

УДК 533.9:539.3-034.14

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ СИЛУМИН/УГЛЕПЛАСТИК

© 2023 г. А. А. Клопотов^а, *, Ю. Ф. Иванов^б, А. М. Устинов^а,
А. Д. Тересов^б, Ю. А. Абзаев^а, В. А. Литвинова^а, **

^аТомский государственный архитектурно-строительный университет,
Томск, 634003 Россия

^бИнститут сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634055 Россия

*e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

**e-mail: victorisain@mail.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 22.10.2022 г.

Принята к публикации 22.10.2022 г.

В работе представлены результаты исследования влияния облучения импульсным электронным пучком поверхности силумина доэвтектического состава на механические свойства материала. В качестве материала исследования использован силумин марки АК5М2 (Al–(4.0–6.0)Si–1.3Fe–0.5Mn–0.5Ni–0.2Ti–2.3Cu–0.8Mg–1.5Zn). Для проведения одноосной деформации растяжением были изготовлены двухсторонние пропорциональные образцы с головками. Также приведены результаты исследования эволюции полей деформаций слоистых композитов силумин/углепластик на одноосное растяжение на базе облученного силумина. Углепластик выполнен из наполнителя – углеродной однонаправленной ткани FibARM Tare-230 – и связующего – двухкомпонентного эпоксидного состава FibARM Resin 530. Методами растровой электронной микроскопии исследована поверхность излома образца. Построены зависимости максимальных и минимальных значений величины деформации в локализаторах на поверхности образца от усредненных деформаций по рабочей области образца. Определено увеличение (относительно силумина в исходном состоянии) прочностных и пластических свойств как образцов облученного силумина, так и композита силумин/углепластик. Выявлен пилообразный характер деформационной кривой одноосного растяжения композитного материала силумин/углепластик с предварительно облученной поверхностью пластины силумина.

Ключевые слова: облученная поверхность, деформация, электронный пучок, композит силумин/углепластик, доэвтектический силумин.

DOI: 10.31857/S1028096023050084, **EDN:** KUECVS

ВВЕДЕНИЕ

Слоистые композитные материалы относят к так называемым материалам с межфазными образованиями (interfacial materials) [1]. Схематически макроструктуру таких материалов можно представить в виде “сэндвича”, состоящего из слоев (структурных элементов), разделенных между собой прослойками, свойства которых значительно отличаются от свойств слоев. Механические свойства слоистых композитных материалов в значительной степени определяются процессами локализации деформации на границах раздела макроструктурных элементов [2].

К классу материалов с межфазными образованиями принадлежат слоистые композитные материалы и наноматериалы. В нанокристалличе-

ских материалах размер зерна в значительной степени способствует ограничению работоспособности традиционных дислокационных механизмов деформации [3]. В результате возрастает вклад зерно-границных процессов, которые приводят к деформационным преобразованиям на более высоком, мезоструктурном, уровне. Это проявляется в механизме относительных смещений структурных элементов [4]. Характер относительного смещения структурных элементов в материалах с межфазными образованиями в значительной степени определяется физико-механическими характеристиками (состоянием) активных зон на границе раздела между материалами [5]. Поэтому воздействуя на состояния активных границ раздела сред в материалах можно управлять механизмами релаксации локальных напряжений.

Высвобождение накопленной упругой энергии в слоистых композиционных материалах сопровождается процессами локализации деформаций на границах раздела структурных элементов. Важно отметить, что процесс диссипации энергии в материалах с межфазными образованиями носит пространственно-согласованный характер [6].

В литературе большое внимание уделено исследованиям повышения механических характеристик материала путем наклейки на поверхность элемента конструкции пленки углепластика [7–12]. Это позволяет в несколько раз повысить усталостную долговечность такого класса слоистых композитных материалов. В то же время, модифицируя определенным способом поверхность сплавов перед наклейкой углепластика, можно дополнительно повысить механические характеристики изделий.

Высокоэнергетичный импульсный электронный пучок является одним из перспективных инструментов для модификации поверхностного слоя металлов и сплавов. В работах [13, 14] показано, что облучение силумина импульсным электронным пучком сопровождается формированием в приповерхностном слое в результате сверхскоростного нагрева и охлаждения столбчатого рельефа, образованного кристаллитами размером менее 1 мкм. В результате созданный высокоэнергетичным облучением приповерхностный слой можно рассматривать как самостоятельную функциональную подсистему, оказывающую значительное влияние на масштабные уровни локализации пластического течения материала [15].

Целью данной работы являлось экспериментальное изучение влияния облучения импульсным электронным пучком поверхности образцов силумина в слоистом композите силумин/углепластик на механические свойства композитного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве материала исследования использован силумин доэвтектического состава марки АК5М2 (Al–(4.0–6.0)Si–1.3Fe–0.5Mn–0.5Ni–0.2Ti–2.3Cu–0.8Mg–1.5Zn, содержание элементов указано в вес. %). Для проведения одноосной деформации растяжением были изготовлены образцы в форме двухсторонних пропорциональных лопаток с рабочей областью размером $17 \times 9.6 \times 3.8$ мм. Часть приготовленных лопаток облучали с двух сторон импульсным электронным пучком на установке “СОЛО” (ИСЭ СО РАН) [16] в следующих условиях: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; длительность импульса пучка электронов 150 мкс; количество импульсов 3; частота следо-

вания импульсов 0.3 с^{-1} ; плотность энергии пучка электронов 15 Дж/см^2 .

