

УДК 620.17

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-4-484-497

**ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР
И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ОСТАТОЧНУЮ МЕЖСЛОЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ
УГЛЕПЛАСТИКА***

© 2024 г.

**Лобанов Д.С., Струнгарь Е.М.,
Староверов О.А., Чеботарева Е.А.**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация*

sem.chebotareva@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024

Проведены серии экспериментальных исследований для выявления влияния повышенных температур и предварительного ударного воздействия на остаточную межслоевую прочность конструкционного углепластика, изготовленного на основе препреговой технологии и автоклавного формования. Испытания на межслоевой сдвиг проводились при комнатной и повышенной температурах на образцах, вырезанных в виде короткой балки, которые были подвержены предварительным динамическим воздействиям с различной энергией удара (от 1 до 6 Дж). Получены диаграммы нагружений и поглощения энергии образцов в испытаниях на удар и сделаны выводы о разрушениях материала при динамических нагрузках. Построены диаграммы нагружения при влиянии повышенных температур и предварительного удара, на основе которых проведен анализ наиболее опасных факторов внешнего воздействия на конструкции. При испытаниях на межслоевой сдвиг проводилась регистрация полей напряжений и деформаций с использованием бесконтактной оптической видеосистемы и регистрация сигналов акустической эмиссии. На основании анализа данных, полученных с помощью метода корреляции цифровых изображений, удалось оценить механическое поведение испытуемых образцов в зависимости от ударного воздействия различной интенсивности и влияния повышенных температур. При анализе данных акустической эмиссии проведен параметрический анализ на основе кумулятивной энергии и пиковых частот сигналов, оценены механизмы разрушения материала при разной энергии предварительного удара. По результатам комплексных исследований конструкционного материала были качественно оценены процесс накопления повреждений, смена механизмов разрушения композита и влияние внешних факторов на несущую способность конструкций из исследуемого материала.

Ключевые слова: углепластик, межслоевой сдвиг, механические испытания, повышенные температуры, предварительный удар, метод корреляции цифровых изображений.

* Выполнено при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FSNM-2024-0013).

Введение

Полимерные волокнистые композиты на основе стекло- и углеволокон по сравнению с металлическими конструкционными материалами чувствительны к случайным ударным воздействиям и относительно невысоким температурам. Повреждения углепластиков, вызванные ударом, являются проблемой при проектировании и эксплуатации конструкций из них. Особенно опасны удары с малой энергией, так как они приводят к возникновению визуально неопределимых повреждений, которые, в свою очередь, могут снижать остаточные механические характеристики композитов [1].

Современные испытательные системы позволяют реализовывать различные виды внешних механических воздействий, включая низкоскоростные удары падающим грузом по схеме трехточечного изгиба без макроразрушения с последующим квазистатическим доломом, с целью оценки влияния предварительных динамических воздействий на остаточные прочностные и деформационные характеристики исследуемых материалов. Такие исследования представляют высокую ценность для аэрокосмической отрасли. Исследователями отмечается нелинейная зависимость остаточной прочности от энергии удара в условиях растяжения, сжатия и изгиба [2–4]. С другой стороны, полученные данные могут быть использованы для создания новых методов производства полимерных слоистых композитов с повышенными межслоевыми характеристиками [5–7].

При повреждении углепластиков, не только при ударе, образуются такие повреждения, как локальный разрыв волокон, расслоение, растрескивание матрицы [8]. Эти характеристики процессов разрушения композитов при испытаниях на межслоевой сдвиг по оценке прочности указывают на необходимость регистрации и распознавания класса повреждений, вызываемых сдвиговыми деформациями, для прогнозирования разрушения композиционных материалов и изделий [9]. Классифицировать вид повреждения композита можно при помощи современных методов экспериментальной механики, среди которых можно выделить методы акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений [10].

Методы акустической эмиссии (АЭ) и корреляции цифровых изображений (КЦИ) используются в качестве методов неразрушающего контроля для определения характеристик процесса разрушения композитов. Метод АЭ, в первую очередь, определяет развитие внутреннего разрушения. Однако он также может обнаруживать и оценивать активные дефекты в общей структуре [11–13]. Исходя из этого, исследователи часто используют метод КЦИ для проверки характера повреждения, чтобы оценить процесс разрушения композитов [14–16]. Также метод КЦИ используется для более точного измерения локальных и глобальных деформаций во время механических испытаний [17, 18].

Не менее важной и актуальной задачей является изучение влияния повышенных эксплуатационных и критических температур на изменение прочностных свойств полимерных композитов [19].

Предлагаемая статья является продолжением исследования, посвященного оценке влияния предварительного ударного воздействия разной интенсивности на изменение остаточных механических свойств полимерных композитов [20]. В настоящей статье изучается совместное влияние предварительных ударных воздействий различной интенсивности и повышенных температур (120–160 °С) на механическое поведение, реализацию прочностных свойств и механизмов разрушения конструкционного

углепластика при межслоевом сдвиге, в том числе с помощью системы регистрации полей деформаций и перемещений и метода корреляции цифровых изображений.

1. Материал, оборудование и методики исследования

В соответствии с программой испытаний исследования проводились на образцах углепластика ВКУ 39, вырезанных в виде коротких балок с общими размерами $42 \times 12 \times 6$ мм, на основе эпоксидного связующего ВСЭ1212 со схемой укладки $[0/90]_{30}$ на межслоевой сдвиг. Всего было испытано 48 образцов, разделенных на 12 групп с различной энергией предварительного удара (1, 3, 5 и 6 Дж) при нормальных и повышенных температурах (120 и 160 °С). По паспорту материала: 120 °С – температура, до которой не происходит структурных изменений, 160 °С – температурная точка в окрестностях стеклования матрицы.

