

05

Влияние длины искусственного надреза в композиционном материале на величины индикаторов повреждаемости

© А.С. Дзюба,¹ С.И. Елеонский,¹ В.С. Писарев,¹ А.Г. Яшутин²

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 140180 Жуковский, Московская обл., Россия

²ПАО Научно-производственная корпорация „Иркут“, 125315 Москва, Россия
e-mail: juzzerka@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 17 января 2023 г.

Принято к публикации 25 января 2023 г.

Разработан новый экспериментальный метод, который обеспечивает визуализацию картин интерференционных полос, вызванных нанесением искусственного надреза заданной длины в композиционном материале. Деформационный отклик на локальное удаление материала измерен методом электронной спекл-интерферометрии. Интерпретация интерферограмм в терминах тангенциальных компонент перемещений дала возможность определить величины двух деформационных параметров. Эти параметры представляют собой текущие индикаторы повреждаемости, которые необходимы для количественного описания процесса накопления повреждений при циклическом нагружении образцов с концентраторами напряжений. Оба индикатора повреждаемости определены путем прямых физических измерений на основе подсчета количества интерференционных полос. Представлен анализ погрешностей определения индикаторов повреждаемости, которые связаны с некорректным заданием длины искусственного надреза.

Ключевые слова: композиционные материалы, спекл-интерферометрия, искусственный надрез, индикаторы повреждаемости.

DOI: 10.21883/JTF.2023.03.54848.272-22

Введение

Исследование процессов накопления повреждений, зарождения и дальнейшего развития трещины является важным этапом в обеспечении усталостной прочности и, в конечном счете, эксплуатационной надежности критических элементов конструкций [1,2]. Согласно ГОСТ 23207-78 (СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ), усталостное повреждение определяется как необратимое изменение физико-механических свойств материала объекта под действием переменных напряжений. Естественно полагать, что эти необратимые изменения реализуются через изменения микроструктуры. При накоплении повреждений, в большинстве случаев, происходит ухудшение эксплуатационных свойств материала конструкции вследствие деформационных процессов и микроструктурных изменений. Для описания процесса накопления повреждений обычно служит индикатор повреждаемости, используемый в качестве переменной в кинетическом уравнении, которое характеризует скорость накопления повреждений [3–6]. В качестве такого параметра используется макроскопическая величина, численно выражающая изменение повреждаемости в исследуемой области материала конструкции.

В настоящее время для предсказания процесса накопления повреждений и определения на этой основе мо-

мента зарождения усталостной трещины в большинстве случаев используются деформационные, энергетические, феноменологические и микромеханические модели, которые включают различные переменные, ответственные за возникновение повреждений на различных этапах циклического нагружения. Ограниченность подобных подходов состоит в том, что количественное описание каждого дискретного шага в процессе накопления повреждений требует привлечения различных параметров, которые не могут быть получены путем прямых физических измерений [7–10]. Одним из физически обоснованных способов идентификации параметра поврежденности может служить относительное изменение некоторой конкретной прочностной характеристики. Эффективность подобного подхода существенным образом зависит от корректности выбора индикатора повреждаемости и его способности правильно отражать процесс накопления повреждений. Например, весьма перспективный способ количественного описания накопления повреждений заключается в использовании эволюции поверхностной микроструктуры для предсказания момента зарождения трещины [11]. Однако практическое применение данной методики наталкивается на серьезные трудности, связанные с погрешностями измерения характеристик микроструктуры поверхности материала на различных этапах циклического деформирования.

Достичь необходимой точности индикаторов параметров повреждаемости можно, например, с помощью разрушающих методов исследования. Для этого был разработан и верифицирован новый разрушающий метод количественного описания процесса накопления повреждений в нерегулярных зонах металлических образцов при малоциклового усталости [12–15]. Данный подход основан на применении модифицированной версии метода последовательного наращивания длины трещины [16]. Он включает предварительное нагружение образцов до заданного количества циклов и последующее определение параметров механики разрушения, относящихся к искусственному надрезу, который наносится при постоянной внешней нагрузке. Измерение деформационного отклика на локальное удаление материала в форме узкого надреза проводится методом электронной спекл-интерферометрии. При этом надрезы, моделирующие трещину, служат для оценки уровня накопления усталостных повреждений так же, как зондирующее отверстие используется для освобождения энергии остаточных напряжений в методе сверления отверстия [17]. Эффективность предложенной методики иллюстрируется при исследовании малоциклового усталости в окрестности свободного и упрочненного отверстий в плоских образцах. Ключевым моментом разработанного подхода является тот факт, что исходные экспериментальные данные, представляющие собой тангенциальные компоненты перемещений в окрестности вершины надреза, и полученные на этой основе величины коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и Т-напряжений используются в качестве текущих индикаторов повреждаемости. Численное интегрирование зависимостей, описывающих эволюцию по периоду долговечности, как несингулярных (раскрытие берегов надреза и Т-напряжения), так и сингулярных (КИН) параметров механики разрушения обеспечивает получение явного вида функции накопления повреждений [14,15].