Часть облученных и необлученных лопаток была использована для изготовления композитных слоистых образцов силумин/углепластик. Для этого к поверхности необлученных и облученных электронным пучком образцов приклеивали углеродную однонаправленную ткань FibARM Tare-200/30. В качестве связующего применяли двухкомпонентный эпоксидный состав FibARM Resin 530+. Этот клей выполнен на основе тиксотропной смеси эпоксидных смол и алифатического отвердителя. Физико-механические характеристики клея приведены в [17]. Клей имеет прочность на сдвиг 13 МПа. Склеивание проводили при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении. Время полного набора прочности 5 суток.

На рис. 16 на вставке приведено схематически расположение слоев композита силумин/углепластик с предварительно облученной поверхностью силумина, с приклеенным углепластиком. На вставке рис. 1а представлено изображение, полученное методами растровой электронной микроскопии (прибор SEM-515 Philips) при исследовании поверхности излома образца, разрушенного в результате испытаний на растяжение, модифицированного облучением приповерхностного слоя силумина. Геометрические параметры слоев композита силумин/углепластик приведены в табл. 1.

Испытание образцов на растяжение осуществляли на испытательной машине INSTRON 3386 при скорости растяжения 0.3 мм в минуту. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Захваты испытательной машины обеспечивали надежное фиксирование и центрирование образцов. Распределение полей смещений на поверхности образцов в процессе одноосной деформации растяжением получено при помощи цифровой оптической системы Vic-3D на основе метода корреляции цифровых стереоскопических изображений [18, 19]. Перед испытаниями на поверхность образцов была нанесена спекл-картина, необходимая для регистрации смещений точек поверхности в процессе деформации [17, 20]. Измерения эволюции деформационных полей на поверхности исследуемых образцов осуществляли при помощи программы VicSnap на основе полученной синхронной записи изображений с двух камер (рис. 1). В результате были определены относительные продольные деформации (ϵ_{yy} – по оси Y) [17, 18, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены деформационные кривые при одноосном растяжении в координатах σ (нормальные напряжения вдоль оси растяжения)

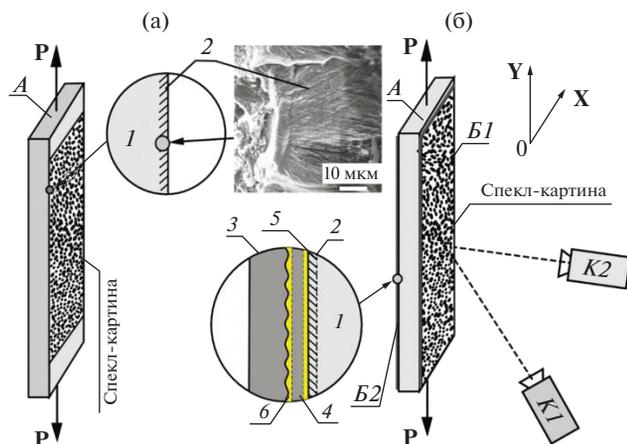


Рис. 1. Схема регистрации изображений модифицированной при помощи облучения импульсным электронным пучком поверхности образца (а) и поверхности образца с наклеенной углепластиковой пластиной (б) при деформации растяжением. На вкладках представлены схематически поперечные сечения с приповерхностных областей образцов и микрофотография облученного приповерхностного слоя сплава: *A* – пластина силумина; *B1* и *B2* – накладки из углепластика; *K1* и *K2* – цифровые камеры; *P* – прикладываемая нагрузка. *1* – основной сплав; *2* – приповерхностный слой, облученный электронным пучком; *3* – углепластиковая пластина; *4* – слой эпоксидного клея; *5* – приграничный слой эпоксидного клея, взаимодействующего с поверхностью силумина; *6* – приграничный слой эпоксидного клея, взаимодействующего с поверхностью углепластика.

от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ силумина марки АК5М2 до облучения, после облучения импульсным электронным пучком и усиленных углепластиком (слоистых композитных материалов силумин/углепластик). Здесь $\epsilon_{\gamma\gamma}$ – усредненная деформация по всему рабочему полю образца (рис. 1).

Анализ зависимости $\sigma - \langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ для необлученного силумина показывает, что разрушение образца произошло до достижения предела прочности σ_B . Разрушение облученного силуминового образца произошло после достижения предела прочности

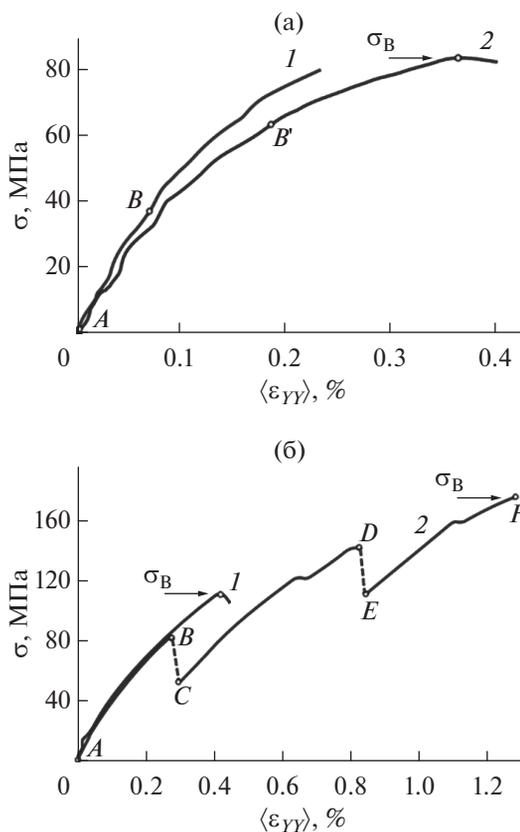


Рис. 2. Деформационные кривые одноосного растяжения силумина (а) и слоистых композитных материалов силумин/углепластик (б). Цифрами обозначены образцы с необлученной поверхностью (1) и образцы, облученные импульсным пучком электронов с плотностью энергии 15 Дж/см² (2).

