

УДК 539.3

*ФЕДОРОВ ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ, академик РААСН,**докт. техн. наук, профессор,**fvs_skzs@mail.ru**Московский государственный университет путей сообщения,**127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9,**КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,**kopanitsa@mail.ru**КЛОПОТОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук,**профессор,**klopotovaa@tsuab.ru**АБЗАЕВ ЮРИЙ АФНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,**abzaev@tsuab.ru**УСТИНОВ АРТЕМ МИХАЙЛОВИЧ, аспирант,**artemustinov@bk.ru**ДАНИЛЬСОН АРТЕМ ИВАНОВИЧ, аспирант,**danilson_ai@mail.ru**КОШКО БОГДАН ОЛЕГОВИЧ, магистрант,**koshkobogdan@mail.ru**Томский государственный архитектурно-строительный университет,**634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований, полученных при использовании оптической измерительной системой VIC-3D, клеевых соединений сталь/углеволокно на осевое и внецентренное растяжение, а также сдвиг. Проанализировано изменение распределения изополей деформаций в приповерхностных слоях клеевых соединений. Установлена корреляция между стадиями на деформационных кривых и картинами эволюции пространственных структурных элементов. В результате выявлено, что пространственные структурные элементы изменялись от хаотических, на упругой стадии деформирования, к локализованным, на упруго-пластических стадиях.

Ключевые слова: клеевое соединение; напряженно-деформированное состояние; корреляция цифровых изображений; углеродная ткань; сталь.

*VIKTOR S. FEDOROV, RRACS Academician, DSc, Professor,**fvs_skzs@mail.ru**Moscow State University of Railway Engineering,**9/9, Obratsov Str., 127994, Moscow, Russia,**DMITRII G. KOPANITSA, DSc, Professor,**kopanitsa@mail.ru**ANATOLII A. KLOPOTOV, DSc, Professor,**klopotovaa@tsuab.ru*

*YURII A. ABZAEV, DSc, Professor,
abzaev@tsuab.ru
ARTEM M. USTINOV, Research Assistant,
artemustinov@bk.ru
ARTEM I. DANIL"SON, Research Assistant,
danilson_ai@mail.ru
BOGDAN O. KOSHKO, Student,
koshkobogdan@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

DIGITAL IMAGE CORRELATION OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATION OF ADHESIVE BONDING

This paper presents experimental results obtained for axial, eccentric tension and shear tests for steel/carbon fiber adhesive bonding using VIC-3D digital optical system. A change of deformation isofields in the surface layers of the samples is shown in this paper. The correlation is detected between the stages on the deformation curves and evolution patterns of spatial structural elements. It is shown that spatial structural elements change from chaotic at the elastic stage to local at elastoplastic stage of deformation.

Keywords: adhesive bonding; stress-strain state; digital image correlation; carbon fabrics; steel.

Введение

Явления локализации деформации играют важную роль в процессах пластической деформации металлических и неметаллических материалов. Эти явления часто определяют и контролируют процессы разрушения элементов конструкций и самих конструкций в целом во время эксплуатации.

В настоящее время на основе обширных экспериментальных данных предложен ряд феноменологических, физических и структурных механизмов деформаций различных материалов от условий деформаций. Везде в этих механизмах ключевую роль играет эволюция локализации деформации в материалах [1–8].

Однако во многих случаях на основе предложенных механизмов не всегда удается удовлетворительно описать физическую природу деформационных процессов, происходящих в материалах. В этой ситуации необходимы прямые *in situ* экспериментальные исследования, направленные непосредственно на изучение эволюции локализации деформации на поверхности различных материалов в зависимости от формы образцов и способов приложения внешних нагрузок. Интенсивное накопление таких экспериментальных данных позволит разработать новые физические теории для выяснения природы состояния материала в экстремальных условиях эксплуатации, предшествующих разрушению элементов конструкций и конструкций в целом.

В этом направлении очень перспективными являются эксперименты с применением трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D [10, 11] с целью анализа *in situ* эволюции неоднородных полей перемещений в приповерхностных слоях в различных материалах с разными геометрическими формами и с разными схемами создания деформационных полей.

Цель данной работы – получить функциональные зависимости кривых деформационного упрочнения $\sigma = f(\epsilon)$ и выявить закономерности между стадиями на деформационных кривых и особенностями распределения областей локальной деформации в приповерхностных слоях стальных образцов и в клеевых соединениях сталь/углеволокно.

1. Методика исследований

Испытание образцов на растяжение осуществлялось на испытательной машине INSTRON 3386 с максимальным растягивающим усилием 100 кН (10,19 тс). Деформирование проведено с постоянной скоростью 0,3 мм в минуту. Оптическая измерительная система VIC-3D использована для определения эволюции распределения деформаций в приповерхностных слоях образцов. Методика проведения испытаний клеевых соединений с использованием оптической измерительной системы VIC-3D подробно описана в предыдущих статьях [12–14].

2. Материалы

Для исследований клеевых соединений сталь/углеволокно были выбраны следующие материалы. В качестве основы для создания образцов взята сталь с механическими характеристиками, указанными в табл. 1 [8].

Таблица 1

Механические характеристики стали

Параметр	Значение
Модуль упругости E , ГПа	212,0
Физический предел текучести, МПа	231,1
Временное сопротивление, МПа	335,4
Максимальное относительное удлинение, %	24,65

Второй составляющей клеевых образцов была углеродная ламель FibARM Lamel – 12/50. Эта ламель имеет форму пластины, изготовленной из углеродных однонаправленных волокон. Механические характеристики ламели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические характеристики углеродной ламели

Параметр	Значение
Прочность на растяжение, ГПа	2,8
Модуль Юнга, ГПа	165

Соединение стальных пластин и углеродных ламелей при изготовлении образцов для эксперимента проводили при помощи эпоксидного клея. Этот клей имеет двухкомпонентный состав FibARM Resin Laminate+ и используется для систем внешнего армирования. Механические характеристики эпоксидного клея приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические характеристики клея FibARM Resin Laminate+

Параметр	Значение
Прочность сцепления (адгезия), МПа	2,5
Прочность при сдвиге образцов клея (7 дней при 23 °С), МПа	13

3. Конструкция образцов

3.1. Эталонный образец для осевого растяжения

Эталонным образцом для испытаний на осевое растяжение была использована стальная пластина размером 120×15×4 мм, выполненная из стали с механическими характеристиками, представленными в табл. 1.

3.2. Плоское клеевое соединение для осевого растяжения

Плоское клеевое соединение представляет собой стальную пластину с организованной трещиной в центре, усиленную накладками из углеткани. Пластина представляет собой систему общей длиной 120 мм из двух стальных пластин и двух накладок.

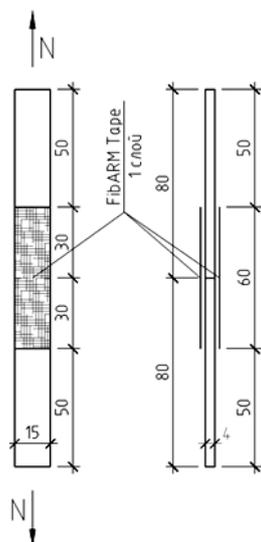


Рис. 1. Конструктивная схема образца клеевого соединения, моделирующая трещину в образце

Трещина организована соединением торцами двух прямоугольных стальных пластин размером 60×15×4 мм. Пластины изготавливались из той же стали, что и эталонные пластины. В качестве накладок для усиления принята углеродная ткань размером 60×15×0,111 мм. Схема образца показана на рис. 1.