Предварительные ударные воздействия реализованы при помощи электродинамического вертикального стенда-копра с падающим грузом Instron CEAS 9350 с возможностью реализации ударного воздействия с энергией от 1 до 1800 Дж. Система оснащена тензометрированным ударником, а также системой сбора и обработки данных DAS 16k, что позволило получить ударный отклик в виде зависимостей силы, поглощенной энергии от времени и перемещений в ходе испытания [7]. Однократные удары производились с использованием наконечника из закаленной стали конической формы с углом $45 \pm 2^\circ$ и радиусом закругления $3,17 \pm 0,12$ мм, регламентированного стандартом ASTM D6110 для испытаний пластиков. Расстояние между опорами соответствовало расстоянию, установленному в испытаниях на квазистатический трехточечный изгиб.

После нанесения предварительных ударных воздействий при контролируемых параметрах группы образцов углепластика испытывались на межслоевой сдвиг при нормальной и повышенных температурах. Испытания на межслоевой сдвиг проводились на электромеханической испытательной системе Instron 5982 (100 кН), оснащенной температурной камерой с рабочим диапазоном температур от -150 до $+350$ °С, при скорости подвижного захвата 2 мм/мин. Испытания проводились с учетом рекомендаций ГОСТ 32659-2014 при одновременном использовании системы анализа полей перемещений и деформаций VIC-3D на всем температурном диапазоне исследований и системы регистрации сигналов акустической эмиссии Vallen AMSY-6 при нормальной температуре.

Перемещения и деформации по поверхности образца регистрировались с помощью бесконтактной оптической видеосистемы VIC-3D и метода КЦИ. Видео-запись осуществлялась с помощью пятидесятимиллиметровой камеры Prosilica GE4900 с разрешением 16 Мпк. Максимальная скорость записи составляла 1 кадр в 3 секунды. В статье используется критерий нормированной суммы квадратов разностей с нулевым средним. При постобработке в системе VIC-3D компоненты деформации рассчитывались с использованием тензора конечных деформаций в представлении Лагранжа. Размеры подмножества и шага выбирались в зависимости от условий съемки и составляли 21 (подмножество) и 3 (шаг) пикселя. На боковую поверхность образца наносились белое покрытие, затем совокупность мелкодисперсных черных точек с помощью аэрозольного баллона матовой акриловой белой и черной эмали Desoq. Область особого интереса (ROI) была выбрана как прямоугольник размером 273×420 пикселей; 1 пиксель составляет 0,06 мм. Поверхность образца в ходе испытания освещалась с помощью светодиодной лампы: белый свето-

диод, 4000К; люминесцентная лампа 4000К, 36 Вт. В статье [6] представлены результаты экспериментальных исследований по оценке работоспособности бесконтактной оптической видеосистемы VIC-3D и метода КЦИ при испытаниях на растяжение композитов при повышенных температурах. Предложенные в статье рекомендации по проведению температурных испытаний с использованием метода КЦИ применялись в приводимом исследовании.

При испытаниях на межслоевой сдвиг образцов углепластика без предварительного ударного воздействия и с предварительным ударным воздействием в условиях нормальной температуры дополнительно осуществлялась регистрация сигналов АЭ с помощью многоканальной системы AMSY-6 фирмы Vallen GmbH. При испытаниях на межслоевой сдвиг использовались широкополосный пьезоэлектрический датчик М31 (частотный диапазон 300–800 кГц) и предусилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Частота дискретизации данных составляла 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ – 40 дБ. Синхронизация оптических систем регистрации с контроллером испытательной системы в процессе испытания осуществлялась посредством блока АЦП (NI USB-6251).

2. Результаты и обсуждения

2.1. Влияние предварительного удара при комнатной температуре. В результате испытаний на предварительный удар получены данные, отражающие изменение усилий и поглощенной энергии в опытах по схеме трехточечного изгиба короткой балки в условиях падающего груза. При ударе 1–3 Дж дефекты визуально не распознаются, при ударе 5–6 Дж на поверхности наблюдается вмятина на всю ширину образца глубиной 2–3 мм и шириной до 2 мм. Характерные диаграммы нагружения и поглощенной энергии при различных энергиях удара представлены на рис. 1.

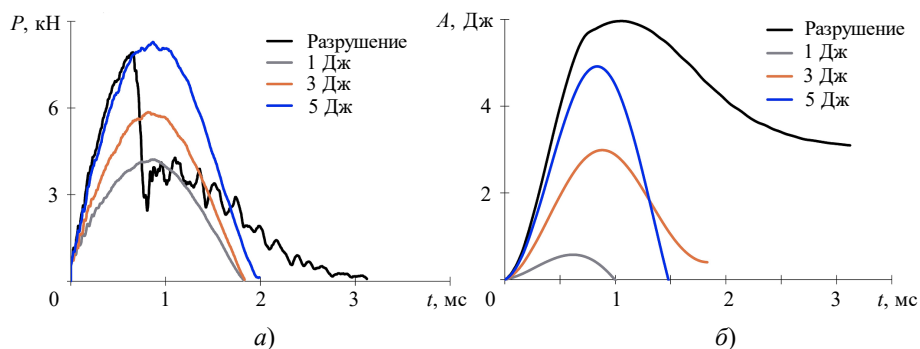


Рис. 1. Диаграммы нагружения (а) и поглощенной энергии (б) углепластиковых образцов в опытах на удар падающим грузом по схеме трехточечного изгиба

Кривые, описывающие процесс нагружения образцов, можно поделить условно на две группы: удары с потенциальной энергией 6 Дж (черная линия на рис. 1а), после которых при визуальном осмотре на поверхности образцов зафиксированы значительные повреждения и расслоения с разрывом армирующих волокон композита; удары с энергией в диапазоне 1–5 Дж без макроразрушения. При анализе величин поглощенной энергии в ходе ударного взаимодействия (см. рис. 1б) выявлено, что энергия, направленная на разрушение, при ударах с энергией 1 Дж была затрачена не полностью и составляла примерно половину от потенциальной энергии,

что, в свою очередь, можно интерпретировать как затраты на упругую деформацию, не приводящую к образованию значительных повреждений в структуре материала образцов. В опытах с ударами с энергией 3–6 Дж вся энергия была затрачена на разрушение образцов, что свидетельствует о наличии неупругих деформаций и значительных структурных повреждениях.