σ_B (рис. 2а, кривая 2). Кроме того, воздействие импульсным высокоэнергетическим электронным пучком на поверхность силумина сопровождается увеличением пластичности материала на 70% относительно необлученного сплава (рис. 2а).

Как показано в [21, 22], облучение импульсным пучком электронов поверхности силумина

Таблица 1. Геометрические параметры слоев композита силумин/углепластик

№ слоя	Материалы композиционного образца	Толщина слоев
1	Основной металл	2.7 мм
2	Облученный импульсным электронным пучком приповерхностный слой силумина	27 ± 2 мкм
3	Приграничный слой эпоксидного клея, взаимодействующего с поверхностью силумина	10 ± 4 мкм
4	Эпоксидный клей	0.3–0.6 мм
5	Приграничный слой эпоксидного клея, взаимодействующего с поверхностью углепластика	10–20 мкм
6	Углепластик	0.6–0.8 мм

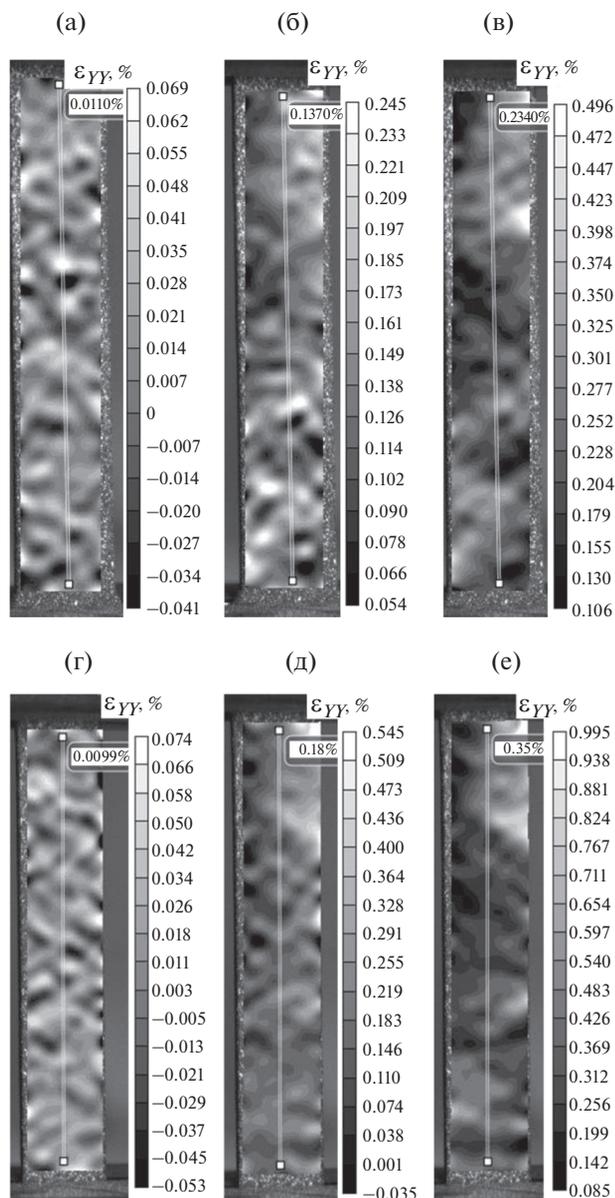


Рис. 3. Картины распределения относительных продольных деформаций ϵ_{yy} на поверхности исследуемых образцов необлученного силумина (а–в), облученного электронным пучком с плотностью энергии 15 Дж/см^2 (г–е) при номинальных значениях деформации ϵ_{yy} (указаны цифрами) 0.0110 (а); 0.1370 (б); 0.2340 (в); 0.0099 (г); 0.1800 (д); 0.35% (е) при одноосном растяжении.

приводит к изменениям структурно-фазового состояния приповерхностного слоя. В результате высокоскоростного плавления поверхностного слоя образцов силумина, инициированного воздействием импульсного пучка электронов, и последующей высокоскоростной кристаллизации поверхностный слой приобретает структуру ячеистого типа с размерами ячеек от 200 до 600 нм. Вдоль границ ячеек располагаются протяженные

прослойки второй фазы, обогащенные преимущественно атомами кремния. В зависимости от параметров электронного пучка толщина модифицированного слоя может достигать 100 мкм и более.

Полученные деформационные кривые слоистого композитного материала силумин/углепластик показывают более высокие механические характеристики, чем исходный контрольный образец и облученный образец (рис. 2). Видно, что усиление необлученного образца силумина наклепкой углепластиковых пластин почти в два раза повышает прочностные характеристики исходного материала и на $\sim 20\%$ повышает предел прочности композитного материала относительно силумина, облученного импульсным электронным пучком.