Подход, основанный на использовании параметров механики разрушения, относящихся к искусственному надрезу, в качестве текущих индикаторов повреждаемости дает возможность проведения количественного анализа процесса накопления повреждений в металлических материалах. Применение подобной методики для анализа степени поврежденности композиционных материалов, позволяющей оценить, насколько близко состояние конструктивного элемента к исчерпанию деформационного и прочностного ресурса, представляет значительный интерес. Дело в том, что композиционные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, например, в авиастроении [18,19]. Однако для реализации метода, использующего величины, которые измеряются в окрестности искусственного надреза в композиционном материале, необходимо преодолеть ряд технических проблем. Настоящая работа посвящена решению двух взаимосвязанных экспериментальных задач, а именно обеспечению заданной длины надреза и получению при

этом картин интерференционных полос высокого качества.

1. Объекты исследования

В качестве объектов исследования служат два плоских прямоугольных образца с размерами $180 \times 30 \times t$ mm, изготовленные из композиционных материалов с укладкой двух типов. Оба образца имеют центральное сквозное отверстие диаметром $2r_0 = 5.0$ mm, как это показано на рис. 1. Первоначальные отверстия выполнены твердосплавным сверлом диаметром 4.80 mm и затем развернуты до диаметра $2r_0 = 5.0$ mm.

Образец S_11 изготовлен из однонаправленного углепластика с укладкой $[0_{22}]$. Толщина образца составляет $t = 4.25$ mm. Ориентация волокон совпадает с направлением растягивающей нагрузки (продольного модуля упругости). Упругие постоянные материала равны: продольный модуль упругости $E_1 = 138\,000$ МПа; поперечный модуль упругости $E_2 = 7850$ МПа; модуль сдвига $G_{12} = 5300$ МПа; коэффициенты Пуассона $\nu_{12} = 0.25$, $\nu_{21} = 0.014$. Образец S_22 изготовлен из продольно-поперечного углепластика с укладкой $[0/90]_{6S}$. Толщина образца составляет $t = 4.78$ mm. Механические свойства ортотропного материала равны: $E_1 = 73\,100$ МПа; $E_2 = 73\,100$ МПа; $G_{12} = 5300$ МПа; $\nu_{12} = \nu_{21} = 0.25$.

Представленные выше обобщенные механические свойства композиционных материалов определялись на основе итерационного численного анализа форм колебаний прямоугольных пластин, вызванных точечным импульсным ударом. Основные шаги данного подхода заключаются в следующем. На первом этапе упругие постоянные были определены для тонкого ($t = 1.93$ mm) однонаправленного композита с укладкой слоев $[0_{10}]$. Сочетание однонаправленной укладки и малой толщины

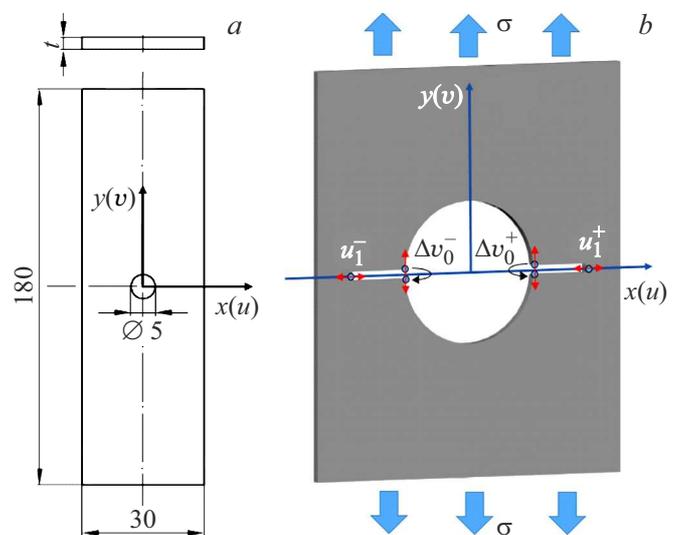


Рис. 1. Схема исследуемых образцов: *a* — чертёж, *b* — искусственный надрез и индикаторы повреждаемости.

квадратной в плане пластины ($160 \times 160 \text{ mm}$) обеспечивает высокую точность сравнения экспериментально определенных и численно смоделированных форм колебаний. Совпадение форм колебаний, полученных двумя способами, напрямую определяет упругие постоянные индивидуального слоя однонаправленного композиционного материала. Эти данные дают возможность получить механические характеристики композиционного материала с продольно-поперечной укладкой, используя соотношения из работы С.Г. Лехницкого [20]. Для повышения надежности упругие постоянные ортотропного материала были дополнительно установлены экспериментально-численным путем для прямоугольной пластины с размерами $227 \times 59 \times 4.78 \text{ mm}$. Механические характеристики ортотропного материала с продольно-поперечной укладкой, полученные двумя способами, демонстрируют хорошее совпадение.