2.2. Оценка параметров акустической эмиссии. Был проведен параметрический анализ сигналов акустической эмиссии при испытаниях на межслоевой сдвиг при комнатной температуре образцов без повреждений и с предварительным ударом с энергией 1, 3, 5 и 6 Дж. Оценивались энергетический параметр сигналов АЭ, количество сигналов и пиковые частоты акустико-эмиссионных сигналов.

Уровень суммарного количества сигналов и кумулятивной энергии при различной энергии предварительного удара представлены на рис. 2а, изменения параметров на котором иллюстрируют процесс накопления повреждений в материале. Прослеживается корреляция роста количества сигналов и накопленной энергии при изменении условий предварительного удара. Значения кумулятивной энергии возрастают с увеличением энергии предварительного удара, как и суммарное число сигналов, зафиксированных в процессе испытания.

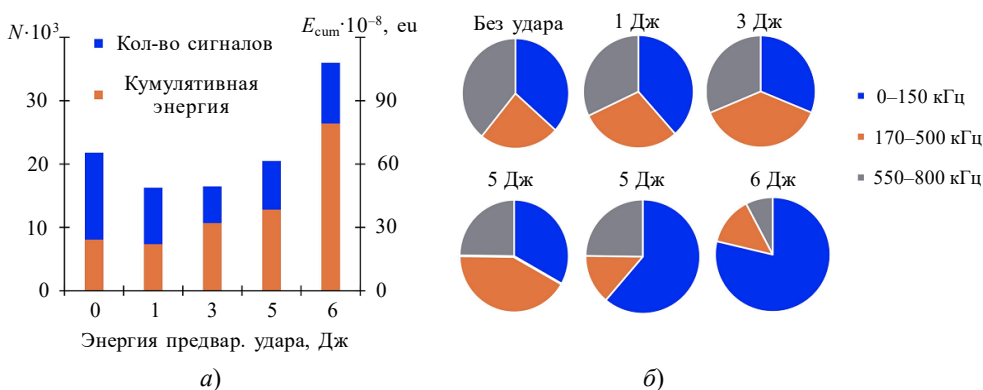


Рис. 2. Гистограммы суммарного количества и кумулятивной энергии сигналов АЭ (а), диаграммы распределения сигналов по диапазонам частот (б) при различной энергии предварительного удара

Также были проанализированы пиковые частоты сигналов АЭ. По частотным диапазонам можно судить о механизмах разрушения материала. Так, низкие частоты соответствуют разрушению матрицы, средние – расслоению, высокочастотный диапазон указывает на разрыв волокон. По количеству зафиксированных сигналов образцы можно разделить на 2 группы: группа 1 – образцы без предварительного удара, образцы с предварительным ударом 1, 3 Дж и половина образцов с предварительным ударом 5 Дж; группа 2 – вторая половина образцов с предварительным ударом 5 Дж и образцы с энергией предварительного удара 6 Дж.

У образцов первой группы (см. рис. 2б) наблюдается равномерное распределение сигналов по частотным диапазонам, сигналы среднего диапазона частот занимают не менее 25% от общего числа, что указывает на реализацию межслоевого сдвига в процессе испытания. У второй группы образцов заметно преобладает низкочастотный диапазон (более 60% от общего количества сигналов), тогда как среднечастотные и высокочастотные сигналы зафиксированы в меньшей степени, что указывает на значительные повреждения матрицы в материале, которые привели к потере устойчи-

ности образцов. Из анализа пиковых частот сигналов можно судить о смене механизмов повреждения при испытаниях на трехточечный изгиб по методу короткой балки в зависимости от энергии предварительного удара.

2.3. Результаты механических испытаний на межслоевой сдвиг при нормальной и повышенных температурах. На межслоевой сдвиг были испытаны образцы без дефектов и с эксплуатационными дефектами, полученными в результате предварительного ударного воздействия разной интенсивности (1, 3, 5 Дж). Получены экспериментальные данные о влиянии повышенных температур и эксплуатационных дефектов на значения прочности при межслоевом сдвиге и реализации механизмов разрушения. Проанализированы характерные виды диаграмм нагружений, соответствующие температурам испытаний и предварительным повреждениям образцов (рис. 3). На рис. 3 и 4 τ – касательные напряжения, u – перемещения траверсы. Результаты испытаний образцов углепластика на межслоевой сдвиг без предварительного ударного воздействия и с ударным воздействием с энергией 1, 3 и 5 Дж при повышенных температурах приведены в таблице 1.