При изготовлении образцов для испытаний была выбрана симметричная схема при изготовлении образцов. Поскольку симметричная конструкция образцов клеевого соединения в процессе осевого растяжения компенсирует изгибающие моменты при нагружении, изготовление образцов проводили согласно технологическим требованиям в течение 120 ч с соблюдением всех необходимых для этого процедур. При этом сборку образцов проводили в изготовленном для этой цели специальном кондукторе. Установка толщины клеевого шва осуществлена регулируемыми винтами. Толщина шва составила 0,2 мм.

3.3. Эталонный образец для внецентренного растяжения

Для испытаний был использован стальной равнополочный уголок. На рис. 2, а схематически представлена схема испытаний уголков на внецентренное растяжение.

Сложная объемная конфигурация равнополочного уголка предъявляет особые требования к настройке камер. Исследуемая внутренняя поверхность уголка должна находиться в глубине резкости двух камер (рис. 2, б), а угол

между осями камер установлен в диапазоне от 15 до 45°. Соблюдение этих требований, при внутреннем угле раскрытия 90° равнополочного уголка, привело к значительному увеличению трудоемкости испытаний.

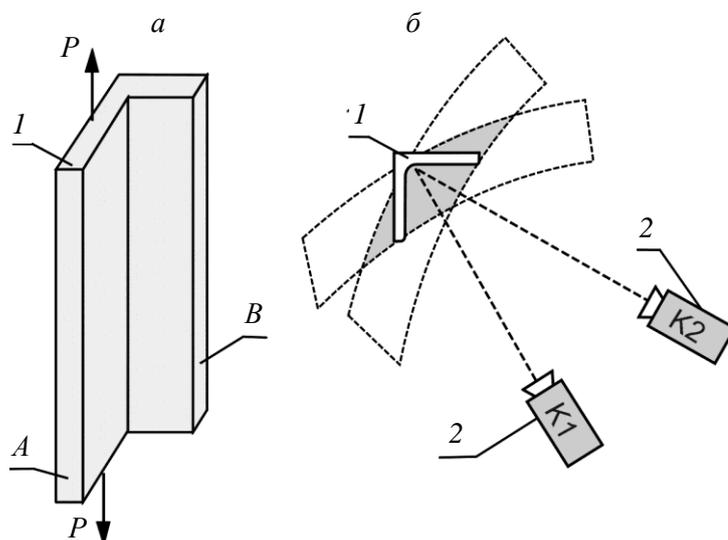


Рис. 2. Схема эксперимента при растяжении:

a – стальной уголок и схема приложенной нагрузки; *б* – расположение видеокамер; 1 – металлические уголки; 2 – видеокамеры К1 и К2; А – нагружаемая пластина стального уголка; В – ненагружаемая пластина уголка

3.4. Пространственное клеевое соединение для внецентренного растяжения

Пространственное клеевое соединение представляет собой стальной уголок с организованной трещиной в центре, усиленной накладками из углеродной ткани. Соединение представляет собой систему общей длиной 260 мм из двух стальных уголков и накладки. Трещина организована соединением торцами двух уголков. Уголки изготавливались из той же стали, что и эталонные пластины. В качестве накладок для усиления принята углеродная ткань. Схема образца показана на рис. 3.

3.5. Клеевое соединение для деформации сдвигом

Для проведения испытаний клеевых соединений на сдвиг был изготовлен специализированный стенд. На рис. 4 представлена схема проведения испытаний образцов на сдвиг. Стенд для испытаний представляет собой систему из двух стальных Г-образных элементов, на боковую поверхность которых приклеиваются углеродные ленты, которые играют роль накладок. Одна из Г-образных деталей имеет паз длиной 70 мм, а другая – зуб длиной 70 мм. При сборке образца зуб одной детали входит в паз другой и производится выравнивание по высоте так, чтобы отверстия под временные крепления совпали. В отверстие вставляется шпилька и стягивается гайками. По боковой поверхности приклеиваются накладки под разными углами для определения рациональной схемы усиления.

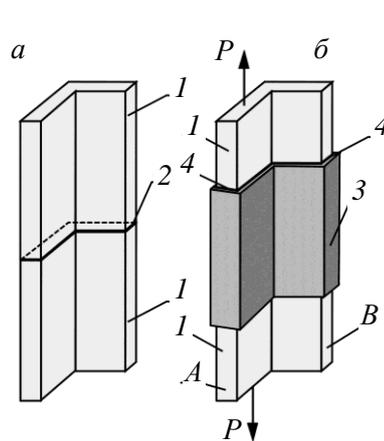


Рис. 3. Схема испытания при внецентренном растяжении:

a – стальной уголок с искусственным дефектом; *б* – образец клеевого соединения металл/клей/углеволокно и схема приложения нагрузки; 1 – металлический уголок; 2 – искусственная трещина; 3 – углеродная ткань; 4 – связующее; *A* – нагружаемая пластина уголка; *B* – ненагружаемая пластина уголка

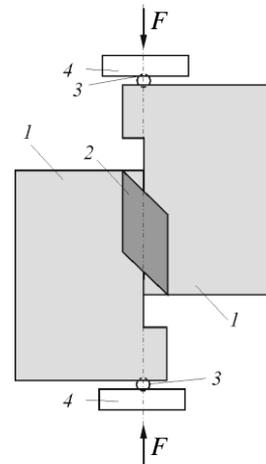


Рис. 4. Схема испытания клеевого соединения на сдвиг:

1 – стальные пластины; 2 – углеродная ткань, приклеенная на поверхность стальных пластин; 3 – центрирующие нагрузку стальные шары; 4 – пластины, передающие приложенную нагрузку

4. Результаты и обсуждение

4.1. Результаты осевого растяжения эталонных образцов

По данным испытаний деформацией на растяжение по шести эталонным образцам, представляющим собой стальные прямоугольные плоские пластины, была построена среднестатистическая диаграмма деформирования (рис. 5). Эта экспериментальная кривая деформационного упрочнения подобна деформационной кривой углеродистой стали марки СтЗсп.

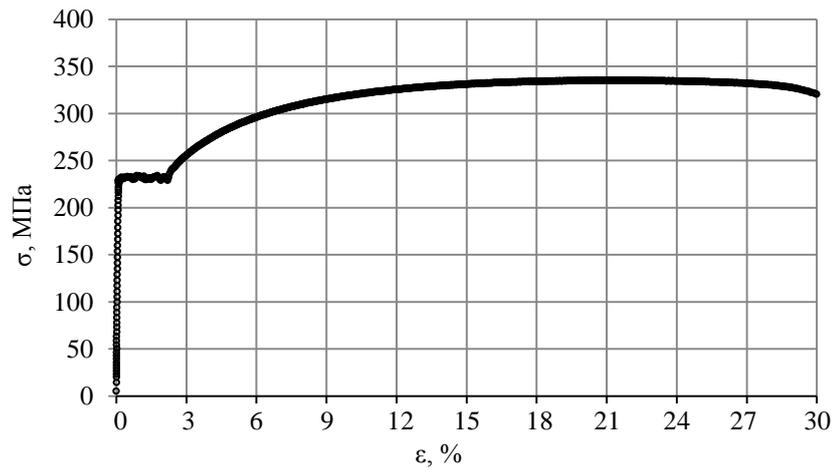


Рис. 5. Диаграмма деформирования эталонной пластины

Картини вертикальных относительных деформаций, полученные при помощи оптической измерительной системы VIC-3D, на боковой поверхности стальной пластины представлены на рис. 6. Анализ картин позволил установить, что изменение распределений локальных полей деформаций коррелирует со стадиями на деформационной кривой. Так на деформационной картине, соответствующей концу упругой стадии, в области захватов произошло образование концентраторов деформаций со значениями в два раза больше, чем общие значения в средней части образца (рис. 6, картины 2 и 3).