2. Основы экспериментального подхода

Для выполнения надреза при постоянной растягивающей нагрузке каждый образец устанавливается в захватах испытательной машины walter+bai ag, Type LFM-L 25, с диапазоном нагружения $0\text{--}25 \text{ kN}$. Первый важный момент состоит в том, что нагружающее устройство включено в оптическую схему интерферометра, как это показано на рис. 2. Ключевой особенностью, которое необходимо для получения картин интерфе-

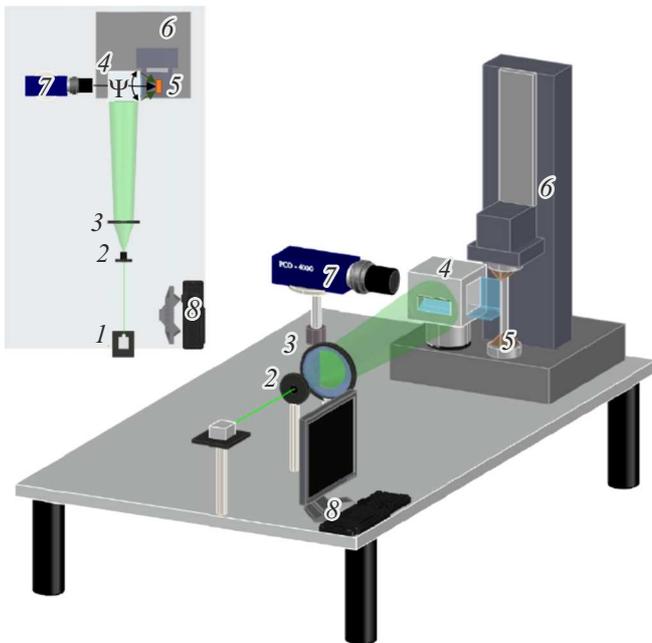


Рис. 2. Схема интерферометра: 1 — диодный лазер, 2 — микрообъектив, 3 — коллимирующая линза, 4 — мобильный модуль, 5 — образец в захватах испытательной машины, 6 — испытательная машина, 7 — видеокамера, 8 — ПК, Ψ — угол наклона освещающих пучков.

ренционных полос, является использование мобильного модуля. Подробное описание данного устройства, которое удаляется из оптической схемы интерферометра для нанесения надреза и затем с интерференционной точностью возвращается на исходную позицию, представлено в работе [16].

Перед нанесением надреза каждый образец нагружается растягивающим усилием. Величина этого усилия должна быть выбрана так, чтобы обеспечить оптимальную плотность картин интерференционных полос. Исходной точкой такого выбора служит опыт, полученный при исследовании металлических образцов с отверстиями. Типичные интерферограммы, полученные при нанесении искусственного надреза от контура отверстия в прямоугольном образце T4_09, приведены на рис. 3.

Образец изготовлен из алюминиевого сплава 1163T и имеет размеры $180 \times 30 \times 4 \text{ mm}$. Диаметр центрального сквозного отверстия равен $2r_0 = 3.0 \text{ mm}$. Механические свойства сплава составляют: модуль упругости $E = 74\,000 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0.33$. Интерферограммы, представленные на рис. 3, получены для значения номинального напряжения $\sigma^M = 53.1 \text{ МПа}$. Плотность полос на обоих изображениях является практически оптимальной для определения параметров, которые используются в качестве текущих индикаторов повреждаемости [14,21]. Первым индикатором, который обозначен на рис. 1, *b*, является величина перемещения вершины надреза u_1 в направлении оси x . В качестве второго индикатора служит раскрытие берегов надреза в его исходной точке на контуре отверстия Δv_0 (NMOD), обозначенное на рис. 1, *b*. Эти параметры определяются, как средние величины, с использованием информации для правого и левого надрезов. Картин интерференционных полос содержат необходимые для этого экспериментальные данные, как это показано на рис. 3.

Величины параметров u_1 и Δv_0 определяются с помощью соотношений метода спекл-интерферометрии [22,23]:

$$u_1 = N^u \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad \Delta v_0 = \Delta N^v \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad (1)$$

где $\lambda = 532 \text{ nm}$ — длина волны лазерного излучения; $\Psi = \pi/4$ — угол между наклонным направлением освещения и нормальным к поверхности объекта направлением наблюдения; N^u определяется прямым подсчетом от полосы нулевого порядка (рис. 3, *a*); ΔN^v представляет собой разность абсолютных порядков полос, которые подсчитываются по одной картине полос между точками, расположенными на противоположных берегах надреза в его исходной точке (рис. 3, *b*). Интерпретация картин интерференционных полос на рис. 3, *a* с учетом первой формулы (1) дает следующие значения