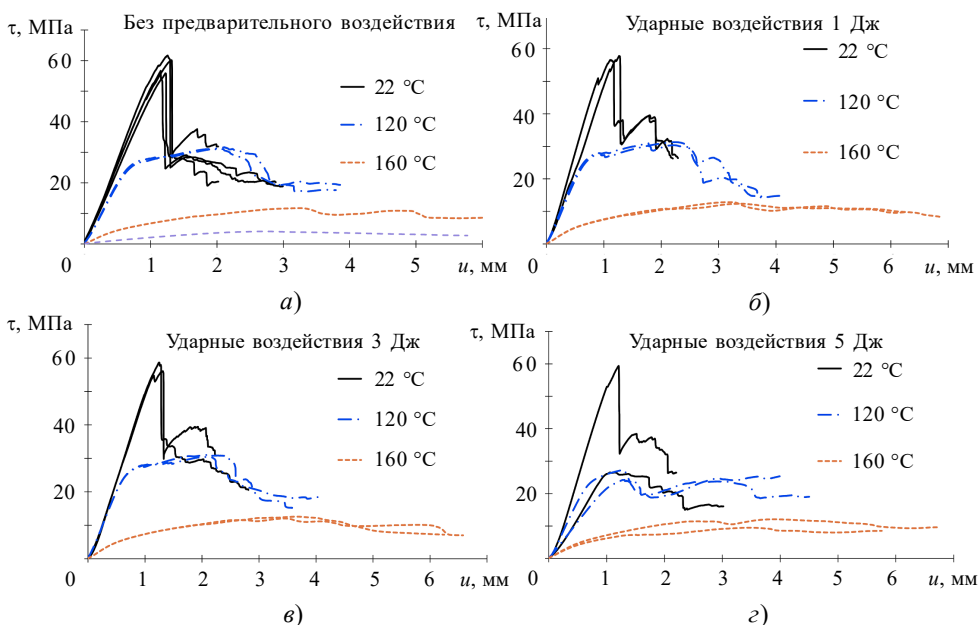


Рис. 3. Диаграммы нагружения при межслоевом сдвиге образцов углепластика при нормальной и повышенных температурах без предварительного ударного воздействия (а) и после предварительного ударного воздействия (б–г)

Таблица 1

Результаты испытаний образцов углепластика на межслоевой сдвиг при повышенных температурах

№	Энергия удара, Дж	Температура, °С	Прочность при межслоевом сдвиге, МПа
1	2	3	4
1	0	22	58,1±3,6
2		120	31,4±0,3
3		160	11,7±1,4
4		200	4,1

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4
5	1	22	57,2±0,9
6		120	31,1±0,3
7		160	12,6±0,4
8	3	22	57,4±1,8
9		120	30,9±0,1
10		160	12,3±0,4
11	5	22	59,4±2,4
12		120	25,7±2,1
13		160	10,8±1,8

Следует отметить, что:

– при 200 °С образец без предварительного ударного воздействия практически сразу теряет устойчивость и деформируется пластически, поэтому было принято решение образцы после удара при этой температуре не испытывать;

– при энергии удара в 5 Дж для температуры испытаний 22 °С отобраны образцы, которые держат нагрузку, как и образцы без удара и при 1 и 3 Дж.

Для наглядности влияния энергии удара были построены диаграммы нагружения при каждой температуре с группировкой образцов по энергии удара (рис. 4).

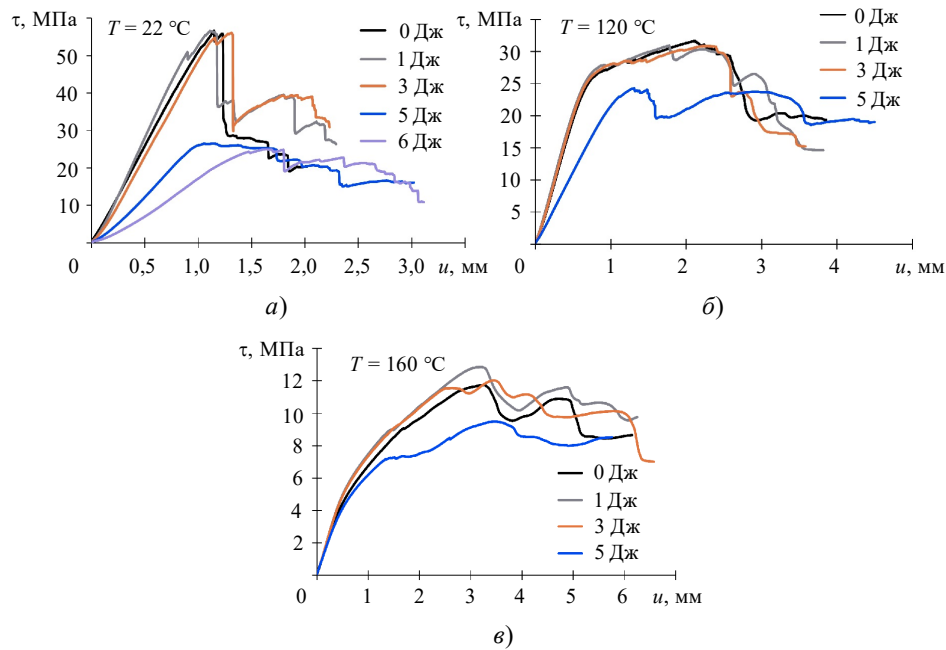


Рис. 4. Диаграммы нагружения при межслоевом сдвиге образцов углепластика с предварительным ударным воздействием при различных температурах

По полученным результатам можно сделать вывод, что для образцов без предварительного удара воздействие повышенных температур 120 и 160 °С снижает прочность при межслоевом сдвиге на 46 и 80% соответственно. Для образцов с предварительным ударом с энергией 1 и 3 Дж воздействие повышенных температур снижает прочность при межслоевом сдвиге примерно в тех же диапазонах, что и для группы образцов без предварительного ударного воздействия, а характерные диаграммы

нагружения при межслоевом сдвиге имеют схожий вид (см. рис. 4б, в). Для образцов с предварительным ударом с энергией 5 Дж воздействие повышенных температур 120 и 160 °С снижает прочность при межслоевом сдвиге на 57 и 82% соответственно.

Анализируя полученные значения величин из таблицы 1, можно предположить, что повышенные температуры 120 и 160 °С являются более опасным фактором внешнего воздействия, чем случайный удар с энергией до 5 Дж.

