon}$ , $\text{с}^{-1}$	$E_c$ , ГПа	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\varepsilon_{\sigma_{\max}}$ , %
Несостаренные образцы						
1	12,61×12,51×13,87	0,7	503	45,2	341	0,88
2	12,87×12,73×13,54		535	46,4	331	0,87
Среднее			519	45,8	336	0,88
STDEV.P			16	0,6	5	0,01
1	12,11×12,42×13,32	0,8	608	49,6	384	1,40
2	12,34×12,69×13,66		614	57,7	403	1,41
Среднее			611	53,7	394	1,41
STDEV.P			3	4,0	10	0,01
1	11,91×12,38×13,52	0,9	702	31,6	451	1,55
2	12,63×12,56×13,11		763	31,9	462	1,56
Среднее			734	31,8	457	1,56
STDEV.P			31	0,2	6	0,01
Состаренные образцы						
1	13,23×13,13×12,73	1,3	524	17,2	317	2,36
2	13,19×13,01×12,78		567	17,1	321	2,62
Среднее			546	17,1	319	2,49
STDEV.P			22	0,0	2	0,13
1	13,31×13,00×12,70	1,5	597	18,5	335	2,75
2	13,09×13,35×12,71		595	16,2	317	2,70
Среднее			596	17,4	326	2,73
STDEV.P			1	1,2	9	0,02
1	13,42×13,10×12,80	1,6	611	15,9	342	2,71
2	13,00×13,14×12,74		601	16,5	340	2,92
Среднее			606	16,2	341	2,82
STDEV.P			5	0,3	1	0,10
1	13,15×13,08×12,60	2	692	17,8	376	2,76
2	13,08×13,03×12,70		634	18,3	370	2,66
Среднее			663	18,0	373	2,71
STDEV.P			29	0,2	3	0,05

На рис. 7—б и 8—б показаны типичные кривые напряжение—деформация и скорость деформирования—время несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при статическом и динамическом нагружении со скоростью  $503 \text{ с}^{-1}$  (0,7 бар),  $608 \text{ с}^{-1}$  (0,8 бар) и  $702 \text{ с}^{-1}$  (0,9 бар). После динамического нагружения сжатием в несостаренных образцах не



выявили явных признаков макроскопических повреждений, но могли быть микроскопические дефекты. Из данных рис. 8—б видно, что скорость деформации быстро увеличивалась до максимального значения, которое возросло с увеличением давления удара, а затем уменьшалось и оставалось почти постоянным. Упругое последствие образцов было практически незначительным. Испытания на динамическое сжатие с помощью РСГ провели при фиксированном давлении 0,7, 0,8 и 0,9 бар, соответствующем средней скорости деформирования 519, 611 и 733 с<sup>-1</sup>. Для сравнения результатов динамического нагружения состаренных и несостаренных образцов экспериментальные данные интерполировали при одинаковой скорости деформирования по формулам (10), (12) и (14), полученным путем подгонки динамических свойств (см. рис. 7—б). Динамическая жесткость несостаренных образцов была немного больше статической, что также может быть связано с изменением последовательности прогрессирующего разрушения стеклопластика при малых скоростях деформирования [11]. Среднее значение жесткости при статическом нагружении 46,6 ГПа и 45,8, 53,7, 31,8 ГПа — при динамическом со скоростью деформирования 519, 611 и 733 с<sup>-1</sup> соответственно. Интерполированные значения модуля упругости при динамическом сжатии 50,1, 53,4, 53,3, 48,2 ГПа при скорости 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно показали небольшую тенденцию увеличения—уменьшения с увеличением скорости деформирования. Значение статической жесткости 46,6 ГПа было меньше, чем интерполированные значения динамической жесткости. В отличие от состаренных образцов максимальное напряжение несостаренных образцов при динамическом нагружении было меньше, чем при статическом. Максимальное напряжение при квазистатическом нагружении 600 МПа и 354, 385, 391, 422 МПа — при динамическом со скоростью деформирования 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно. Деформация, соответствующая максимальному напряжению, при статическом нагружении была близка к таковой при динамическом нагружении со скоростью 546 с<sup>-1</sup>. Значение деформации, соответствующей максимальному напряжению при статическом нагружении 1,16% и 1,07, 1,34, 1,38, 1,54% — при динамическом со скоростью 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно. Максимальное напряжение и соответствующая ему деформация несостаренных образцов возрастали с увеличением скорости деформирования.