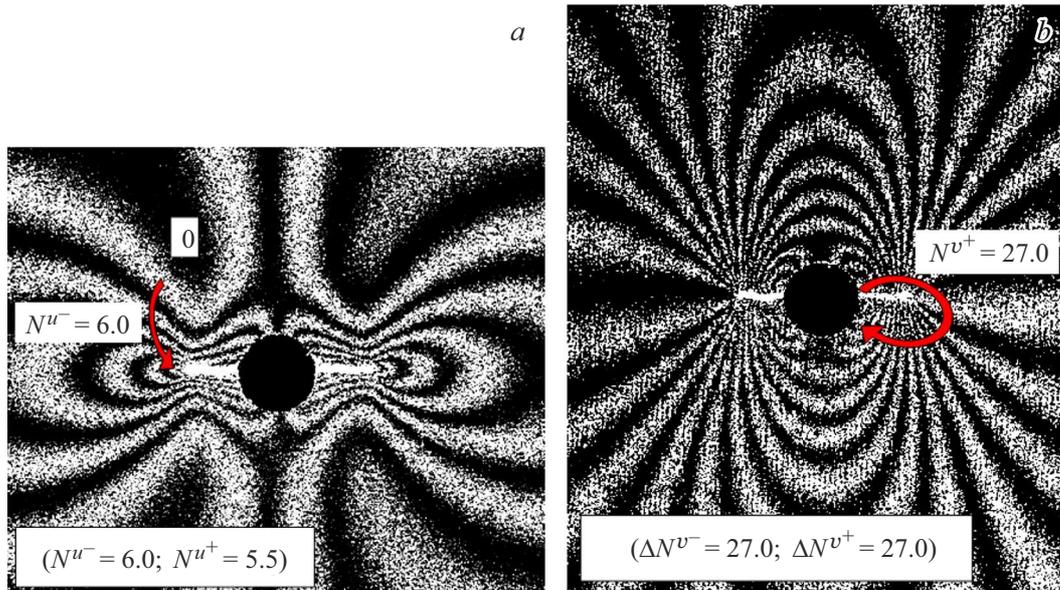


Рис. 3. Образец T4_09. Картины интерференционных полос, полученные в терминах плоской компоненты u (а) и v (б). Исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2.00$ mm (левый надрез) и $\Delta a_1^+ = 2.14$ mm (правый надрез). Средняя длина надреза $\tilde{a}_1 = 2.07$ mm.

первого индикатора повреждаемости:

$$\begin{aligned} u_1^- &= 0.38 \cdot \Delta N^{u-} = 0.38 \cdot 6.0 = 2.28 \mu\text{m}; \\ u_1^+ &= 0.38 \cdot \Delta N^{u+} = 0.38 \cdot 5.5 = 2.09 \mu\text{m}; \\ \tilde{u}_1 &= 0.38 \cdot \Delta \tilde{N}^u = 0.38 \cdot 5.75 = 2.19 \mu\text{m}. \end{aligned} \quad (2)$$

Интерпретация картин интерференционных полос на рис. 3, б с учетом второй формулы (1) дает следующие значения второго индикатора повреждаемости:

$$\begin{aligned} \Delta v_0^- &= 0.38 \cdot \Delta N_0^{v-} = 0.38 \cdot 27.0 = 10.26 \mu\text{m}; \\ \Delta v_0^+ &= 0.38 \cdot \Delta N_0^{v+} = 0.38 \cdot 27.0 = 10.26 \mu\text{m}; \\ \Delta \tilde{v}_0 &= 0.38 \cdot 27.0 = 10.26 \mu\text{m}. \end{aligned} \quad (3)$$

Плотность полос на интерференционных картинах, приведенных на рис. 3, так же как и величины индикаторов повреждаемости (2) и (3), близки к идеальным параметрам. Главная цель настоящей работы — добиться такого же результата для образцов, изготовленных из композиционного материала. Первый вопрос, который необходимо решить, связан с уровнем номинального напряжения. Для получения ответа желательно использовать минимальное количество итераций, так как количество образцов всегда ограничено. Исходной точкой является выбор значения номинального напряжения σ по соотношению к модулям упругости композиционного и металлического образцов в направлении прикладываемой нагрузки. Это соотношение для однонаправленного композиционного материала равно