2.4. Результаты испытаний на межслоевой сдвиг, полученные с помощью видеосистемы и метода корреляции цифровых изображений. Чтобы оценить изменения значений деформации испытываемых образцов при различных нагрузках, рассматривались средняя продольная деформация ϵ_{yy} и сдвиговая деформация ϵ_{xy} , полученные с помощью бесконтактной оптической видеосистемы. В результате зарегистрированы поля деформаций, иллюстрирующие локализации продольных и сдвиговых деформаций при уровнях 30, 60 и 90% от P_{max} (рис. 5–7).

Для образца без удара начало зоны локализации фиксируется при 75% от уровня максимальной нагрузки (рис. 5). Для образцов с предварительным поперечным ударным воздействием (6 Дж) локализация сдвиговых деформаций зарождается в интервале 12–35% от максимальной нагрузки. Для исходного образца и образца с предварительным ударным воздействием (5 Дж) разрушение происходит вследствие межслоевого сдвига. Видеосистема фиксирует рост трещины от индентора вдоль длины образца. При анализе накопления повреждений можно сделать вывод, что разрушение на начальном этапе проведения испытаний возникло из-за образования трещин в матрице и разрыва волокон, связанных с большей энергией ударного воздействия до испытаний на межслоевой сдвиг (см. рис. 5).

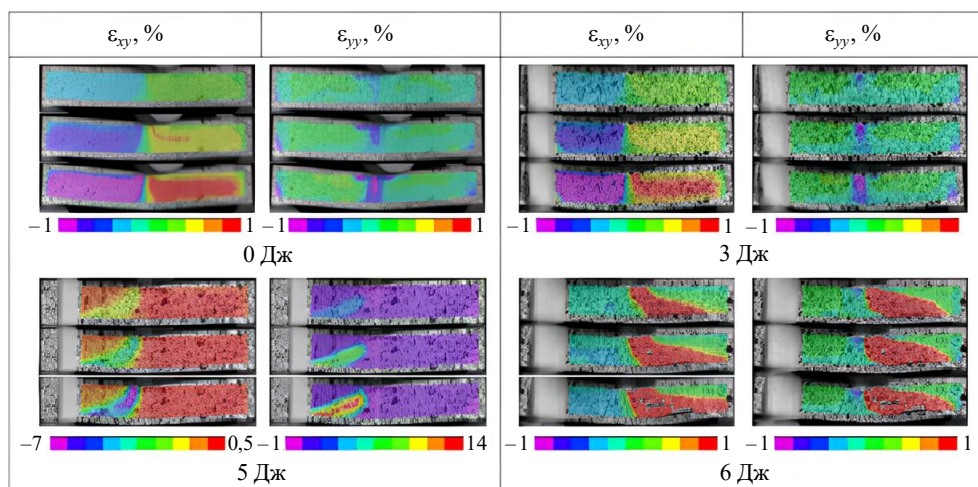


Рис. 5. Эволюция неоднородных полей сдвиговых и продольных деформаций на поверхности образца при температуре 22 °С

По полученным результатам температурных испытаний с видеосистемой VIC-3D образцов без предварительного ударного воздействия и с ударом 1, 3 и 5 Дж были построены эволюции полей деформации также по продольным и сдвиговым деформациям (ϵ_{yy} , ϵ_{xy}) при температурах 120 и 160 °С (рис. 6, 7). С помощью видеосистемы удалось зафиксировать первичную локализацию для образцов без удара и образцов с предварительным ударом разной интенсивности (1, 3 и 5 Дж) при различных значениях температур.

Для образца без удара при $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 6) рост деформаций фиксируется на упругом участке диаграммы нагружения, что составляет 20% от максимальной нагрузки. Зарождение трещины происходит в срединном слое образца, а далее трещина прорастает от края к индентору. Максимальное значение сдвиговых деформаций в момент возникновения трещины составило 0,232%.

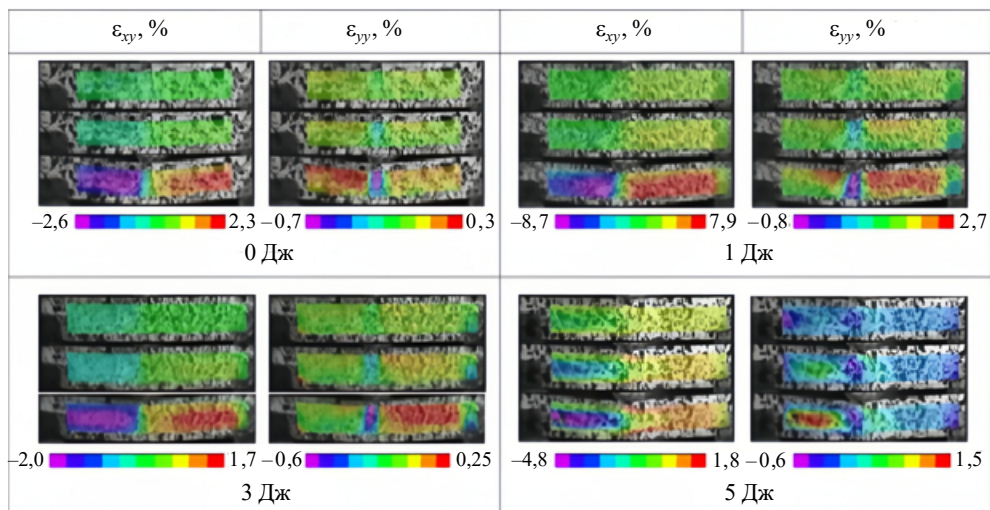


Рис. 6. Эволюция неоднородных полей сдвиговых и продольных деформаций на поверхности образца при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналогичные исследования были проведены при испытаниях на межслоевой сдвиг при $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$. По опытным данным (см. рис. 7), полученным с помощью видеосистемы, возникновение первичной локализации наблюдается при $P = 0,43\text{ кН}$, что составляет 38% от уровня максимальной нагрузки и отличается на 18% от локализации образца без удара, испытанного при $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 6).