Использование эмпирических соотношений, чувствительных к скорости деформирования, позволяет получить надежные данные для инженерных применений при моделировании динамического отклика композитных материалов. Наилучшая подгонка характеристик динамического сжатия в плоскости на основе экспериментальных данных о деформировании эпоксидного стеклопластика с укладкой [0°]<sub>40</sub> позволила предложить следующие нелинейные эмпирические модели состояния:

$$E_c = 23,58 \cdot 10^{-5} \dot{\varepsilon}^2 - 0,278\dot{\varepsilon} + 98,7 \text{ (состаренный)}, \quad (9)$$

$$E_c = -12,4 \cdot 10^{-4} \dot{\varepsilon}^2 + 1,483\dot{\varepsilon} - 390 \text{ (несостаренный)}, \quad (10)$$

$$\sigma_{\max} = 31,75 \cdot 10^{-4} \dot{\varepsilon}^2 - 3,37 \dot{\varepsilon} + 1211,7 \text{ (состаренный)}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\max} = 350,4 \ln(\dot{\varepsilon}) - 1854,3 \text{ (несостаренный)}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\sigma_{\max}} = -5,39 \cdot 10^{-5} \dot{\varepsilon}^2 + 0,0671 \dot{\varepsilon} - 18,08 \text{ (состаренный)}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\sigma_{\max}} = -2,12 \cdot 10^{-5} \dot{\varepsilon}^2 + 0,0297 \dot{\varepsilon} - 8,83 \text{ (несостаренный)}. \quad (14)$$

**2.3. Моды разрушения.** Для отслеживания истории повреждения образцов использовали высокоскоростную видеокамеру Photron FASTCAM. Фотографии и изображения, сделанные Photron в реальном времени и приведенные на рис. 5, демонстрируют моды разрушения образцов однонаправленного стеклопластика после динамического нагружения сжатием в плоскости. Начало макроскопического повреждения выявили по наличию второго пика на зависимости скорости деформирования от времени, который соответствовал падению напряжения в образце, как показано на рис. 9. Зависимости напряжения и скорости деформирования от времени на рис. 9 позволяют выделить зоны, которые можно резюмировать следующим образом [14].

*Для испытаний без повреждения (рис. 9—а).*

**Зона 1:** характеризуется быстрым увеличением скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$ , что можно объяснить самоустановкой образцов между стержнями установки РСГ. Действительно, параллельность поверхностей образца, соприкасающихся со стержнями РСГ, не была гарантирована на 100% в силу наличия зазора и небольшого нелинейного увеличения напряжения в этой зоне.

**Зона 2:** обеспечение идеального контакта обусловило увеличение напряжения  $\sigma$  и уменьшение скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$ .

**Зона 3:** эволюция напряжения  $\sigma$  транслирует случайный сигнал, развивающийся вокруг среднего значения при стремлении скорости дефор-

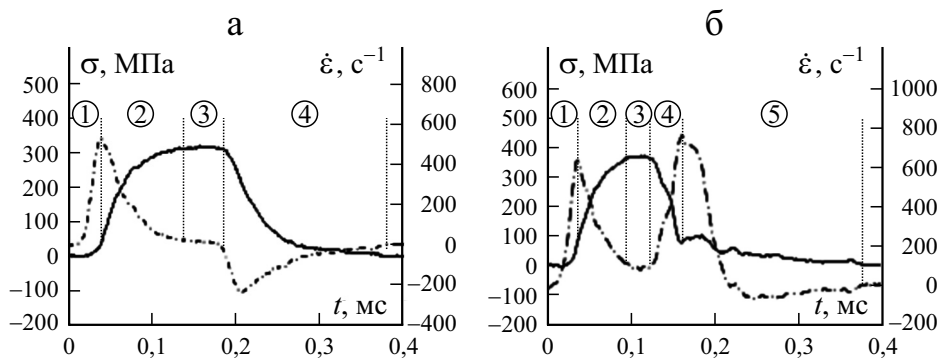


Рис. 9. Зависимость напряжения  $\sigma$  (—) и скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$  (- · - · -) от времени  $t$  образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ : испытание без повреждения при  $P = 1,3$  бар ( $524 \text{ с}^{-1}$ ) (а) и с повреждением при  $P = 2$  бар ( $634 \text{ с}^{-1}$ ) (б).