$$E_1/E = 138\,000/74\,000 = 1.86. \quad (4)$$

Картины интерференционных полос на рис. 3 получены для номинального напряжения $\sigma^M = 53.1$ МПа. Оценка (4) дает ориентировочную величину номинального напряжения для композиционного материала $\sigma_0^C = 98.8$ МПа. Далее необходимо учесть два фактора. Первый из них заключается в разнице между диаметрами отверстий в металлическом и композиционном образцах, а именно $2r_0^M = 3.0$ mm и $2r_0^C = 5.0$ mm. Условно можно принять „первый коэффициент ослабления“ равным $3/5 = 0.6$. Второй момент выбора внешней нагрузки связан с длиной искусственного надреза. В металлическом материале выполнить надрез длиной $a_1^M \cong 2$ mm не составляет особых проблем. Однако для образцов, изготовленных из композиционного материала, точно выполнить надрез длиной $a_1^C \cong 2$ mm значительно сложнее. Дело в том что, во-первых, для проведения оптико-интерференционных экспериментов исходная (черная) поверхность образцов покрывается тонким слоем матовой белой эмали. Во-вторых, качество контура отверстия в композиционном образце хуже качества контура отверстия в металлическом образце с точки зрения механической обработки. Оба этих обстоятельства вызывают трудности в разметке и приводят к увеличению минимально возможной длины искусственного надреза. Кроме того, сопротивление композиционного материала воздействию узкого полотна ювелирного лобзика значительно выше, чем у алюминиевого сплава. В настоящей работе предпринимается попытка получить картины полос в композиционном образце для надреза длиной $a_1^C \cong 2.7$ mm. Условный „второй коэффициент ослабления“ есть $2.0/2.7 = 0.74$. Таким образом, „суммарный коэффициент ослабления“ k^R для выбора уровня но-

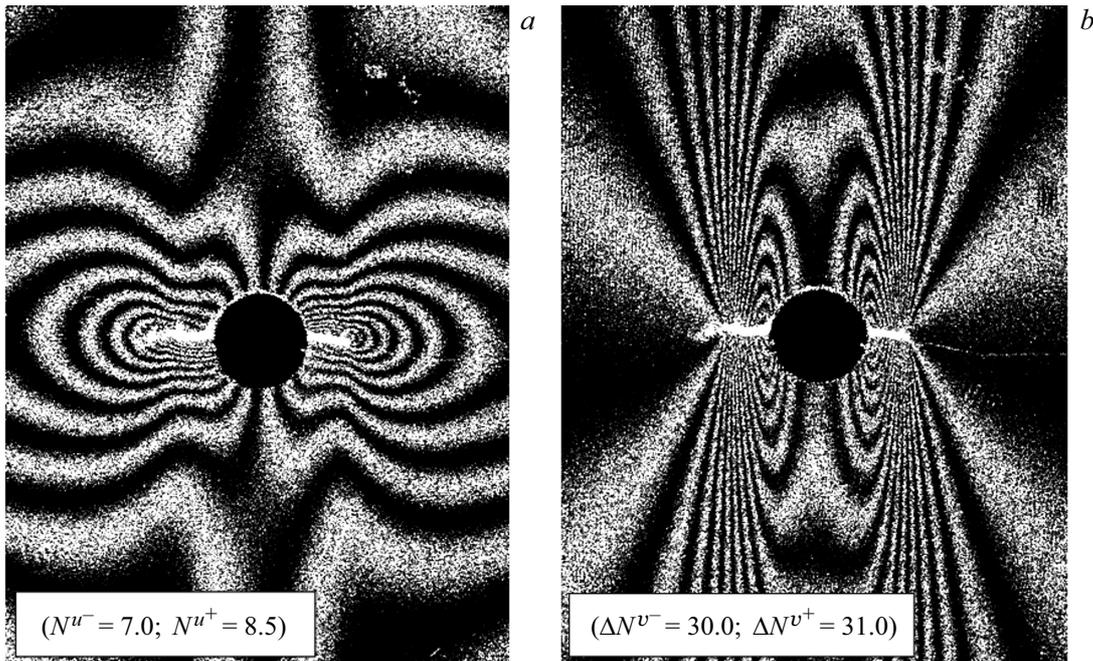


Рис. 4. Образец S_11-1. Картины интерференционных полос, полученные в терминах плоской компоненты u (а) и v (б). Исходная длина надреза $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2.45$ mm (левый надрез) и $\Delta a_1^+ = 2.17$ mm (правый надрез). Средняя длина надреза $\tilde{a}_1 = 2.3$ mm.

минального напряжения σ^C можно оценить следующим образом:

$$k^R = 0.6 \cdot 0.74 = 0.44. \quad (5)$$

Соотношение (5) дает возможность оценить уровень номинального напряжения, приемлемого для образца, изготовленного из композиционного материала:

$$\sigma_1^C = k^R \sigma_0^C = 0.44 \cdot 98.8 = 43.5 \text{ MPa}. \quad (6)$$

На основе оценки (6) для проведения дальнейших экспериментов величина номинального напряжения с некоторым запасом в сторону уменьшения плотности полос выбрана равной $\sigma^C = 39.1$ MPa.