При исследовании механических свойств слоистого композитного материала силумин/углепластик с предварительно облученной поверхностью пластины силумина, был установлен пилообразный характер деформационной кривой в координатах σ от $\langle \epsilon_{yy} \rangle$ (рис. 2б, кривая 2). На начальном этапе участок деформационной кривой (участок *AB* на кривой 2) практически совпадает с деформационной кривой слоистого композитного материала силумин/углепластик с необлученной поверхностью силумина (рис. 2б, кривая 1). Затем в точке *B* на кривой 2 происходит скачкообразный срыв напряжения до точки *C*. Далее весь процесс деформирования повторяется до точки *D* (участок *CD* на кривой 2). Затем следует скачкообразный срыв напряжения до точки *E* с последующим продолжением роста деформационной кривой вплоть до точки разрушения *F*.

Характер изменений на приведенных деформационных кривых на рис. 2 находит отражение на эволюции распределений деформационных полей на исследуемых образцах (рис. 3, 4).

На приведенных деформационных картинах на поверхности исследуемых образцов на различных стадиях можно наблюдать пространственно локализованное распределение деформационных полей. На этих деформационных картинах приведены локальные области, которые ограничены изолиниями, внутри которых величина деформации имеет одинаковое значение (рис. 3–5). На начальном этапе на деформационных картинах рабочих поверхностей всех исследуемых образцов можно наблюдать три типа областей: области растяжения; области сжатия и недеформируемые области (рис. 3–5). Следует отметить, что с ростом внешнего приложенного напряжения происходят специфические изменения в распределении и в конфигурации этих локализованных областей на поверхности образцов.

При одноосной деформации растяжением контрольных образцов силумина на поверхности

образуются локальные очаги деформации разного знака: растяжения и сжатия (рис. 3). При малых напряжениях на поверхности образца можно наблюдать хаотическое распределение локальных областей деформации разного знака. С ростом приложенной внешней нагрузки на стадии, предшествующей разрушению, локальные области начинают сливаться. Одновременно с этим образуется локальный очаг деформации на боковой грани образца с высоким значением величины деформации (рис. 3в), который при дальнейшем увеличении нагрузки приводит к разрушению контрольного образца силумина.

На основе анализа наблюдаемых на поверхности силумина локальных очагов деформации с максимальными значениями деформации ϵ_{YY}^{\max} и минимальными значениями деформации ϵ_{YY}^{\min} построены зависимости в координатах от $\langle \epsilon_{YY} \rangle$ (рис. 6а). Здесь $\langle \epsilon_{YY} \rangle$ характеризует усредненную деформацию по всему рабочему полю образца при одноосном растяжении. В исходном (необлученном) образце силумина зависимость ϵ_{YY}^{\max} от $\langle \epsilon_{YY} \rangle$ имеет экспоненциальный характер и достигает значений порядка 0.56%. При этом значении деформации в локальном очаге происходит разрушение образца. Значение деформации ϵ_{YY}^{\max} в локальной области в два раза выше величины деформации $\langle \epsilon_{YY}^{\max} \rangle$, усредненной по всему рабочему полю, при которой происходит разрушение образца. На начальном этапе одноосной деформации растяжения на поверхности необлученного образца присутствуют области сжатия в продольном направлении (рис. 3). При достижении усредненной деформации $\langle \epsilon_{YY} \rangle$ значений порядка 0.07% эти области сжатия исчезают (рис. 6а, кривая 2).

Образование таких локальных очагов деформации на поверхности силумина и эволюция деформационных полей при механическом воздействии связана с особенностями структурного состояния силумина. А именно, в исходном состоянии микроструктура силумина представлена зернами твердого раствора на основе алюминия, зернами эвтектики Al–Si, включениями кремния и интерметаллидов игольчатой формы [21, 22].

Облучение поверхности силумина электронным пучком приводит к структурно-фазовым превращениям, что отразилось на деформационной кривой (рис. 2а, кривая 2) и деформационных картинах на поверхности образцов (рис. 3г–3е). На приведенных деформационных картинах облученных образцов в локальных областях наблюдается значительное увеличение деформации в них, а также увеличение их размеров по мере увеличения внешней механической нагрузки (рис. 3г–3е). На основе анализа распределений деформационных полей в зависимости от прило-