мирования  $\dot{\epsilon}$  к нулю, когда образец достигает максимального сжатия при максимальном напряжении.

**Зона 4:** В этой зоне изменился знак  $\dot{\epsilon}$ ; напряжение  $\sigma$  начало уменьшаться; образец начал релаксировать. Такое поведение можно объяснить упругим последствием образца, выявленным при анализе стереотипов, снятых высокоскоростной видеокамерой. В конце этой зоны оба сигнала исчезли одновременно.

*Для испытаний с повреждением (рис. 9—б).*

**Зона 1:** наблюдения, аналогичные в зоне 1 при испытаниях без повреждения.

**Зона 2:** наблюдения, аналогичные в зоне 2 при испытаниях без повреждения.

**Зона 3:** развитие напряжения представляет собой динамическое сжатие с постоянным средним значением  $\sigma$  и  $\dot{\epsilon}$ . Колебания сигналов по достижении максимального значения напряжения в этой зоне более выраженные, чем в испытании без повреждения, что можно объяснить появлением повреждений на микроскопическом уровне.

**Зона 4:** накопление микроскопических повреждений привело к появлению макроскопических дефектов, обусловивших быстрое уменьшение напряжения с быстрым увеличением скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$ .

**Зона 5:** поврежденный образец стал более компактным, что обусловило резкое падение величины  $\dot{\epsilon}$ . В этой зоне напряжение всегда уменьшается, но менее заметно, чем в зоне 4. Появление повреждений вызывает ослабление упругого последствия или его исчезновение, если образец был полностью поврежден.

Основные моды разрушения образцов однонаправленного стеклопластика, подвергнутых квазистатической нагрузке, — микропотеря устойчивости волокон, образование изломов, раздробление, разрушение от сдвига и расслоение. Наиболее заметна мода разрушения от сдвига, типичная для хрупких материалов, подвергающихся поперечному растяжению в силу эффекта коэффициента Пуассона.

При динамическом нагружении моды разрушения изменялись с увеличением скорости деформирования. При давлении 1,3 бар (скорость деформирования  $546 \text{ с}^{-1}$ ) состаренные образцы однонаправленного стеклопластика выдержали постоянную деформацию 9,5% без видимых макроскопических повреждений (см. рис. 7). По мере развития сжатия и достижения давления удара 1,5 бар (скорость деформирования  $596 \text{ с}^{-1}$ ) наблюдали побеление состаренных образцов в силу возникновения микроскопических повреждений. Размер и частота повреждений стали более значительными с увеличением давления удара до 1,6 бар (скорость деформирования  $606 \text{ с}^{-1}$ ), при котором преобладала мода разрушения от сдвига по диагонали и из противоположных углов образца. Разрушение от сдвига вызвало отделение блока внешних слоев в образце (см. рис. 5—в). При давлении 2 бар (скорость деформирования  $663 \text{ с}^{-1}$ ) образцы разрушались в силу сдвигового разрушения слоев по диагонали с после-

дующим макроскопическим расслоением, отделившим верхние внешние слои и вызвавшим смятие образцов, принявших форму, близкую к  $Y$ , как показано на рис. 5—г.

Несостаренные образцы однонаправленного эпоксидного стеклопластика оставались неповрежденными и не демонстрировали макроскопических повреждений вплоть до динамического нагружения со скоростью  $663 \text{ с}^{-1}$ . Однако в них могут быть микроскопические повреждения. Эволюцию повреждений несостаренных образцов однонаправленного эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  изучали в [14] при нагружении давлением до 1,6 бар; появление повреждений в образцах наблюдали уже при давлении 1,2 бар.