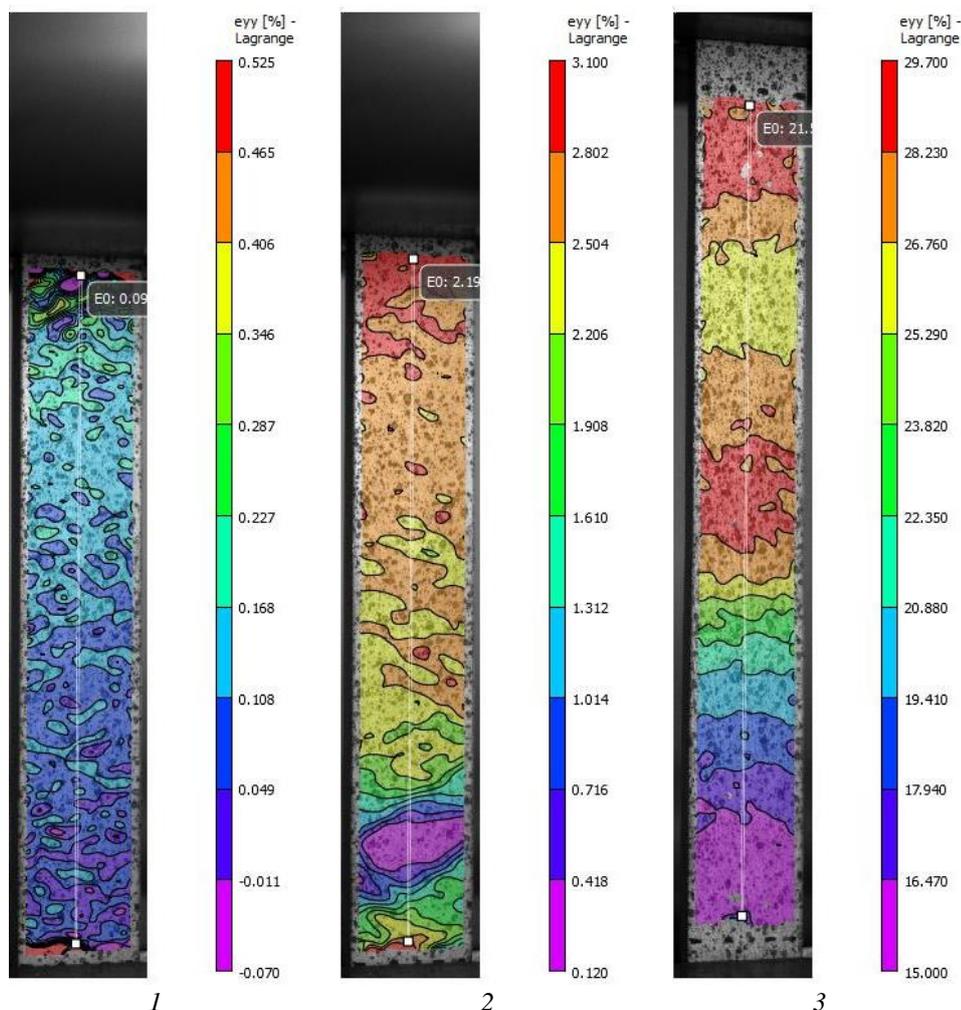


Рис. 6. Картини вертикальных относительных деформаций боковой поверхности стальной пластины:

1 – картина, соответствующая концу упругой стадии на деформационной кривой; 2 – картина, соответствующая концу площадки текучести на диаграмме упругой стадии на деформационной кривой; 3 – картина, соответствующая максимальному значению напряжений на уруго-пластической стадии на деформационной кривой

На деформационной картине (рис. 6, картина 2), соответствующей концу площадки текучести, в нижней части образца эволюционировала зона с наименьшими значениями вертикальных относительных деформаций по значениям в семь раз меньше максимальных деформаций. У верхнего захвата концентраторы деформаций выросли в зону с максимальными деформациями.

На деформационной картине (рис. 6, картина 3), соответствующей максимальному значению напряжений в упругопластической стадии, образец разделен на поперечные полосы с различными значениями деформаций, это говорит о том, что эталонный образец растягивается по центральной оси. Красные полосы – максимальные вертикальные относительные деформации, фиолетовые – минимальные. В середине образца распределение деформаций характеризуется локальными областями с максимальными значениями деформаций.

4.2. Результаты испытаний плоского клеевого соединения

Деформационная кривая клеевого соединения представлена на рис. 7, кривая 1. Из рассмотрения определено, что экспериментальная кривая нагрузка – деформация ($P - \varepsilon$) имеет хорошо выраженный параболический характер. Эта экспериментальная зависимость показывает изменение общей деформации клеевого соединения от величины приложенной нагрузки.

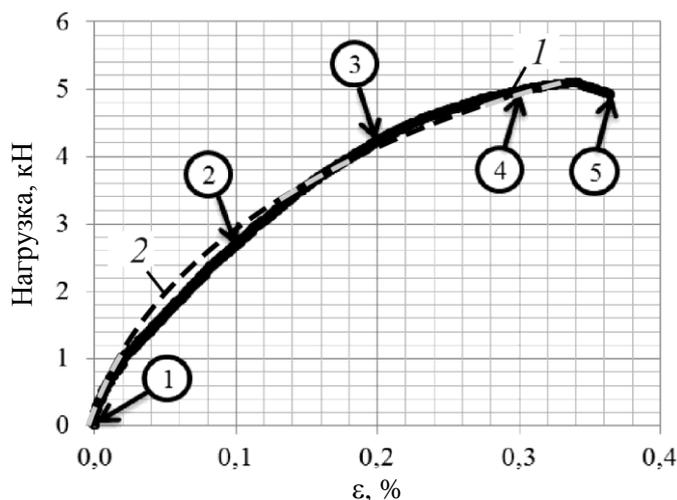


Рис. 7. Экспериментальная деформационная диаграмма (кривая 1) и теоретическая параболическая кривая (кривая 2). Цифрами показаны места на диаграмме, соответствующие картинкам, приведенным на рис. 8, а также соответствующим кривым распределения деформации вдоль вертикальной осевой линии образца рис. 9

Расчет позволил получить близкую к экспериментальной теоретическую зависимость в виде функции $P = a \cdot \varepsilon^n$ (рис. 7, кривая 2), где a – коэффициент, равный 9,1 кН, и n – показатель степени, равный $1/2$. Таким образом, экспериментальная деформационная кривая имеет параболическую зависимость. На кривой не представляется возможным выделить какие-то стадии деформации, отражающие переходы от одних механизмов деформации к другим по мере роста приложенной нагрузки.