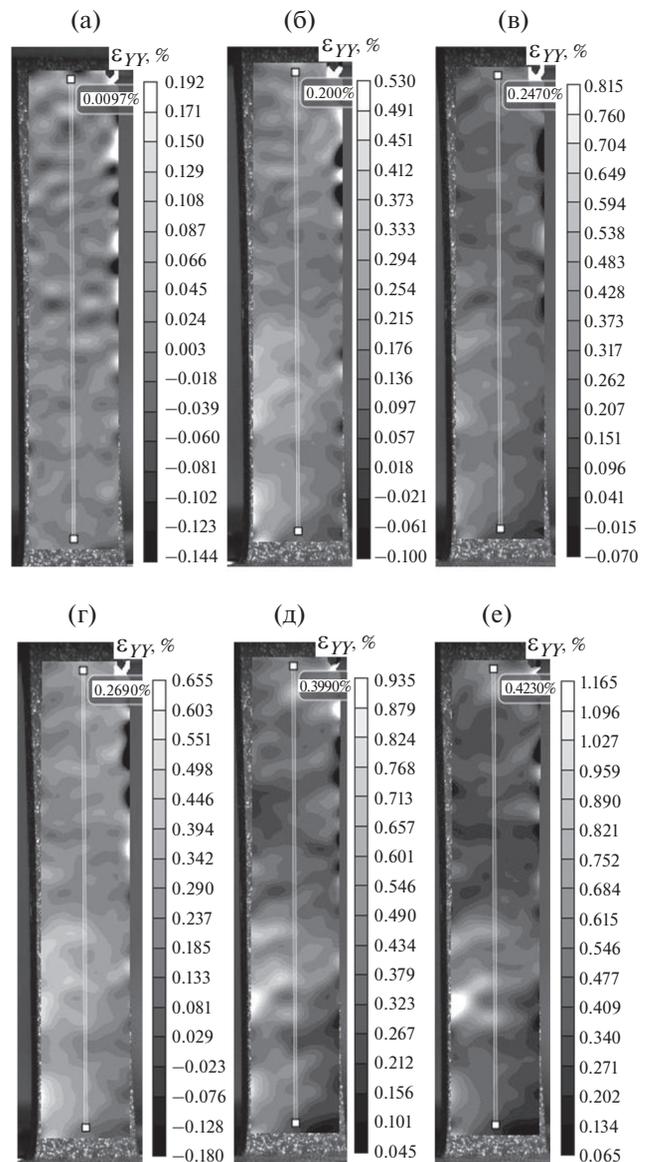


Рис. 4. Картины распределения относительных продольных деформаций ϵ_{YY} на поверхности исследуемых образцов, усиленных углепластиковой наклейкой, при одноосном растяжении при номинальных значениях деформации ϵ_{YY} (указаны цифрами) 0.0097 (а); 0.200 (б); 0.2470 (в); 0.2690 (г); 0.3990 (д); 0.4230% (е).

женной механической нагрузки были получены зависимости ϵ_{YY}^{\max} и ϵ_{YY}^{\min} от $\langle \epsilon_{YY} \rangle$ в облученных образцах (рис. 6б). Видно, что зависимость ϵ_{YY}^{\max} ($\langle \epsilon_{YY} \rangle$) близка к линейной (кривая 1). Другой особенностью зависимости является высокая величина деформации в локальных очагах деформации при разрушении образца, которая достигает значений порядка 1%, что почти в три раза выше, чем усредненная по всему рабочему полю деформация.

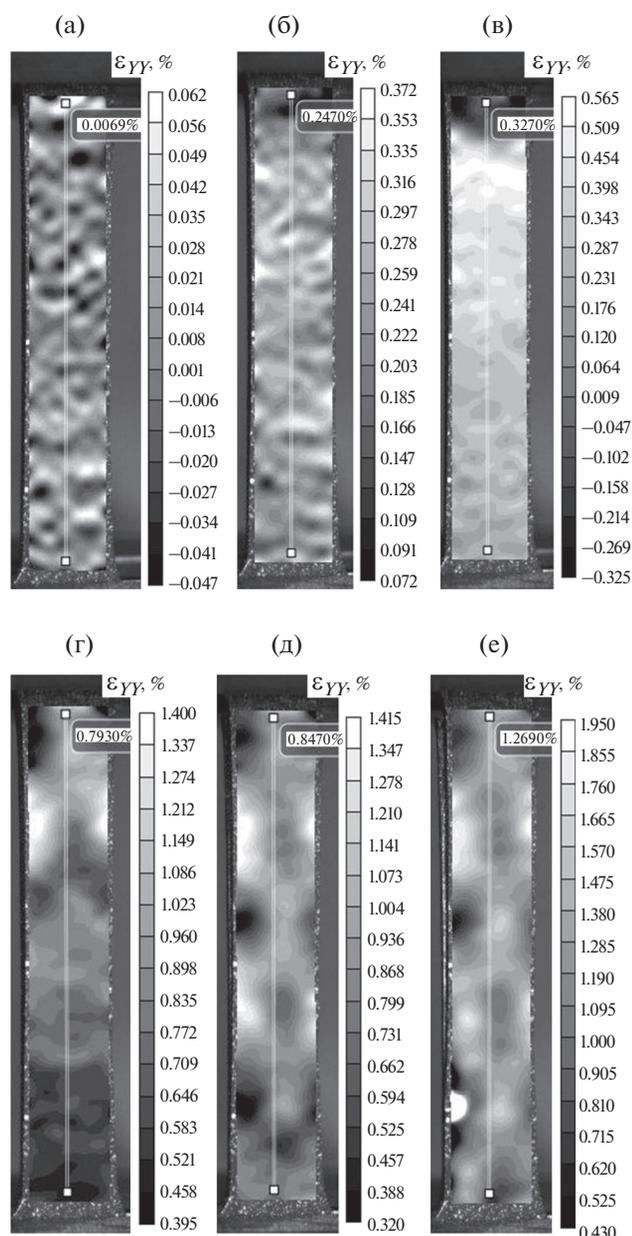


Рис. 5. Картины распределения относительных продольных деформаций $\epsilon_{\gamma\gamma}$ на поверхности углепластика, наклеенного на облученную электронным пучком силиуминовую пластину, в зависимости от величины деформации при номинальных значениях деформации $\epsilon_{\gamma\gamma}$ (указаны цифрами) 0.0069 (а); 0.2470 (б); 0.3270 (в); 0.7930 (г); 0.8470 (д); 1.2690% (е).

На облученной поверхности образца при одноосном продольном растяжении можно наблюдать также локальные области сжатия (рис. 3г, 3д), что отразилось на зависимости $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ (рис. 6б). Эти области сжатия при величине деформации 0.2% в облученном образце исчезают с поверхности при более высоких значениях, чем в необлученном образце. Следует отметить, что на зависи-

мости $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ ($\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$) в области значений $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ от 0 до 0.2% присутствуют осцилляции. Вероятно, такой характер изменения $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ обусловлен релаксационными процессами, происходящими в этих областях сжатия, и вызван метастабильными состояниями, возникшими из-за сверхбыстрой кристаллизации приповерхностного слоя в результате воздействия на поверхность высокоэнергетического электронного луча [21, 22].