**2.4. Влияние старения в горячей воде на квазистатические и динамические свойства.** Ожидали, что старение в горячей воде уменьшит динамическую реакцию на сжатие слоистых эпоксидных стеклопластиков [20, 29]. В настоящей работе исследовали влияние старения в горячей воде на квазистатические и динамические свойства образцов из однонаправленного эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  путем сравнения результатов при сжатии несостаренных и состаренных образцов, испытанных при разной скорости деформирования. Основные результаты обобщены в табл. 4 (результаты квазистатических испытаний включили для справки) и показаны на рис. 10.

Деградация свойств эпоксидного стеклопластика при старении в горячей воде в основном может быть обусловлена деградацией свойств матрицы, поверхности раздела волокно—матрица или и того, и другого.

Как следует из данных табл. 4, при старении в горячей воде произошло значительное уменьшение жесткости эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ . Модуль упругости при сжатии уменьшился при статическом нагружении на 94,0% и на 65,9, 67,4, 69,6, 62,7% — при динамическом со

Табл. 4

Динамические и статические свойства состаренных и несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при сжатии в плоскости с разной скоростью деформирования и их процентное различие в силу старения в горячей воде

$\dot{\epsilon}$ , $\text{с}^{-1}$	$E_c$ , ГПа			$\sigma_{\text{max}}$ , МПа			$\epsilon_{\sigma_{\text{max}}}$ , %		
	Несостаренные	Состаренные	$\Delta$ , %	Несостаренные	Состаренные	$\Delta$ , %	Несостаренные	Состаренные	$\Delta$ , %
Статика	46,6	2,8	-94,0	600	254	-57,7	1,16	13,08	1027,6
546	50,1	17,1	-65,9	354	319	-9,9	1,07	2,49	132,7
596	53,4	17,4	-67,4	385	326	-15,3	1,34	2,73	103,7
606	53,3	16,2	-69,6	391	341	-12,8	1,38	2,82	104,3
663	48,2	18,0	-62,7	422	373	-11,6	1,54	2,71	76,0