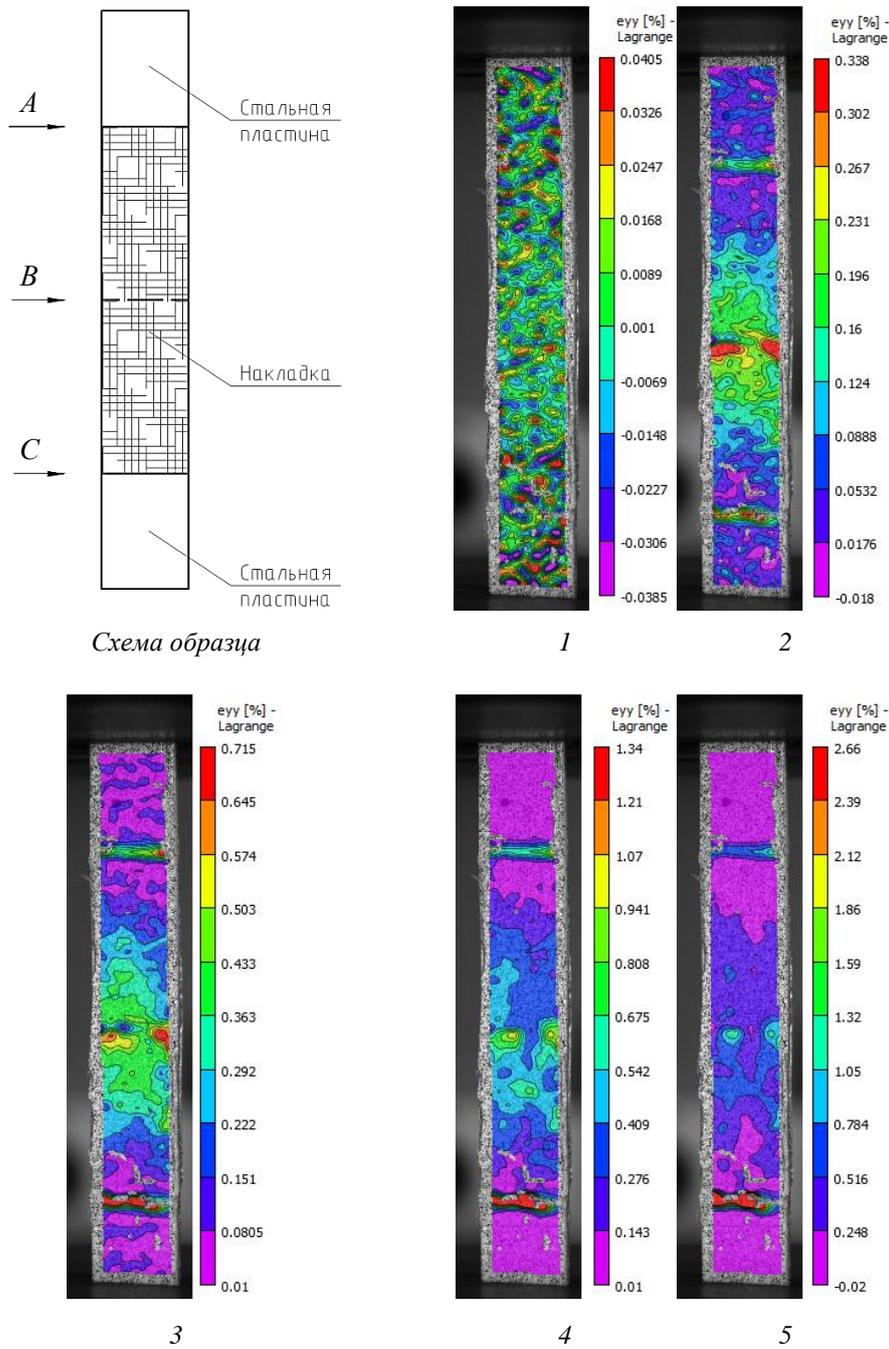


Рис. 8. Схема образца и картины вертикальных относительных деформаций боковой поверхности клеевого образца при нагрузке и соответствующей общей деформации: 1 – 0,11 кН, 0,0009 %; 2 – 44,92 кН, 0,1011 %; 3 – 72,8 кН, 0,2136 %; 4 – 84,12 кН, 0,359 %; 5 – 81,57 кН, 0,3644 %; A, C – края накладки; B – искусственная трещина в стальной пластине. Цифры под картинками соответствуют точкам на диаграмме $P = f(\epsilon)$ на рис. 7

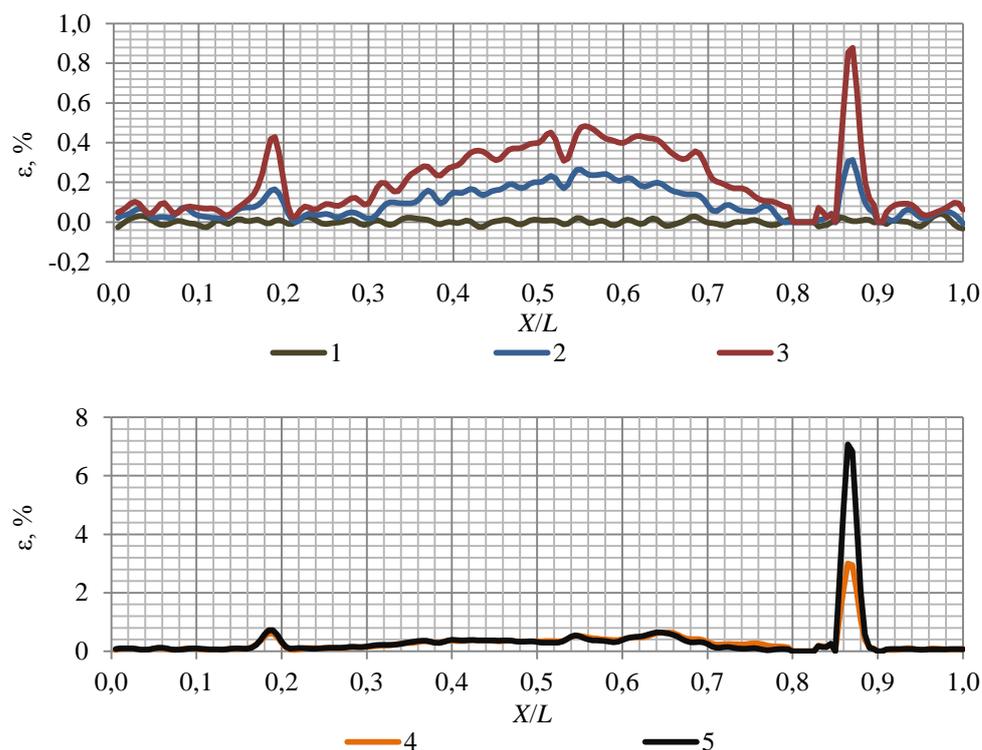


Рис. 9. Распределение деформации по продольной оси образца:
 X – координата по продольной оси образца; L – длина образца. Номера кривых соответствуют точкам на диаграмме $P = f(\varepsilon)$ на рис. 7

Дальнейший анализ деформационной кривой был проведен с привлечением картин, показывающих изменение распределений вертикальных относительных деформаций на исследуемой поверхности клевого соединения (рис. 8). На этих картинах хорошо видно, что концентраторами напряжений, в которых происходит значительный локальный рост деформаций, являются три области. Это области двух концов углеродной ламели, приклеенной к стальной пластине. И третья область – центр образца, в котором находится искусственно созданная трещина. В этих областях по мере роста приложенной нагрузки происходит постепенное и значительное увеличение локальной деформации, которая превышает значение деформации в локальных местах по всей оставшейся поверхности углеродной ламели (рис. 8).

На следующем этапе обработки полученных данных были определены кривые, отражающие распределение вертикальных относительных локальных деформаций вдоль вертикальной осевой линии образца (рис. 9). Номера на этих кривых соответствуют точкам на деформационной кривой на рис. 7, кривая 1.