Силумины в составе композитного материала силумин/углепластик обладают улучшенными прочностными свойствами (рис. 2б, кривая 1). Композитный материал силумин/углепластик относится к материалам с межфазными образованиями, в котором существует блокирующая межслойная поверхность раздела. Наличие этой межслойной поверхности раздела вследствие процесса пластической релаксации в вязком блокирующем слое препятствует распространению трещины. На начальном этапе деформации композитного материала на поверхности углепластика вдоль боковой поверхности образца образуются локальные очаги деформации сжатия и растяжения, которые вызваны концентраторами напряжений на боковой поверхности металлической пластины. В этих локальных очагах деформация значительно выше, чем в локальных очагах деформации в центральной части образца (рис. 5а). Рост внешней нагрузки способствует дальнейшему образованию локальных очагов деформации на боковых гранях образца с увеличением в них значений деформации (рис. 4б–4д). При напряжениях, предшествующих разрушению образца, картина распределения локальных областей деформации существенно меняется: на фоне протяженной области на всей поверхности образца с положительным значением величины деформации образуется один локальный очаг деформации с высоким значением величины деформации в нем (рис. 4е). Появление такого локального очага деформации на боковой грани образца свидетельствует об образовании трещины в металлической пластине. Дальнейший рост этой трещины и привел к разрушению образца. Такая эволюция деформационных полей на поверхности приклеенного к металлической пластине углепластика отражает особенности строения композитного материала силумин/углепластик и особенности строения углепластика. Результат такого строения углепластика обеспечивает высокие пределы прочности и значения модуля упругости при растяжении. Выявленный локальный очаг деформации на боковой грани на поверхности углепластика свидетельствует об образовании в этом месте трещины на боковой грани пластины силумина. Развитие этой трещины эффективно тормозится приклеенным углепластиком в плоть до достижения критического значения, при котором происходит

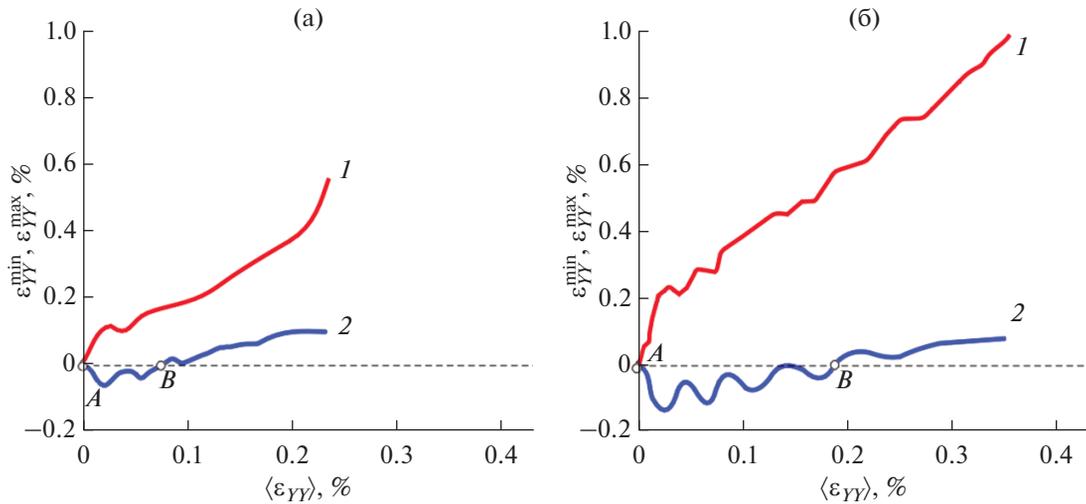


Рис. 6. Зависимости величины максимальной $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ (1) и минимальной $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ (2) продольных деформаций в локальных очагах деформации на поверхности образца от усредненной деформации по всему рабочему полю образца при одноосном растяжении $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$: а – образец необлученного силумина; б – образец с поверхностью, облученной электронным пучком плотностью энергии 15 Дж/см²; АВ – участки на деформационных кривых с отрицательными значениями минимальных деформаций $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ в локальных областях деформации.