3. Методика эксперимента и полученные результаты

3.1. Однонаправленный композиционный материал

Картины интерференционных полос, полученные в результате нанесения первого надреза для величины номинальных напряжений $\sigma^C = 39.1$ MPa, показаны на рис. 4. Начало симметричного надреза шириной $\Delta b = 0.2$ mm расположено в двух точках пересечения оси симметрии образца (оси x) с контуром отверстия. Эти интерферограммы характеризуются практически идеальным качеством и структурой. Следует, однако, отметить, что плотность полос на рис. 4, б достигает практически предельной степени разрешения. Таким образом, подтверждается справедливость выбора величины номинального

Таблица 1. Последовательность экспериментальной процедуры для Образца S_11

Нумерация надрезов	a_{1-1}^-	a_{1-1}^+	—	—	—	—	—	—
a_{1-1} , mm	2.45	2.17	a_{1-1}^-	a_{1-1}^+	—	—	—	—
a_{1-2} , mm	—	—	2.45	2.70	a_{1-3}^-	a_{1-3}^+	—	—
a_{1-3} , mm	—	—	—	—	2.59	2.70	a_{1-4}^-	a_{1-4}^+
a_{1-4} , mm	—	—	—	—	—	—	2.66	2.70
\tilde{a}_1 , mm	2.31		2.58		2.65		2.68	
ΔN_0^v , полос	30.0	31.0	30.0	36.0	31.5	36.0	31.5	36.0
Δv_0 , μm	11.40	11.78	11.40	13.68	11.97	13.68	11.97	13.68
$\Delta \tilde{v}_0$, μm	11.59		12.54		12.83		12.83	
ΔN^u , полос	7.0	8.5	9.0	10.0	9.5	10.5	9.5	11.0
u_1 , μm	2.66	3.23	3.42	3.80	3.61	3.99	3.61	4.18
\tilde{u}_1 , μm	2.95		3.61		3.80		3.89	

напряжения σ^C с запасом согласно оценке (6). Это означает, что первый же образец обеспечил достижение требуемого результата.

Основной целью исследования является получение картин интерференционных полос, которые соответствуют средней длине надреза $\tilde{a}_1 \approx 2.70$ mm. Поэтому для одного образца регистрируются четыре набора картин

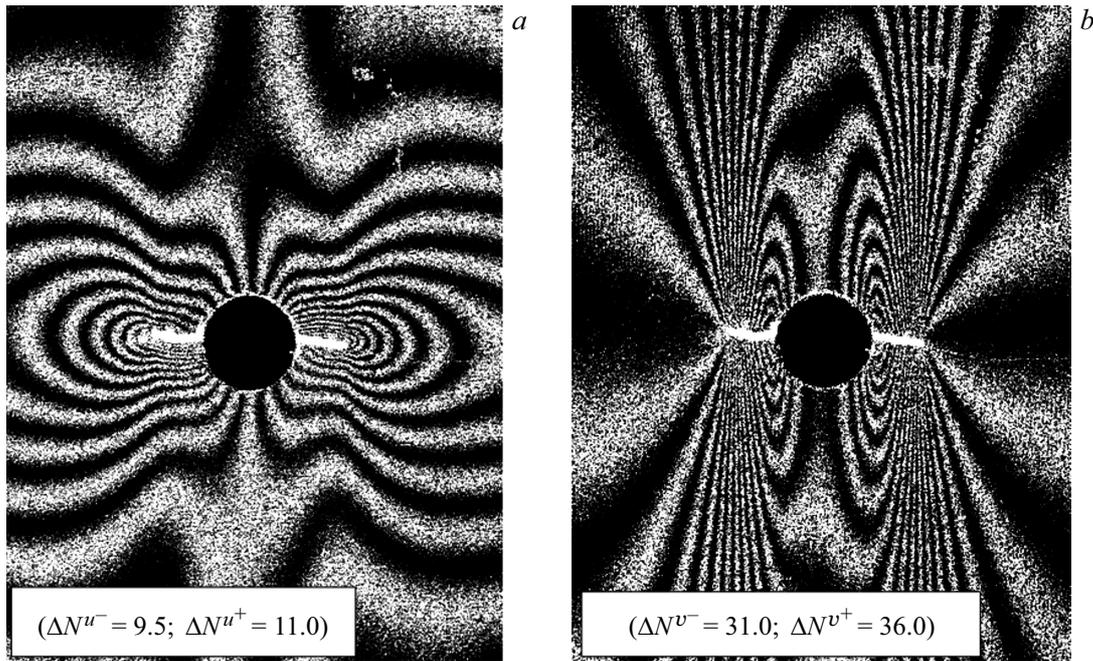


Рис. 5. Образец S_11. Картины интерференционных полос, полученные в терминах плоской компоненты u (а) и v (б). Исходная длина надреза $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2.66$ mm (левый надрез) и $\Delta a_1^+ = 2.70$ mm (правый надрез). Средняя длина надреза $\tilde{a}_1 = 2.68$ mm.

интерференционных полос. Первый из них соответствует специально заниженной величине $\tilde{a}_{1-1} \approx 2.31$ mm. Затем длина надреза последовательно увеличивается только для одной из ветвей двустороннего надреза, достигая суммарной длины \tilde{a}_{1-2} , \tilde{a}_{1-3} и \tilde{a}_{1-4} . Исходное состояние поверхности, естественно, регистрируется только один раз и используется при визуализации всех четырех наборов интерферограмм. Полная последовательность реализованной процедуры представлена в табл. 1.