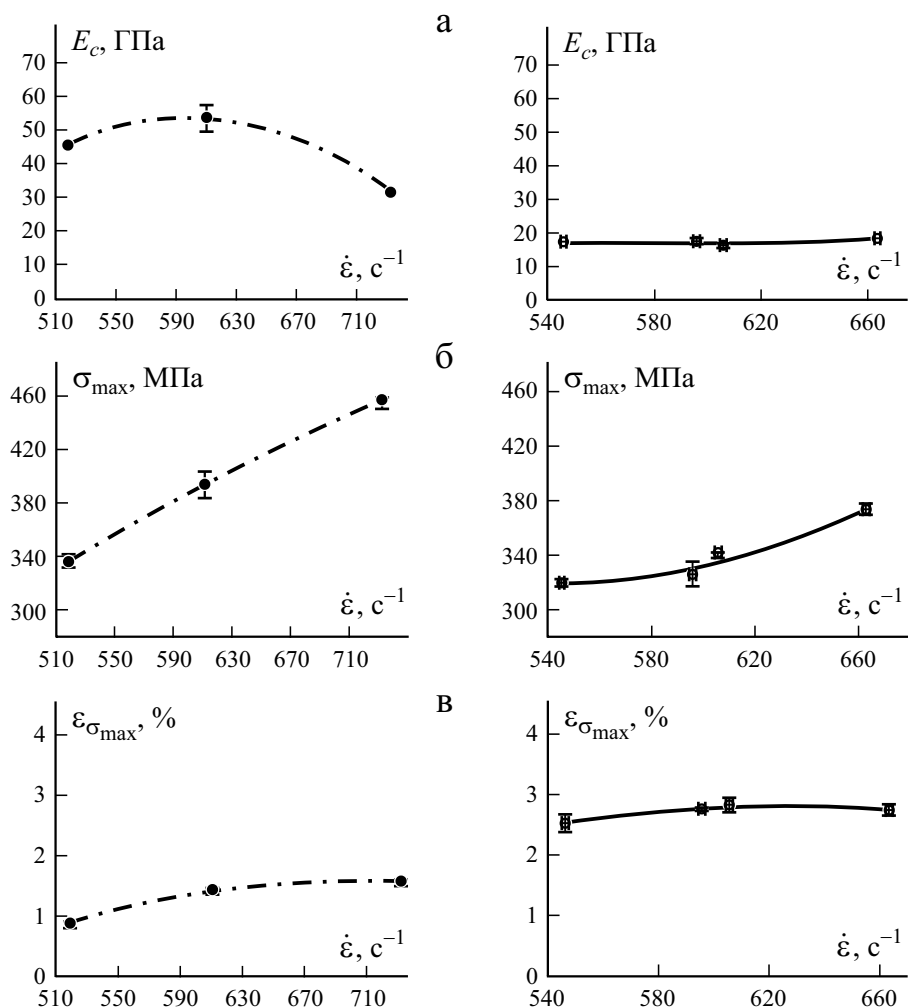


Рис. 10. Влияние старения в горячей воде на модуль упругости при сжатии  $E_c$  (а), максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  (б) и деформацию при максимальном напряжении  $\varepsilon_{\sigma_{\max}}$  (в) состаренных (○) и несостаренных (●) образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при разной скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}$ . Сплошная и штрих-пунктирная линии — подгоночные тренды.

скоростью деформирования 546, 596, 606, 663  $\text{c}^{-1}$  соответственно. Уменьшение модуля упругости при сжатии может быть связано с пластифицирующим действием воды (6,52%), увеличившем подвижность молекулярных цепочек эпоксидной смолы [30].

Из данных табл. 4 видно, что максимальное напряжение в силу старения в горячей воде снизилось при динамическом нагружении в меньшей степени, чем при квазистатическом. Уменьшение максимального напряжения состаренных образцов по отношению к несостаренным при статическом нагружении 57,7% и 9,9, 15,3, 12,8, 11,6% — при динамическом со скоро-

стью деформирования 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно. Вполне удовлетворительное ослабление эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  при динамическом нагружении связано с малой деградацией эпоксидной матрицы и межповерхностного сцепления в стеклопластике (см. рис. 4).

При статическом нагружении состаренные образцы продемонстрировали большие деформации при максимальном напряжении, чем при динамическом. Как следует из данных табл. 4, состаренные образцы подвергались большим деформациям при максимальных напряжениях, чем несостаренные.

### Заключение

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния старения в горячей воде на динамические и квазистатические характеристики при сжатии эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$ . Образцы стеклопластика выдерживали в воде при температуре 60 °С в течение 4900 ч. Испытания на сжатие с помощью разрезного стержня Гопкинсона и квазистатические испытания провели на состаренных и несостаренных образцах эпоксидного стеклопластика. По результатам настоящего исследования установлено следующее.

- Диффузионное поведение эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  успешно описано с помощью двухэтапной модели диффузии. Через 4900 ч водопоглощение достигло 6,52%. Параметры двухэтапной модели определили методом нелинейной регрессии.

- Изменение размеров образцов продемонстрировало набухание образцов в продольном направлении (вдоль волокон Е-стекла), представляющем наиболее легкий путь для диффузии воды, и усадку образцов в поперечном направлении и по толщине, где волокна препятствовали диффузии воды. Связь между водопоглощением и изменением размеров в продольном направлении была линейной.

- Динамические свойства, такие как модуль упругости при сжатии, максимальное напряжение и соответствующая ему деформация, состаренных и несостаренных образцов эпоксидного стеклопластика с укладкой  $[0^\circ]_{40}$  чувствительны к скорости деформирования. Предложены эмпирические модели для оценки динамических свойств стеклопластика при скорости деформирования в диапазоне 546—663 с<sup>-1</sup>, облегчающие проектирование и оптимизацию стеклопластиковых конструкций без использования экспериментальных исследований, временно- и материальнозатратных, для получения надежных данных для инженерного использования при моделировании динамического отклика.

- Процесс повреждения образцов однонаправленного эпоксидного стеклопластика при старении в горячей воде отслеживали с помощью высокоскоростной видеокамеры Fastcam. При давлении 1,6 бар (скорость деформирования 610 с<sup>-1</sup>) преобладающая мода разрушения — полосы сдвига. При давлении 2 бар (скорость деформирования 634 с<sup>-1</sup>) основные

моды разрушения — полосы сдвига и расслоение.

- Микрофотографии СЭМ продемонстрировали, что деградация свойств однонаправленного стеклопластика при старении в горячей воде может быть связана в основном с деградацией свойств эпоксидной матрицы и поверхности раздела волокно—матрица.