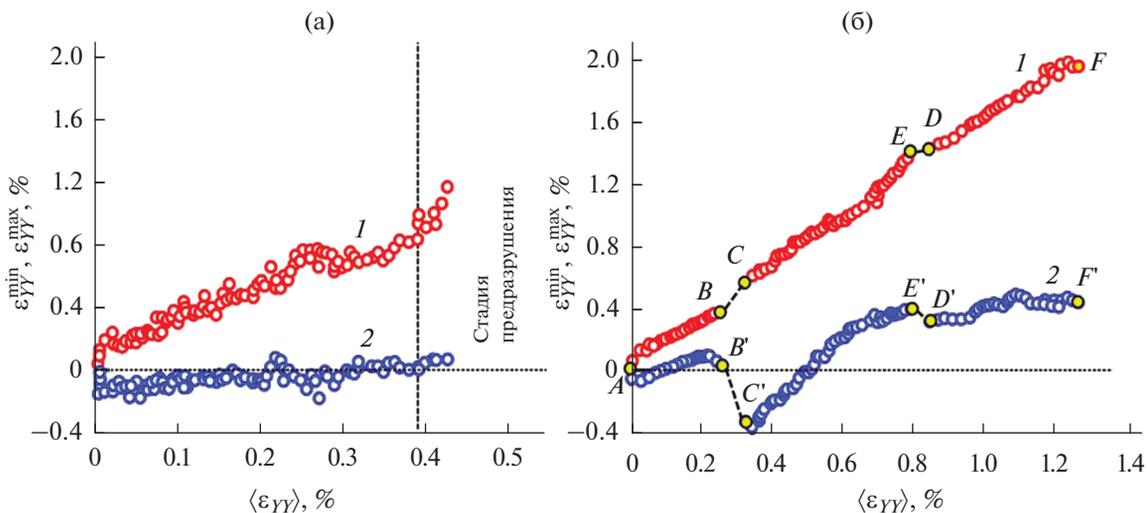


Рис. 7. Зависимости величины максимальной $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ (1) и минимальной $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ (2) продольных деформаций в локальных очагах деформации на поверхности слоистых композитных материалов силумин/углепластик от усредненной деформации по всему рабочему полю образца при одноосном растяжении $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$; а – образец необлученного силумина; б – образец, облученный электронным пучком плотностью энергии 15 Дж/см²; ВС и DE' – участки разрывов на деформационной кривой ABCDEF.

разрушение клеевого слоя. Это подтверждено зависимостями $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ и $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ (рис. 7а). Особенностью этих зависимостей является сильный разброс величины деформации в локальных областях деформаций с $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ и $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$. Это связано с релаксационными процессами, происходящими на поверхности плетеного углепластика, и отражает его структуру. Наличие локальных областей сжатия проявляется на зависимости $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$

на поверхности углепластика, и эти области существуют вплоть до стадии предразрушения композита (рис. 7а, кривая 2).

Выявленный пилообразный характер деформационной кривой композитного материала силумин/углепластик (рис. 2б, кривая 2) с предварительно облученной поверхностью пластины силумина проявляется в особенностях эволюции деформационных полей на поверхности углепластика в процессе одноосного растяжения (рис. 5)

в особенностях зависимостей $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ и $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ (рис. 7б).

Картина распределения деформационных полей на начальной стадии деформации усиленного образца силумина с предварительно облученной поверхностью подобна картине распределений деформационных полей на поверхности углепластика, приклеенного к необлученной пластине силумина (рис. 4а, 4б). Однако при достижении напряжений порядка 80 МПа происходит резкое понижение напряжения до 56 МПа (рис. 2б, участок ВС, кривая 2). Эта область на деформационной кривой $\sigma - \langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ коррелирует с разрывами на зависимостях $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ и $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ (рис. 7б) и отразилась следующим образом на картинах распределений деформационных полей в углепластике. Вблизи верхней головки образца образовалась обширная область сжатия со значительной величиной деформации в ней. Ниже этой области сжатия наблюдается градиентное распределение деформационного поля: в верхней части образца величина деформации равна $\sim 0.55\%$, а в нижней части — близка к значениям $\sim 0.25\%$. Вероятно, такое изменение деформационных полей на поверхности углепластика связано с появлением и распространением трещин на поверхности силумина в верхней части образца. На деформационной кривой дальнейший рост напряжения подчиняется параболической зависимости (рис. 1б, участок CD, кривая 2) и в росте величины деформации на зависимостях $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ и $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ (рис. 7б, участки CE и C'E'). На деформационных картинах, зафиксированных на этом участке деформационной кривой, исчезла область сжатия в верхней части образца, но в целом сохранилось градиентное распределение деформационного поля: в верхней части образца величина деформации равна $\sim 1.3\%$, а в нижней части $\epsilon_{\gamma\gamma} \sim 0.4\%$ (рис. 5г).

Второе резкое понижение напряжения на величину порядка 30 МПа произошло при напряжении 140 МПа (рис. 2б, участок DE, кривая 2), что отразилось на зависимостях $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\max}$ и $\epsilon_{\gamma\gamma}^{\min}$ от $\langle \epsilon_{\gamma\gamma} \rangle$ (рис. 7б, участки DE и D'E') и проявилось на распределении деформационных полей на поверхности углепластика (рис 5г). Локальные области деформации выросли до размеров, соответствующих размерам ячеек плетения углеродной ткани и распространились на поверхности углепластика в шахматном порядке. Соседними областями являются области с высокой (до $\sim 1.4\%$) и низкой ($\sim 0.4\%$) величиной деформации в них (рис. 5д).

Таким образом, интенсивное падение приложенного механического напряжения на деформационной кривой от 140 МПа до 110 МПа сопровождается самоорганизацией локальных очагов деформации в шахматном порядке на поверхно-

сти углепластика. Это явление обусловлено перераспределением нагрузки в слоистом композите после отслоения облученного силумина от углепластика.

На последней стадии, предшествующей разрушению образца, на деформационной кривой (рис. 7б, кривая 2) наблюдается дальнейший рост величины деформации в локализованных очагах деформации (рис. 5е). Образование дополнительного очага деформации вблизи нижней головки образца на боковой грани образца способствовало разрушению. Этот дополнительный очаг деформации на поверхности углепластика соответствует образованию трещины и ее развитию в пластине силумина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что облучение поверхности образцов силумина доэвтектического состава марки АК5М2 импульсным электронным пучком приводит к увеличению пластичности материала на 70% при малом увеличении прочностных свойств. Показано, что в слоистых композитах силумин/углепластик повышаются прочностные и пластические характеристики при использовании пластин силумина доэвтектического состава с облученной импульсным электронным пучком поверхностью.