Представленные в виде функциональных зависимостей $\varepsilon = f(X/L)$ кривые количественно отражают эволюцию распределения локальных деформаций вдоль вертикальной осевой линии на приповерхностном слое углеродной ламели образца и коррелируют с приведенной выше деформационной кривой

деформации образца (рис. 7). Необходимо отметить, что характерной особенностью кривой нагрузка – деформация является отсутствие характерных участков, которые позволили бы выделить на ней деформационные стадии.

Совокупность представленных данных позволяет утверждать, что в процессе деформации клеевого соединения не наблюдается смены механизмов деформации вплоть до разрушения образца. В процессе роста приложенной внешней нагрузки происходит постепенный рост деформации в локальных местах концентрации напряжений на поверхности углеродной ламели с одновременным увеличением деформации по всей площади контакта углеродной ламели за счет передачи напряжений от стальной пластины к углеродной ламели при помощи клеевого соединения.

Таким образом, можно констатировать, что отсутствие стадий на кривой деформационного упрочнения для исследуемого образца обусловлено в основном деформативностью клеевого шва между углеродной тканью и стальной пластиной.

4.3. Результаты испытаний эталонного образца на внецентренное растяжение

В процессе внецентренного растяжения стального равнополочного уголка были получены деформационные кривые. Усредненная кривая деформационного упрочнения, полученная на основе этих исследований, приведена на рис. 10. На этой деформационной кривой стального уголка можно выделить четыре характерных стадии (рис. 10). Стадия I характеризует упругую деформацию, и этот участок очень небольшой. Стадия II является переходной, и на этой стадии начинается нелинейный характер изменения функциональной зависимости $P = f(\epsilon)$. На стадии III деформационной диаграммы наблюдается линейный характер зависимости P от ϵ , и этот участок упруго-пластической деформации заканчивается при деформации 0,027 при нагрузке 60 кН.

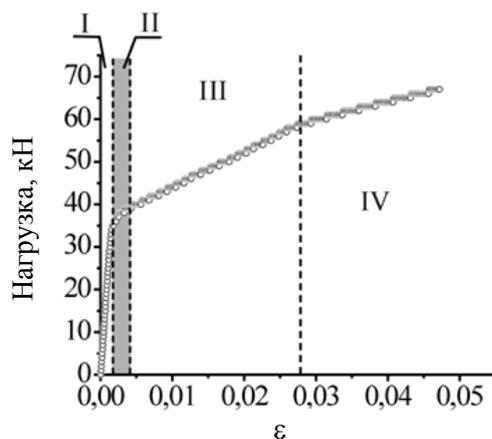


Рис. 10. Диаграмма нагружения стального уголка

Картины вертикальных относительных деформаций боковой поверхности усиленного образца показаны на рис. 11.

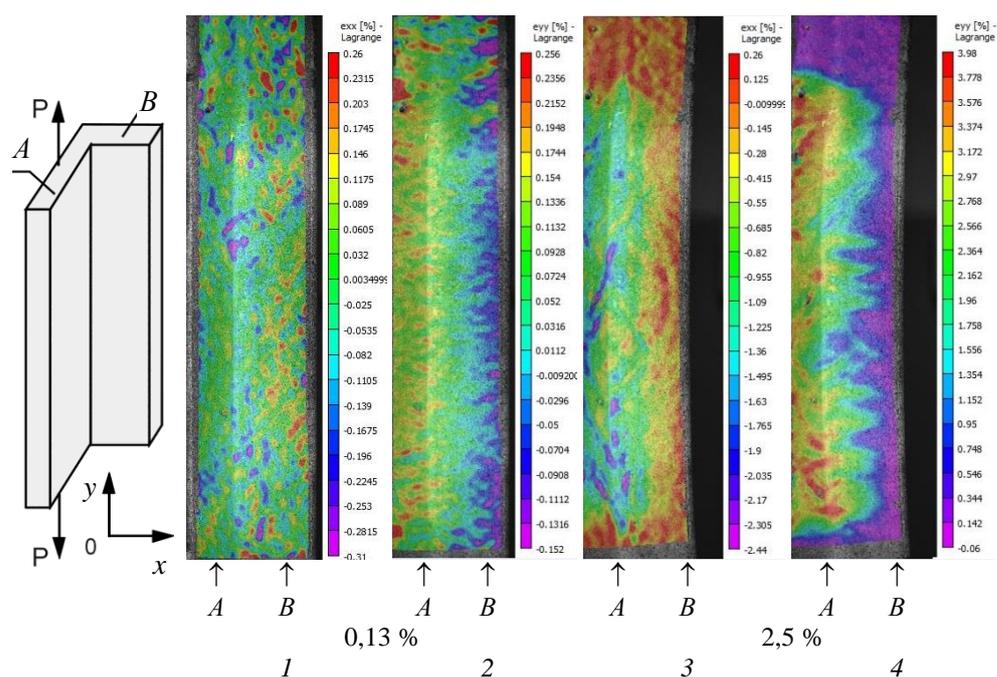


Рис. 11. Схема образца и картины относительных деформаций с внутренней поверхности стальных уголков на разных стадиях деформации:

1, 3 – проекции смещений локальных участков поверхности перпендикулярно оси деформации Ox ; 2, 4 – вдоль оси деформации Oy ; A – нагружаемая пластина уголка; B – ненагружаемая пластина уголка

Переход от стадии III к стадии IV сопровождается уменьшением коэффициента деформационного упрочнения $\varepsilon = f(P)$ и качественным изменением в характере расположения структурных элементов.

Первая стадия является упругой, и на ней наблюдается линейная зависимость деформации от нагрузки. На этой стадии картины поверхностных деформаций характеризуются хаотическим распределением зон локальных деформаций по поверхности. При этом на разных перьях (свободное и нагруженное) наблюдается разный характер распределения локальных деформационных областей, когда свободное перо сжато, а нагруженное – растянуто.

Вторая стадия – переходная, нелинейная зависимость деформаций от нагрузки. Завершается при нагрузке 36,1 кН и общими относительными деформациями образца 0,209 %. Картина поверхностных деформаций характеризуется появлением первых полос пластических деформаций в нагруженном пере вблизи крепления пластины.

Третья и четвертая стадии являются упругопластическими и отличаются разными значениями коэффициентов деформационного упрочнения, как уже было отмечено ранее. Картина распределения деформационных полей на стадии III характеризуется развитием пластических деформаций в нагруженном пере уголка. На стадии IV происходит развитие пластических деформаций в свободном пере.

Изменение угла наклона на третьей стадии диаграммы деформирования сопровождается изменением картин вертикальных относительных деформаций: завершение перехода стадии растянутого пера в пластическую стадию; начало развития пластического течения в свободном пере уголка. Так как форма свободного пера вытянута от плоскости приложения нагрузки, на каждом приращении общих относительных деформаций включается в работу малая доля площади свободного пера, и это приводит к снижению жесткости уголка. До момента перелома в работу по пластическому деформированию была включена вся площадь нагруженного пера, поэтому жесткость была выше.

Процесс пластического деформирования протекает по высоте образца и приводит к образованию локальных центров в разных точках по высоте; по ширине поперечного сечения – полосы деформации распространяются в зоны с меньшими общими деформациями (внецентренное растяжение).

При нагрузке 61,7 кН образец теряет устойчивость, и это сопровождается исчезновением по всему образцу зон сжатия.

Приведенные на рис. 11 данные наглядно показывают качественное изменение локальных областей деформации приповерхностных слоев стального уголка на разных стадиях деформации. Переход от упругой стадии деформации к пластической отражается в изменении распределения локальных деформаций от хаотического к группировке закономерным образом расположенных полос.