- Модуль упругости при сжатии уменьшился при статическом нагружении на 94,0% и на 65,9, 67,4, 69,6, 62,7% — при динамическом со скоростью деформирования 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно; максимальное напряжение состаренных образцов снизилось по сравнению с несостаренными при статическом нагружении на 57,7% и на 9,9, 15,3, 12,8, 11,6% — при динамическом со скоростью деформирования 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно. Состаренные образцы при статическом нагружении продемонстрировали большие деформации при максимальном напряжении, чем при динамическом. Состаренные образцы при максимальных напряжениях подвергались большим деформациям, чем несостаренные. Приращения деформации при максимальном напряжении в силу старения в горячей воде при статическом нагружении 1027,6% и 132,7, 103,7, 104,3, 76% — при динамическом со скоростью деформирования 546, 596, 606, 663 с<sup>-1</sup> соответственно. Точная и надежная оценка процентного изменения квазистатических и динамических характеристик при сжатии в силу старения в горячей воде может помочь проектировщикам установить коэффициенты долговечности (life-cycle knock-down factors) для композитных конструкций, изготовленных из однонаправленного эпоксидного стеклопластика с укладкой [0°]<sub>40</sub>.

*Благодарность.* Работа выполнена при финансовой поддержке Главного управления научных исследований и технологических разработок DGRSDT (MESRS) Алжира.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sutherland L.* A review of impact testing on marine composite materials: Part III. damage tolerance and durability // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 188, March. — P. 512—518.
2. *Rubino F., Nisticò A., Tucci F., and Carlone P.* Marine application of fiber reinforced composites: A review // *J. Mar. Sci. Eng.* — 2020. — Vol. 8, No.1. — P. 26.
3. *Joliff Y., Bélec L., and Chailan J. F.* Modified water diffusion kinetics in an unidirectional glass/fibre composite due to the interphase area: Experimental, analytical and numerical approach // *Compos. Struct.* — 2013. — Vol. 97, March. — P. 296—303.
4. *Harper B. D., Staab G. H., and Chen R. S.* A note on the effects of voids upon the hygral and mechanical properties of AS4/3502 graphite/epoxy // *J. Compos. Mater.* — 1987. — Vol. 21, No.3. — P. 280—289.
5. *Kumosa L., Benedikt B., Armentrout D., and Kumosa M.* Moisture absorption properties of unidirectional glass/polymer composites used in composite (non-ceramic) insulators // *Composites: Part A.* — 2004. — Vol. 35, No. 9. — P. 1049—1063.
6. *Bao L.-R., Yee A. F., and Lee C. Y.-C.* Moisture Absorption and hygrothermal aging in a bismaleimide resin // *Polymer.* — 2001. — Vol. 42, No. 17. — P. 7327—7333.