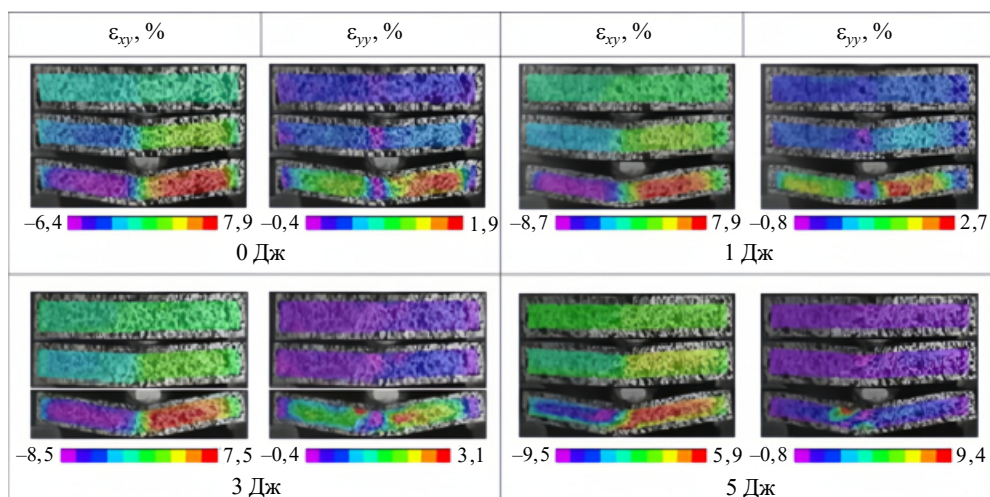


Рис. 7. Эволюция неоднородных полей сдвиговых и продольных деформаций на поверхности образца при температуре $160\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для образца с предварительным ударным воздействием (1 Дж) накопление повреждений происходит аналогично образцу без удара. Рост деформаций фиксируется при 35–37% от P_{\max} . По неоднородному полю сдвиговых деформаций наблюдается возникновение первичной локализации в зоне индентора, что отличается от результатов, полученных для образца без удара (см. рис. 6). При большем значении предварительного удара (3 Дж) в образце началось прорастание трещины в срединном слое идентично образцу без удара и образцу при ударе с энергией 1 Дж. Максимальное значение сдвиговых деформаций ($\epsilon_{xy} = 0,340\%$) фиксируется при 46% от P_{\max} . По неоднородному полю сдвиговых деформаций (см. рис. 7) наблюдается возникновение первичной локализации в зоне индентора, что отличается от результатов, полученных для образца без удара.

Также стоит отметить, что существенная неоднородность полей деформаций отмечается при повышенных температурах 120 и 160 °С при уровне нагрузки 90% от P_{\max} , а при 30 и 60% от P_{\max} неоднородность практически отсутствует (см. рис. 6, 7). При температуре 160 °С наблюдается существенный прогиб образца при уровне нагрузки 90% от P_{\max} независимо от энергии удара. При нормальной температуре 22 °С (см. рис. 5) неоднородность проявляется равномерно по мере нагружения, при уровне нагрузки 90% от P_{\max} прогиб практически отсутствует, также это видно по приведенным диаграммам нагружения образцов (см. рис. 3).

Заключение

По результатам механических испытаний установлено, что повышение температуры (120 и 160 °С) в сравнении с комнатной температурой существенно снижает прочность (на 46 и 80% соответственно) при межслоевом сдвиге образцов углепластика, в то время как случайный удар с энергией до 5 Дж практически не оказывает влияние на прочность при межслоевом сдвиге.

При повышенных температурах 120 и 160 °С неоднородность полей деформаций на поверхности образцов не зависит от энергии удара и отмечается при более высоком уровне нагрузки, чем на образцах при нормальной температуре 22 °С. Предварительные ударные воздействия с энергией 5 и 6 Дж при нормальной температуре привели к существенному повреждению образцов. Разрушение на начальном этапе проведения испытаний возникло из-за образования трещин в матрице и разрыва волокон, связанных с большей энергией ударного воздействия, до испытаний на межслоевой сдвиг. На основании вида полей деформаций при энергии удара 1 и 3 Дж можно предположить, что существенного влияния на прочностные характеристики эти величины энергии удара не оказали.

Целесообразным представляется проведение дальнейших исследований прочности углепластика при циклических воздействиях и дополнительных значениях температуры для выявления закономерностей.

Список литературы

1. Fan X., Deng X., Mao W., Luo Z., Ye W., Dai C. In situ characterization of high-temperature mechanical behaviors of freestanding Si, BSAS and Yb₂SiO₅ environmental barrier coatings by three-point bending tests based on digital image correlation. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2023. Vol. 12. Article No 100130. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100130>.
2. Ibekwe S., Li G. Low velocity impact damage on laminated polymer composites. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*. 2022. Vol. 2. P. 241–266. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00224-8>.