4.4. Результаты испытаний пространственного клевого соединения для внецентренного растяжения

В процессе внецентренного растяжения клевого соединения уголков с организованной трещиной (см. рис. 3) получена информация о деформации в приповерхностных слоях на основе использования оптической измерительной системы VIC-3D. Обработка полученных данных позволила получить диаграмму деформирования (рис. 12), показывающую изменение общей деформации всего образца в зависимости от величины нагрузки. Картины, детально отражающие эволюцию распределения изополей относительных деформаций в процессе нагружения, приведены на рис. 13.

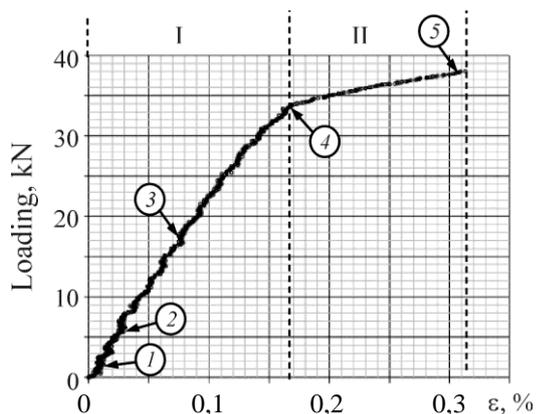


Рис. 12. Диаграмма нагружения слоистого композита металл/клей/углеволокно. Цифрами показаны места на диаграмме, соответствующие картинам, приведенным на рис. 13

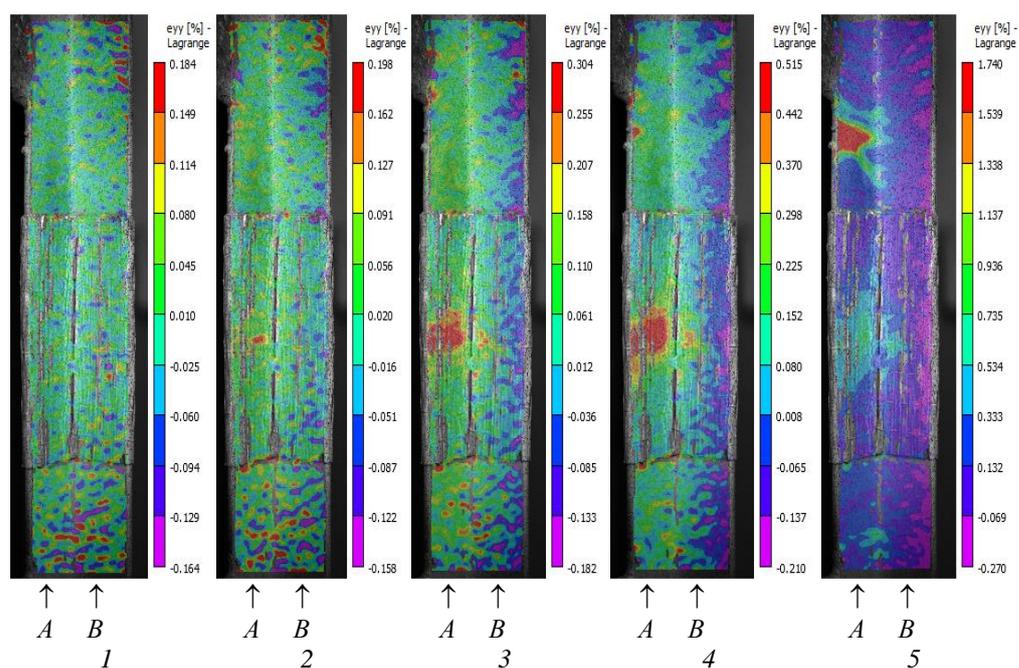


Рис. 13. Картины вертикальных относительных деформаций внутренней поверхности стального уголка и накладок из углеродной ткани на разных стадиях деформирования:

A – нагружаемая пластина уголка; B – ненагружаемая пластина уголка. 1–5 – точки на диаграмме деформирования на рис. 12

На диаграмме деформирования можно выделить две стадии. Первая стадия является упругой и подчиняется закону Гука. Картины поверхностных деформаций на этой стадии характеризуются хаотическим распределением зон локальных деформаций по поверхности, но с выраженным общим деформированным состоянием. Эта стадия характеризуется тем, что на нагружаемой пластине уголка наблюдается растяжение (пластина A на рис. 13), а на свободной пластине уголка (пластина B на рис. 13) – сжатие. В зоне стыка двух пластин на нагружаемой пластине уголка происходит образование и значительное увеличение зоны локальных деформаций при нагрузке 8,2 кН и деформации 0,038 %. Эта стадия завершается при нагрузке 34 кН и общими относительными деформациями образца 0,173 %, и начинается вторая стадия.

Переход к стадии II сопровождается уменьшением коэффициента деформационного упрочнения $\theta = \partial P / \partial \varepsilon$ (рис. 12) и изменением в характере расположения структурных элементов (рис. 13). Эту стадию можно охарактеризовать как упруго-пластическую. Здесь на картинах поверхностных деформаций наблюдается появление первых полос пластических деформаций в нагружаемой пластине уголка в области крепления верхней пластины (рис. 13, картина 4). Стадия завершается разрушением при нагрузке 38,2 кН и общими относительными деформациями образца 0,323 %.

Установлен двухстадийный характер на кривых деформационного упрочнения образцов, полученных при соединении двух стальных уголков

с помощью клеевых соединений накладок из углеродной ткани при внецентренном растяжении. С ростом нагрузки переход от стадии I к стадии II происходит уменьшением коэффициента деформационного упрочнения по сравнению с первой стадией в 8,5 раз и сопровождается изменением в характере расположения структурных элементов. На стадии II деформации на обеих пластинах уголка углеродной ткани становятся соизмеримы, и области локализованной деформации, которые наблюдали на стадии I, практически сливаются в одну однородную область по всей поверхности накладки. Это все наглядно отражает смену механизма деформации образца. При этом в области стыка стальных уголков на нагружаемой пластине остается область локализации деформации, которая образовалась к концу стадии I.

4.5. Результаты испытаний клеевого соединения на сдвиг

При проведении исследований деформационного воздействия на сдвиг при помощи специально изготовленного испытательного стенда (см. рис. 4) и цифровой оптической системы VIC-3D получена информации об эволюции областей локальной деформации и деформации образца в целом. Результаты представлены в виде деформационной кривой на рис. 14. На этой функциональной зависимости нагрузка – сдвиг были выделены четыре стадии. Первая стадия на данной функциональной зависимости отражает деформацию клея между пластинами образца (рис. 4, пластины 1). На второй стадии происходит разрушение клеевого шва между стальными пластинами образца при нагрузке 3,11 кН и величине сдвига 0,004 мм (рис. 14, точка 2). Стадия III характеризуется линейной зависимостью между сдвигом и нагрузкой. Конец стадии (рис. 14, точка 4) наступает при нагрузке 5,77 кН и величине сдвига 0,0219 мм.