Картины интерференционных полос, полученные в результате нанесения четвертого надреза, показаны на рис. 5. Правая и левая ветви надреза имеют практически равную длину. Средняя длина надреза составляет $\tilde{a}_1 = 2.68$ mm, что соответствует достижению поставленной цели. Следует отметить, что качество интерференционной картины на рис. 5 не уступает идеальному качеству полос на рис. 4, хотя они получены с задержкой по времени регистрации для первого и четвертого разреза с использованием одного и того же исходного состояния. Данный факт наглядно свидетельствует о высокой степени надежности разработанной экспериментальной методики.

3.2. Композиционный материал с продольно-поперечной укладкой

Соотношение продольных модулей упругости Образца S_11 и Образца S_22 составляет:

$$E_1^{11}/E_1^{22} = 138\,000/73\,100 = 1.89. \quad (7)$$

Таблица 2. Последовательность экспериментальной процедуры для Образца S_22

Нумерация надрезов	a_{1-1}^-	a_{1-1}^+	—	—	—	—	—	—
a_{1-1} , mm	2.63	2.24	a_{1-2}^-	a_{1-2}^+	—	—	—	—
a_{1-2} , mm	—	—	2.63	2.77	a_{1-3}^-	a_{1-3}^+	—	—
a_{1-3} , mm	—	—	—	—	2.77	2.77	a_{1-4}^-	a_{1-4}^+
a_{1-4} , mm	—	—	—	—	—	—	2.91	2.77
\tilde{a}_1 , mm	2.43		2.70		2.77		2.84	
ΔN_0^v , полос	34.0	37.0	34.0	42.0	38.0	42.0	40.0	42.0
Δv_0 , μm	12.92	14.06	12.92	15.96	14.44	15.96	15.2	15.96
$\Delta \tilde{v}_0$, μm	13.49		14.44		15.20		15.58	
ΔN^u , полос	4.5	4.0	5.0	4.5	6.0	5.0	6.0	5.5
u_1 , μm	1.71	1.52	1.90	1.71	2.28	1.90	2.28	2.09
\tilde{u}_1 , μm	1.62		1.80		2.09		2.19	

Использование коэффициента (7) и соотношения (6) дает исходную оценку искомого уровня номинального напряжения $\sigma_0^C = 23.0$ МПа. Вновь, как и в предыдущем случае, вводится некоторый запас в сторону уменьшения плотности полос. Таким образом, при проведении экспериментов используется величина номинального напряжения $\sigma^C = 21.7$ МПа. Полная последовательность

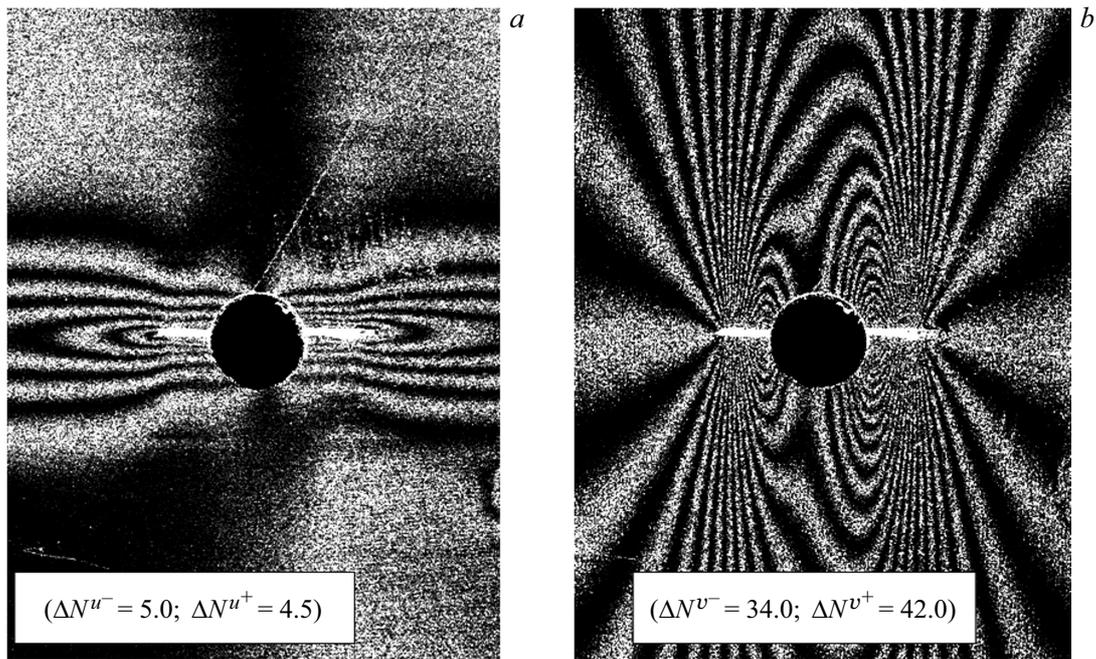


Рис. 6. Образец S_22. Картины интерференционных полос, полученные в терминах плоской компоненты u (а) и v (b). Исходная длина надреза $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2.63$ mm (левый надрез) и $\Delta a_1^+ = 2.77$ mm (правый надрез). Средняя длина надреза $\bar{a}_1 = 2.70$ mm.