7. Machado J. J. M., Marques E. A. S., Barbosa A. Q., and da Silva L. F. Effect of hygrothermal aging on the quasi-static behaviour of CFRP joints varying the overlap length // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 214, Apr. — P. 451—462.
8. Carter H. G. and Kibler K. G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins // *J. Compos. Mater.* — 1978. — Vol. 12, No. 2. — P. 118—131.
9. Kumar P., Garg A., and Agarwal B. Dynamic compressive behaviour of unidirectional gfrp for various fibre orientations // *Mater. Lett.* — 1986. — Vol. 4, No. 2. — P. 111—116.
10. Hsiao H. M., Daniel I. M., and Cordes R. D. Dynamic compressive behavior of thick composite materials // *Exp. Mech.* — 1998. — Vol. 38, No. 3. — P. 172—180.
11. Ochola R. O., Marcus K., Nurick G. N., and Franz T. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates // *Compos. Struct.* — 2004. — Vol. 63, No. 3. — P. 455—467.
12. Hosur M., Alexander J., Vaidya U., and Jeelani S. High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites // *Compos. Struct.* — 2001. — Vol. 52, Nos. 3—4. — P. 405—417.
13. Tarfaoui M. and Nachtane M. Staking lay-up effect on dynamic compression behaviour of E-glass/epoxy composite materials: Experimental and numerical investigation // *Adv. Mater. Lett.* — 2018. — Vol. 9, No. 11. — P. 816—822.
14. Tarfaoui M., Nême A., and Choukri S. Damage kinetics of glass/epoxy composite materials under dynamic compression // *J. Compos. Mater.* — 2009. — Vol. 43, No. 10. — P. 1137—1154.
15. Mostapha T. Experimental Investigation of Dynamic Compression and Damage Kinetics of Glass/Epoxy Laminated Composites under High Strain Rate Compression, Ch.16 // *Advances in Composite Materials* /Eds. Brahim Attaf. — London: Ecodesign and Analysis, IntechOpen Limited, 2011.
16. Gueraiche L., Tarfaoui M., Osmani H., and El Malki A. Aboulghit. A practical note for SHPB test with new algorithms for delimiting pulses // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 126, Aug. — P. 145—158.
17. Antoon M. K. and Koenig J. L. The structure and moisture stability of the matrix phase in glass-reinforced epoxy composites // *J. Macromol. Sci. Part C.* — 1980. — Vol. 19, No. 1. — P. 135—173.
18. Chen Y., Davalos J. F., Ray I., and Kim H.-Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures // *Compos. Struct.* — 2007. — Vol. 78, No. 1. — P. 101—111.
19. Bradshaw R. D. and Brinson L. C. Physical aging in polymers and polymer composites: An analysis and method for time-aging time superposition // *Polym. Eng. Sci.* — 1997. — Vol. 37, No. 1. — P. 31—44.
20. Soykok I. F., Sayman O., and Pasinli A. Effects of hot water aging on failure behavior of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints // *Composites: Part B.* — 2013. — Vol. 54, Nov. — P. 59—70.
21. Wosu S., Hui D., and Daniel L. Hygrothermal effects on the dynamic compressive properties of graphite/epoxy composite material // *Composites: Part B.* — 2012. — Vol. 43, No. 3. — P. 841—855.
22. Nachtane M., Tarfaoui M., Sassi S., El Moumen A., and Saifaoui D. An investigation of hygrothermal aging effects on high strain rate behaviour of adhesively bonded composite joints // *Composites: Part B.* — 2019. — Vol. 172, Sept. — P. 111—120.
23. Gentry T., Bank L., Barkatt A., and Prian L. Accelerated test methods to determine the long-term behavior of composite highway structures subject to environmental loading // *J. Compos. Technol. Res.* — 1998. — Vol. 20, No. 1. — P. 38—50.

24. *Ma S., He Y., Hui L., and Xu L.* Effects of hygrothermal and thermal aging on the low-velocity impact properties of carbon fiber composites // *Adv. Compos. Mater.* — 2020. — Vol. 29, No. 1. — P. 55—72.

25. *Berens A. R. and Hopfenberg H. B.* Diffusion and relaxation in glassy polymer powders: 2. Separation of diffusion and relaxation parameters // *Polymer.* — 1978. — Vol. 19, No. 5. — P. 489—496.

26. *Bao L.-R. and Yee A. F.* Moisture diffusion and hygrothermal aging in bismaleimide matrix carbon fiber composites-part I: Uni-weave composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2002. — Vol. 62, No. 16. — P. 2099—2110.

27. *Zhang J., Cheng X., Guo X., Bao J., and Huang W.* Effect of environment conditions on adhesive properties and material selection in composite bonded joints // *Int. J. Adhes. Adhes.* — 2020. — Vol. 96, Jan. — P. 102302.

28. *Hsiao H. M. and Daniel I. M.* Strain rate behavior of composite materials // *Composites: Part B.* — 1998. — Vol. 29, No. 5. — P. 521—533.

29. *Wang J., Ganga Rao H., Liang R., and Liu W.* Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2016. — Vol. 35, No. 3. — P. 179—211.

30. *Nogueira P., Ramirez C., Torres A., Abad M. J., Cano J., Lopez J., López-Bueno I., and Barral L.* Effect of water sorption on the structure and mechanical properties of an epoxy resin system // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2001. — Vol. 80, No. 1. — P. 71—80.

Поступила в редакцию 30.07.2020

Окончательный вариант поступил 12.10.2021

Received July 30, 2020 (Oct. 12, 2021)

---