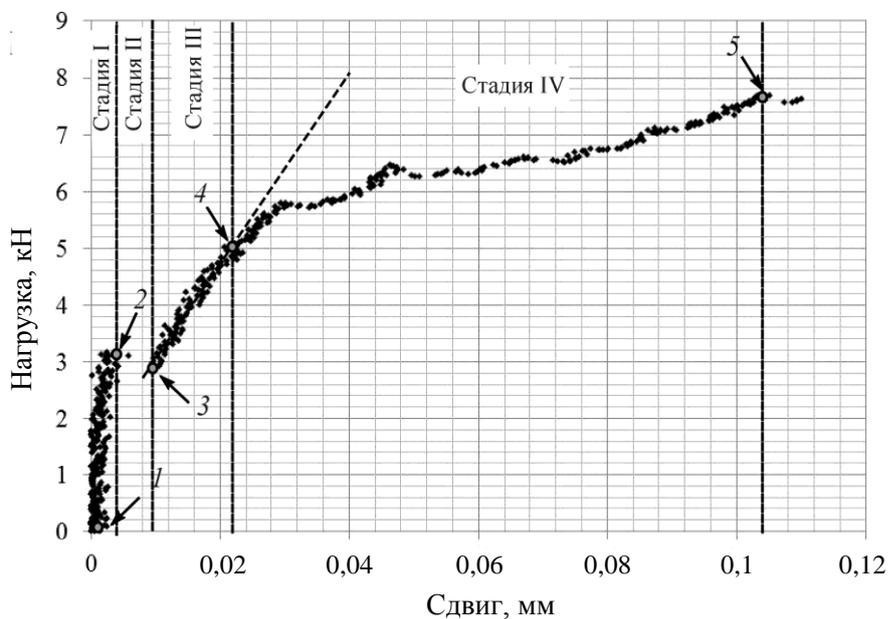


Рис. 14. Кривая деформации в координатах нагрузка – деформация

На этой стадии образец работает цельно, т. е. идет процесс нагружения с возникновением упругих деформаций в клее и углеткани.

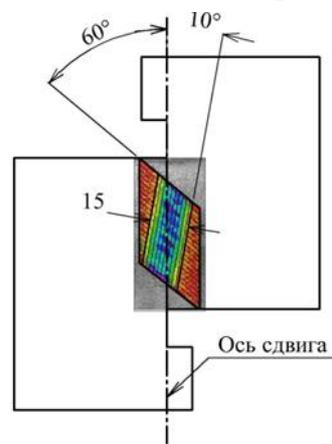


Рис. 15. Схема полосы максимальных деформаций

На стадии IV наблюдается специфический характер изменения на функциональной зависимости нагрузка – сдвиг, которую можно условно назвать «рваной». Деформация образца на этой стадии характеризуется началом адгезионного разрушения по контакту наклейки со сталью и развитием разрушения на всю площадь клеевого соединения. Полная потеря несущей способности клеевого соединения произошла при нагрузке 7,6 кН и величине сдвига 0,104 мм (рис. 14, точка 5).

На картине 5 касательных деформаций (рис. 16) наблюдается полоса максимальных деформаций шириной 15 мм с наклоном в 10° к оси сдвига. Зона максимальных деформаций распределяется несимметрично относительно оси сдвига. Геометрическая схема углеродной наклейки и полосы максимальных деформаций показана на рис. 15. Длина нахлеста волокон углепластиковой наклейки одинакова (15 мм) по обе стороны плоскости сдвига, и угол наклона к оси сдвига равен 60° .

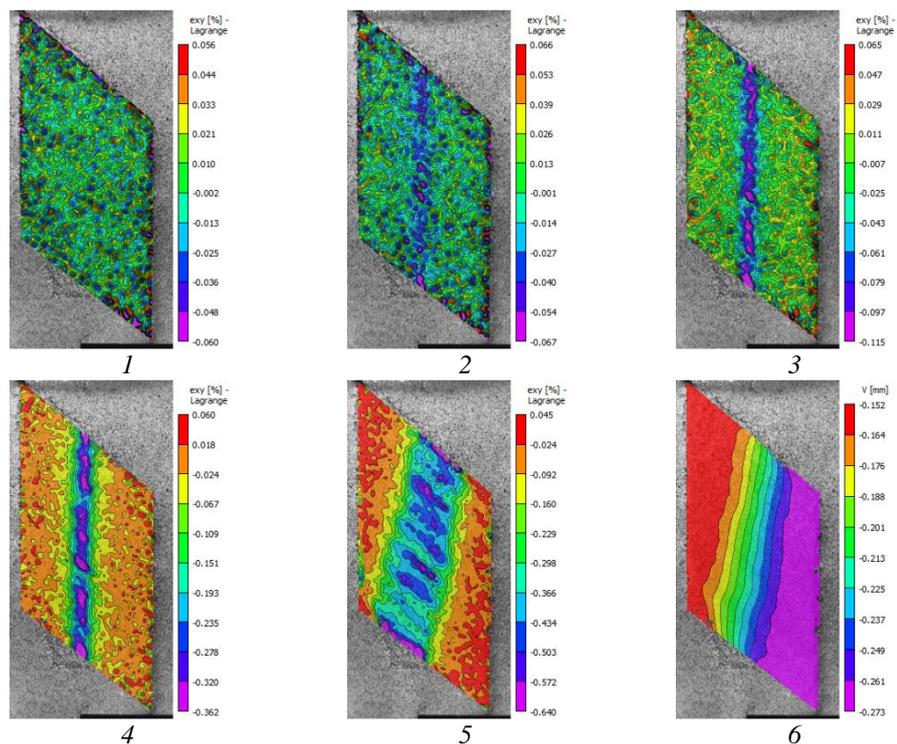


Рис. 16. Картина касательных относительных деформаций (1–5) и сдвига (6) поверхности наклейки из углеткани

Заключение

Таким образом, на основе экспериментальных исследований, полученных при использовании оптической измерительной системы VIC-3D, установлена корреляция между стадиями деформационных кривых и картинками эволюции пространственных структурных элементов в приповерхностных слоях клеевых соединений сталь/углеволокно при различных видах напряженно-деформированного состояния.

В результате выявлено, что пространственные структурные элементы изменялись от хаотических, на упругой стадии деформирования, к локализованным, на упруго-пластических стадиях.

Необходимо также отметить, что полученные результаты отражают многофакторное влияние на процессы деформации при приложении внешней нагрузки на исследуемые образцы. К этим факторам относятся: геометрия образца; способы нагружения материалов, из которых изготовлены композиционные образцы; технология изготовления образцов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Структура зерен поликристаллического агрегата мезо- и микроуровня, соотношение Холла – Петча и стадии деформационного упрочнения* / Э.В. Козлов, Н.А. Конева, Н.А. Смирнов, Н.А. Попова, А.Н. Жданов. – Барнаул : Изд-во АГТУ, 2008. – 76 с.
2. *Особенности переориентации кристаллической решетки и механизм локализации деформации в высокоазотистых аустенитных сталях в условиях их фазовой нестабильности в полях неоднородных напряжений* / И.Ю. Литовченко, А.Н. Тюменцев, Ю.П. Пинжин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 3. – С. 5–14.
3. *Новая мода мезоуровня деформации и переориентации кристаллической решетки механизмами локальных фазовых превращений в полях напряжений* / А.Н. Тюменцев, И.Ю. Литовченко, Ю.П. Пинжин, А.Д. Коротаев [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 1 (29). – С. 314–335.
4. *Панин, В.Е.* Многоуровневая модель деформируемого поликристалла. Проблема Холла – Петча / В.Е. Панин, Д.Д. Моисеенко, Т.Ф. Елсукова // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 15–28.
5. *Новый механизм локализации деформации в аустенитных сталях. II.* Влияние двойникования на закономерности переориентации кристаллической решетки в полосах локализации деформации / А.Н. Тюменцев, И.Ю. Литовченко, Ю.П. Пинжин, А.Д. Коротаев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 95. – № 3. – С. 88–96.
6. *Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей* / П.О. Марушак, С.В. Панин, А.З. Студент, Б.Б. Овечкин. – Томск : ТПУ, 2013. – 236 с.
7. *Влияние структурного состояния поверхностных слоев образцов технического титана на их усталостную долговечность и механизмы усталостного разрушения* / В.Е. Панин, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова, Ю.И. Почивалов, Сундер Рамасуббу // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17. – № 4. – С. 5–12.
8. *Панин, В.Е.* Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел / В.Е. Панин // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 1. – С. 7–34.
9. *Закономерности развития и локализации пластической деформации на поверхности металлических образцов в слоистом композите металл / клей / углеволокно* / А.М. Устинов, Д.Г. Копаница, Б.О. Кошко, А.А. Клопотов // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении : сб. трудов Международной конференции. – Томск : ТПУ, 2015. – С. 21–24.
10. *Третьякова, Т.В.* Особенности использования программного обеспечения VIC-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций / Т.В. Третьякова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 2. – С. 162–171.