Выявлен пилообразный характер деформационной кривой одноосного растяжения композитного материала силумин/углепластик с предварительно облученной поверхностью пластины силумина. Показано, при анализе эволюции деформаций на поверхности образцов, что первое падение приложенной внешней нагрузки на деформационной кривой обусловлено появлением трещин в облученном силумине, а как следствие перераспределением нагрузки в слоистом композите, а второе — отрывом углепластика от силумина по всей рабочей области образца, а как следствие, самоорганизацией локальных очагов деформации углепластика.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по Государственному заданию при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № FE MN-2020-0004). Облучение материала импульсным электронным пучком осуществлено при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-48-700010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ochiai S., Hojo M., Schulte K., Fiedler B.* // Composites A. 2001. V. 32. P. 749.
2. *Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В.* // Письма в ЖТФ, 2004. Т. 30. Вып. 6. С. 45.

3. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физмат-Лит, 2004. 224 с.
4. Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
5. Шилько Е.В., Астафуров С.В., Псахье С.Г. // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № спец. 2. С. 269.
6. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ Академкнига, 2003. 423 с.
7. Копаница Н.О., Устинов А.М., Тришкина Л.И., Клопотов А.А., Абзаев Ю.А., Потекаев А.И. // Деформация и разрушение. 2018. № 7. С. 38.
8. Colombi P., Bassetti A., Nussbaumer A. // Theor. Appl. Fracture Mechanics. 2003. V. 39. P. 61.
9. Kim Y.J., LaBere J., Yoshitake I. // Composites B. 2013. V. 51. P. 233.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.026>
10. Kałuża M., Hulimka J. // Procedia Engineering. 2017. V. 172. P. 489.
11. Heshmati M., Haghani R., Al-Emrani M. // Composites B. 2017. V. 119. P. 153.
12. Aljabar N.J., Zhao X.L., Mahaidi R.A.I., Ghafoori E., Motavalli M., Powers N. // Composite Structures. 2016. V. 152. P. 295.
13. Ivanov Yu.F., Zaguliaev D.V., Glezer A.M., Gromov V.E., Abaturova A.A., Leonov A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. // Mater. Lett. 2020. V. 275. P. 128105.
14. Иванов Ю.Ф., Ереско С.П., Клопотов А.А. и др. Исследование влияния облучения электронным пучком на механические свойства при растяжении алюминия марки А7 и слоистого композита алюминий/углепластик. // Материалы XXIV Междунар. научно-практ. конф. Решетневские чтения. Красноярск. 2020. С. 414.
15. Лотков А.И., Псахье С.Г., Князева А.Г., Ляхов Н.З. Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий. Новосибирск: СОРАН. 2008. 276 с.
16. Grigor'ev S.V., Devyatkov V.N., Koval N.N. et al. // Techn. Phys. Lett. 2010. № 2. Iss. 36. P. 158.
17. Копаница Н.О., Устинов А.М., Тришкина Л.И., Клопотов А.А., Абзаев Ю.А., Потекаев А.И. // Деформация и разрушение. 2018. № 7. С. 38.
18. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. 364 p.
19. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. и др. // Вестник ПГТУ. Механика. 2011. № 2. С. 92.
20. Устинов А.М., Клопотов А.А., Потекаев А.И. и др. // Известия АлтГУ. Физика. 2019. № 1. Вып. 105. С. 50.
21. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. Томск: НТЛ, 2016. 315 с.
22. Zaguliaev D., Kononov S., Ivanov Y., Gromov V. // Appl. Surf. Scie. 2019. V. 498. P. 143767.
<https://www.doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143767>.

Influence of Modification of the Surface of a Metal Matrix on the Mechanical Properties of Layered Composites “Aluminum/Carbon Fiber” and Silumin/Carbon Fiber

A. A. Klopotov^{1, *}, Yu. F. Ivanov², A. M. Ustinov¹, A. D. Teresov², Yu. A. Abzaev¹, V. A. Litvinova^{1, **}

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, 634003 Russia

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, 634055 Russia

*e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

**e-mail: victorisain@mail.ru

The paper presents the results of a study of the effect of irradiation of the surface of a hypoeutectic silumin with a pulsed electron beam on the mechanical properties of the material. Silumin grade AK5M2 (Al–(4.0–6.0)Si–1.3Fe–0.5Mn–0.5Ni–0.2Ti–2.3Cu–0.8Mg–1.5Zn) was used as the research material. To carry out uniaxial tensile deformation, two-sided proportional samples with heads were made. The results of studying the evolution of deformation fields of layered composites silumin/CFRP for uniaxial tension based on irradiated silumin are also presented. The carbon fiber is made of a filler – carbon unidirectional fabric FibARM Tape-230 – and a binder – a two-component epoxy compound FibARM Resin 530. The fracture surface of the samples was studied using scanning electron microscopy techniques. The dependences of the maximum and minimum values of strains in the localizers on the sample surface on the averaged strains over the working area of the sample are plotted. An increase (relative to silumin in the initial state) in the strength and plastic properties of both samples of irradiated silumin and of the silumin/CFRP composite was determined. A saw-tooth character of the deformation curve of uniaxial tension of the composite material silumin/carbon fiber with a pre-irradiated surface of the silumin plate is revealed.

Keywords: irradiated surface, deformation, electron beam, silumin/CFRP, hypoeutectic silumin.