3. Pai Y., Pai K.D., Kini M.V. A review on low velocity impact study of hybrid polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. Pt. 18. P. 9073–9078. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.390>.
4. Mirbagheri M., Rahmani O., Mirbagheri Y. Estimation of residual tensile strength of composite laminate after low-velocity impact using visually inspection. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 131. Article No 105898. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105898>.
5. Damghani M., Saddler J., Sammon E., Atkinson G.A., Matthews J., Murphy A. An experimental investigation of the impact response and Post-impact shear buckling behaviour of hybrid composite laminates. *Composite Structures*. 2023. Vol. 305. Article No 116506. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116506>.
6. Zhang C., He E., Zhu K., Li Y., Yan L., Zheng X. Delamination propagation manipulation of composite laminates under low-velocity impact and residual compressive strength evaluation. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024. Vol. 307. Article No 110333. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110333>.
7. Wang Z., Mao J., Yuan K., Wei K., Yao S. Investigation on impact damage and residual in-plane compression strength of FML laminates. *International Journal of Impact Engineering*. 2024. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104956>.
8. Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии. *Frontier Materials & Technologies*. 2022. No 2. P. 7–16. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-7-16>.
9. Чеботарева Е.А., Лунегова Е.М., Лобанов Д.С., Мельникова В.А. Влияние предварительных ударных воздействий на механические свойства конструкционного углепластика при межслоевом сдвиге. *Деформация и разрушение материалов*. 2024. Вып. 5. С. 31–39. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-5-31-39.
10. Kalteremidou K.-A., Aggelis D.G., Hemelrijck D.V., Pyl L. On the use of acoustic emission to identify the dominant stress/strain component in carbon/epoxy composite materials. *Mechanics Research Communications*. 2021. Vol. 111. Article No 103663. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2021.103663>.
11. Krishnamoorthy K., Prabhu N. Tensile failure characterization of glass/epoxy composites using acoustic emission RMS data. *Journal of Polymer Materials*. 2023. Vol. 40. Iss. 3-4. P. 215–226. <https://doi.org/10.32381/JPM.2023.40.3-4.7>.
12. Muir C., Gibson T., Hilmas A., Almansour A.S., Sevenser K., Kiser J.D., Pollock T.M., Daly S., Smith C. Machine learning based damage identification in SiC/SiC composites from acoustic emissions using autoencoders. *Composites Part B: Engineering*. 2024. Vol. 287. Article No 111802. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111802>.
13. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Kannan V.P. Investigation of an improved time of arrival detection method for acoustic emission signals and its applications to damage characterisation in composite materials. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 223. Article No 111906. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111906>.
14. Zhu W., Wu Q., Yang L., Zhou Y.C. In situ characterization of high temperature elastic modulus and fracture toughness in air plasma sprayed thermal barrier coatings under bending by using digital image correlation. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 11. Part B. P. 18526–18533. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.158>.
15. Kim D.H., Seong Y., Kim J.G., Lee J., Seo M.H., Hwang H., Kim H.S. Analysis of bending behavior of TiN particle-reinforced martensitic steel using micro-digital image correlation. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 794. Article No 139965. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139965>.
16. Yang J., Gao X., Xu J., Lacidogna G., Shao J., Zhu H., Liu C., Ye C. Insights into the fracture properties of recycled ceramic and rubber composite cement-based materials: Fracture mechanics, acoustic emission, and digital image correlation. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 435. Article No 136896. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136896>.
17. Wang Y., Jia L., Chen Z., Han Y., Jia L., Shang J., Yan R. Combining acoustic emission and digital image correlation analysis for dynamic damage response of woven spacer structure

reinforced sandwich composites. *Composite Structures*. 2023. Vol. 319. Article 117162. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117162>.

18. Slovikov S.V., Lobanov D.S., Chebotareva E.A., Melnikova V.A. The influence of technological defects on the mechanical behavior of CFRP during buckling under compression based on DIC data and acoustic emission. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2024. Vol. 18. Iss. 69. P. 60–70. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.69.05>.

19. Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С. Развитие метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) применительно к механическим испытаниям при повышенных температурах. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2022. №3. С. 147–159. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.3.15>.

20. Староверов О.А., Бабушкин А.В., Горбунов С.М. Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. №1. С. 161–172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14.

References

1. Fan X., Deng X., Mao W., Luo Z., Ye W., Dai C. In situ characterization of high-temperature mechanical behaviors of freestanding Si, BSAS and Yb₂SiO₅ environmental barrier coatings by three-point bending tests based on digital image correlation. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2023. Vol. 12. Article No 100130. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100130>.

2. Ibekwe S., Li G. Low velocity impact damage on laminated polymer composites. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*. 2022. Vol. 2. P. 241–266. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00224-8>.

3. Pai Y., Pai K.D., Kini M.V. A review on low velocity impact study of hybrid polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. Pt. 18. P. 9073–9078. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.390>.

4. Mirbagheri M., Rahmani O., Mirbagheri Y. Estimation of residual tensile strength of composite laminate after low-velocity impact using visually inspection. *Eng. Fail. Anal.* 2022. Vol. 131. Article No 105898. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105898>.

5. Damghani M., Saddler J., Sammon E., Atkinson G.A., Matthews J., Murphy A. An experimental investigation of the impact response and Post-impact shear buckling behaviour of hybrid composite laminates. *Compos. Struct.* 2023. Vol. 305. Article No 116506. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116506>.

6. Zhang C., He E., Zhu K., Li Y., Yan L., Zheng X. Delamination propagation manipulation of composite laminates under low-velocity impact and residual compressive strength evaluation. *Eng. Fract. Mech.* 2024. Vol. 307. Article No 110333. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110333>.

7. Wang Z., Mao J., Yuan K., Wei K., Yao S. Investigation on impact damage and residual in-plane compression strength of FML laminates. *Int. J. Impact Eng.* 2024. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104956>.

8. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Belova I.V., Bashkova T.I. Issledovanie razvivayushchikh-sya povrezhdeniy pri izgibnom nagruzhении polimernykh kompozitsionnykh materialov i ikh identifikatsiya metodom akusticheskoy emissii [Investigation of damages formed in polymer composite materials under bending loading and their identification by the acoustic emission technique]. *Frontier Materials & Technologies*. 2022. No 2. P. 7–16. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-7-16> (In Russian).