11. Третьякова, Т.В. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций / Т.В. Третьякова, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман // Вестник ПГТУ. Механика. – 2011. – № 2. – С. 92–100.
12. *Distribution of local deformations* on the near-surface layers and scale effects of lowalloy steel specimens / A. Ustinov, D. Kopanitsa, A. Potekaev, A. Klopotov // AIP Conference Proceedings. – 2015. – V. 1683. – 020233.
13. Эволюция структурных элементов деформации в приповерхностных слоях образцов из низколегированной стали / Д.Г. Копаница, А.М. Устинов, А.И. Потехаев, А.А. Клопотов // Современные проблемы теории машин : материалы Третьей Международной заочной научно-практической конференции. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2015. – С. 218–223.
14. *Macro-carriers of plastic deformation* of steel Surface layers detected by digital image correlation / D.G. Kopanitsa, A.I. Potekaev, A.A. Klopotov, G.D. Kopanitsa // Advanced materials in technology and construction (AMTC-2015) : Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists «Advanced Materials in Technology and Construction». – Volume number: 1698, 030014, 2016. – P. 030014-1–030014-8.

REFERENCES

1. Kozlov E.V., Koneva N.A., Smirnov N.A., Popova N.A., Zhdanov A.N. Struktura zeren polikristallicheskogo agregata mezo- i mikrourovnya, sootnoshenie Kholla-Petcha i stadii deformatsionnogo uprochneniya [The structure of polycrystalline grains at meso and micro level, Hall-Petch relationship and stages of strain hardening]. Barnaul: ASTU Publ., 2008. 76 p. (rus)
2. Litovchenko I.Yu., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., et al. Osobennosti pereorientatsii kristallicheskoi reshetki i mekhanizm lokalizatsii deformatsii v vysokoazotistyykh austenitnykh stalyakh v usloviyakh ikh fazovoi nestabil'nosti v polyakh neodnorodnykh napryazhenii [Crystal lattice reorientation and deformation localization in high-nitrogen austenitic steels in terms of phase instability in nonuniform stress fields]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2000. V. 3. No. 3. Pp. 5–14. (rus)
3. Tyumentsev A.N., Litovchenko I.Yu., Pinzhin Yu.P., Korotaev A.D., et al. Novaya moda mezourovnya deformatsii i pereorientatsii kristallicheskoi reshetki mekhanizmami lokal'nykh fazovykh prevrashchenii v polyakh napryazhenii [New mode of meso-level deformation and crystal lattice reorientation by local phase transformation in stress fields]. *Voprosy materialovedeniya* [Inorganic Materials: Applied Research]. 2002. No. 1 (29). Pp. 314–335 (rus)
4. Panin V.E., Moiseenko D.D., Elsukova T.F. Mnogourovnevaya model' deformiruемого polikristalla. Problema Kholla-Petcha [Multilevel model of deformed polycrystal. Hall-Petch problem]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2013. V. 16, No. 4. Pp. 15–28. (rus)
5. Tyumentsev A.N., Litovchenko I.Yu., Pinzhin Yu.P., Korotaev A.D., et al. Novyi mekhanizm lokalizatsii deformatsii v austenitnykh stalyakh. II. Vliyanie dvoinikovaniya na zakonomernosti pereorientatsii kristallicheskoi reshetki v polosakh lokalizatsii deformatsii [New mechanism of strain localization in austenitic steels. II. Twinning impact on crystal lattice reorientation in strain localization bands]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography]. 2003. V. 95. No. 3. Pp. 88–96. (rus)
6. Marushak P.O., Panin S.V., Student A.Z., Ovechkin B.B. Masshtabnye urovni deformatsii i razrusheniya teplostoikikh staley [Scale levels of deformation and destruction of heat-resistant steels]. Tomsk: TPU Publ., 2013. 236 p. (rus)
7. Panin V.E., Elsukova T.F., Popkova Yu.F., Pochivalov Yu.I., Sunder Ramasubbu. Vliyanie strukturnogo sostoyaniya poverkhnostnykh sloev obratstov tekhnicheskogo titana na ikh ustalostnyuyu dolgovechnost' i mekhanizmy ustalostnogo razrusheniya [Structural state impact of surface layers of commercial titanium on fatigue life and failure mechanisms]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2014. V. 17. No. 4. Pp. 5–12. (rus)
8. Panin V.E. Sovremennyye problemy plastichnosti i prochnosti tverdykh tel [Modern problems of plasticity and strength of solids]. *Izv. vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal]. 1998. No. 1. Pp. 7–34. (rus)
9. Ustinov A.M., Kopanitsa D. G., Koshko B.O., Klopotov A.A. Zakonomernosti razvitiya i lokalizatsii plasticheskoi deformatsii na poverkhnosti metallicheskikh obratstov v sloistom

- kompozite metall / klei / uglevolokno [Development and localization of plastic deformation on metal surface in a layered composite metal/adhesive/carbon fiber]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Materials and Technologies of New Generation of Material Science'*. Tomsk: TPU Publ., 2015. Pp. 21–24. (rus)
10. *Tret'yakova T.V.* Osobennosti ispol'zovaniya programmnoho obespecheniya VIC-3D, realizuyushchego metod korrelyatsii tsifrovyykh izobrazhenii, v prilozhenii k issledovaniyu polei neuprugikh deformatsii [VIC-3D software implementation for digital image correlation method used in inelastic deformation field]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics]. 2014. V. 7. No. 2. Pp. 162–171. (rus)
 11. *Tret'yakova T.V., Tret'yakov M.P., Vil'deman V.E.* Otsenka tochnosti izmerenii s ispol'zovaniem videosistemy analiza polei peremeshchenii i deformatsii [Evaluation of measurement accuracy using field and strain analysis video systems]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2011. No. 2. Pp. 92–100. (rus)
 12. *Ustinov A., Kopanitsa D., Potekaev A., Klopotov A.* Distribution of local deformations on the near-surface layers and scale effects of low-alloyed steel specimens. *AIP Conference Proceedings*. 2015. V. 1683. 020233.
 13. *Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A.* Evolyutsiya strukturnykh elementov deformatsii v pripoverkhnostnykh sloyakh obrazov iz nizkolegirovannoi stali [Evolution of structural elements of deformation in surface layers of low-alloyed steel]. *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Modern Problems of Theory of Machines and Mechanisms'*. Novokuznetsk: SibGIU Publ., 2015. Pp. 218–223. (rus)
 14. *Kopanitsa D.G., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Kopanitsa G.D.* Macro-carriers of plastic deformation of steel Surface layers detected by digital image correlation. *Proc. 2nd All-Rus. Sci. Conf. of Young Scientists 'Advanced Materials in Technology and Construction'*. 2016. V. 1698. 030014. Pp. 030014-1–030014-8.