9. Chebotareva E.A., Lunegova E.M., Lobanov D.S., Melnikova V.A. Vliyanie predvaritelnykh udarnykh vozdeystviy na mekhanicheskie svoystva konstruktsionnogo ugleplastika pri mezhsloevom sdvige [Influence of preliminary impacts on the mechanical properties of structural carbon fiber-reinforced plastic at interlayer shear]. *Deformatsiya i razrushenie materialov [Deformation and Fracture of Materials]*. 2024. Iss. 5. P. 31–39 (In Russian).

10. Kalteremidou K.-A., Aggelis D.G., Hemelrijck D.V., Pyl L. On the use of acoustic emission to identify the dominant stress/strain component in carbon/epoxy composite materials. *Mech. Res. Commun.* 2021. Vol. 111. Article No 103663. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2021.103663>.

11. Krishnamoorthy K., Prabhu N. Tensile failure characterization of glass/epoxy composites

using acoustic emission RMS data. *Journal of Polymer Materials*. 2023. Vol. 40. Iss. 3-4. P. 215–226. <https://doi.org/10.32381/JPM.2023.40.3-4.7>.

12. Muir C., Gibson T., Hilmas A., Almansour A.S., Sevener K., Kiser J.D., Pollock T.M., Daly S., Smith C. Machine learning based damage identification in SiC/SiC composites from acoustic emissions using autoencoders. *Compos. B. Eng.* 2024. Vol. 287. Article No 111802. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111802>.

13. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Kannan V.P. Investigation of an improved time of arrival detection method for acoustic emission signals and its applications to damage characterisation in composite materials. *Mech. Syst. Signal Process.* 2025. Vol. 223. Article No 111906. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111906>.

14. Zhu W., Wu Q., Yang L., Zhou Y.C. In situ characterization of high temperature elastic modulus and fracture toughness in air plasma sprayed thermal barrier coatings under bending by using digital image correlation. *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46. Iss. 11. Part B. P. 18526–18533. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.158>.

15. Kim D.H., Seong Y., Kim J.G., Lee J., Seo M.H., Hwang H., Kim H.S. Analysis of bending behavior of TiN particle-reinforced martensitic steel using micro-digital image correlation. *Mater. Sci. Eng. A*. 2020. Vol. 794. Article No 139965. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139965>.

16. Yang J., Gao X., Xu J., Lacidogna G., Shao J., Zhu H., Liu C., Ye C. Insights into the fracture properties of recycled ceramic and rubber composite cement-based materials: Fracture mechanics, acoustic emission, and digital image correlation. *Constr. Build. Mater.* 2024. Vol. 435. Article No 136896. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136896>.

17. Wang Y., Jia L., Chen Z., Han Y., Jia L., Shang J., Yan R. Combining acoustic emission and digital image correlation analysis for dynamic damage response of woven spacer structure reinforced sandwich composites. *Comp. Struct.* 2023. Vol. 319. Article 117162. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117162>.

18. Slovikov S.V., Lobanov D.S., Chebotareva E.A., Melnikova V.A. The influence of technological defects on the mechanical behavior of CFRP during buckling under compression based on DIC data and acoustic emission. *Fratt. ed Integrita Strutt.* 2024. Vol. 18. Iss. 69. P. 60–70. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.69.05>.

19. Strungar E.M., Lobanov D.S. Razvitie metoda korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy (KTsI) primenitelno k mekhanicheskim ispytaniyam pri povyshennykh temperaturakh [Development of the digital image correlation (DIC) method for mechanical testing at elevated temperatures]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2022. No 3. P. 147–159 (In Russian).

20. Staroverov O.A., Babushkin A.V., Gorbunov S.M. Otsenka stepeni povrezhdennosti ugleplastikovyykh kompozitsionnykh materialov pri udarnom vozdeystvii [Evaluation of the damage degree to carbon-fiber composite materials under impact]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2019. No 1. P. 161–172 (In Russian).

**EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURES
AND PRE-IMPACT ON RESIDUAL INTERLAYER STRENGTH
OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC***

Lobanov D.S., Strungar E.M., Staroverov O.A., Chebotareva E.A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

cem.chebotareva@mail.ru

Received by the Editor 2024/09/27

A series of experimental studies have been carried out to determine the effect of elevated temperatures and preliminary impact on the residual interlayer strength of structural carbon fibre reinforced plastics made on the basis of prepreg technology and autoclave moulding. Interlayer shear tests were carried out at room and elevated temperatures on specimens cut in the form of a short beam, which were subjected to preliminary dynamic impacts with different impact energies (from 1 to 6 J). Loading and energy absorption diagrams of specimens in impact tests were obtained and conclusions about material failure under dynamic loads were drawn. Loading diagrams under the influence of elevated temperatures and preliminary impact have been constructed, on the basis of which the most dangerous factors of external impact on structures have been analysed. During interlayer shear tests the stress and strain fields were recorded using a non-contact optical video system and acoustic emission signals were recorded. Based on the analysis of the data obtained using the digital image correlation method, it was possible to evaluate the mechanical behaviour of the test specimens depending on the impact of different intensity and the influence of elevated temperatures. When analysing acoustic emission data, parametric analysis based on cumulative energy and peak frequencies of signals was carried out, and material failure mechanisms at different pre-impact energies were evaluated. According to the results of complex studies of structural material, the process of damage accumulation, change of composite fracture mechanisms and the influence of external factors on the load-bearing capacity of structures made of the investigated material were qualitatively evaluated.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, interlayer shear, mechanical testing, elevated temperatures, pre-impact, digital image correlation method.

*This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (project No FSNM-2024-0013).