реализованной процедуры представлена в табл. 2. Все надрезы наносились последовательно без текущего контроля длины надреза. Это необходимо для сокращения времени пребывания образца под нагрузкой. Поэтому, хотя заданная средняя длина надреза $\bar{a}_{1-2} = 2.7$ mm была достигнута уже на втором этапе, представлены результаты для всех четырех приращений длины надреза.

Картины интерференционных полос, полученные в результате нанесения второго надреза, показаны на рис. 6. Правая и левая ветви надреза имеют практически равную длину. Средняя длина надреза составляет $\bar{a}_1 = 2.70$ mm, что соответствует достижению поставленной цели. Эти интерферограммы характеризуются хорошим качеством. Следует, однако, отметить, что плотность полос на рис. 6, b несколько избыточна и достигает практически предельной степени разрешения. Таким образом, вновь подтверждается справедливость выбора величины номинального напряжения σ^C с запасом, направленным на снижения плотности полос согласно оценкам (6) и (7). Это означает, что первый же образец обеспечил достижение требуемого результата.

4. Обсуждение результатов

Получение картин интерференционных полос для заранее заданной длины надреза имеет решающее значение с точки зрения количественного анализа накопления повреждений в нерегулярных зонах образцов, изготовленных из композиционных материалов. Ранее такой метод был разработан и успешно применен для

металлических материалов [15,16]. Сущность предложенного подхода заключается в использовании серии одинаковых образцов, каждый из которых нагружается до заранее заданного количества циклов. Подобный способ обеспечивает получение набора объектов исследования (плоских образцов с центральным отверстием) с различным уровнем накопления повреждений. Далее для каждого из образцов необходимо определить величины индикаторов повреждаемости способом, который описан выше в настоящей работе. Эволюция каждого из этих параметров по периоду долговечности является необходимым звеном для получения явного вида функции накопления повреждений. Поэтому важным вопросом является оценка погрешностей в определении величин индикаторов повреждаемости, связанных с влиянием длины искусственного надреза. При этом необходимо отметить, что получить надрез заданной длины на первом этапе практически невозможно. Минимально необходимое количество образцов составляет семь единиц.

Очень удачным обстоятельством является то, что проведенные эксперименты относятся к двум предельным случаям. Образец S_11 выявляет наиболее пессимистичную ситуацию, а именно тот случай, когда желаемая длина надреза достигается только на четвертом этапе. Относительные погрешности определения индикаторов повреждаемости можно оценить следующим способом:

$$\begin{aligned} (\bar{u}_1^{1-4} - \bar{u}_1^{1-1})/\bar{u}_1^{1-4} &= (3.89 - 2.95)/3.89 = 0.24; \\ (\bar{v}_0^{1-4} - \bar{v}_0^{1-1})/\bar{v}_0^{1-4} &= (12.83 - 11.59)/12.83 = 0.097. \end{aligned} \quad (8)$$

Погрешности определения параметров \tilde{u}_1 и $\Delta\tilde{v}_0$ составляют 24 и 9.7% соответственно. Наличие погрешностей такого уровня, даже для нескольких из полного набора исследуемых образцов, делает практически невозможным надежное количественное описание процесса накопления повреждений.

Образец S_22 соответствует наиболее оптимистичной ситуации, когда желаемая длина надреза достигается на втором этапе. Относительные погрешности определения индикаторов повреждаемости имеют следующий вид:

$$(\tilde{u}_1^{1-2} - \tilde{u}_1^{1-1})/\tilde{u}_1^{1-2} = (1.80 - 1.62)/1.80 = 0.10;$$

$$(\tilde{v}_0^{1-2} - \tilde{v}_0^{1-1})/\tilde{v}_0^{1-2} = (14.44 - 13.49)/14.44 = 0.066. \quad (9)$$

Погрешности определения параметров \tilde{u}_1 и $\Delta\tilde{v}_0$ составляют 10 и 6.6% соответственно. Наличие погрешностей такого уровня для каждого из исследуемых образцов может привести к значительной суммарной погрешности в определении функции накопления повреждений. Таким образом, обеспечение постоянной заданной длины надреза на каждом этапе определения текущих индикаторов повреждаемости является существенным фактором при исследовании процесса накопления повреждений на основе разрушающего метода.

Важным обстоятельством является также то, что для получения функции накопления повреждений достаточно использовать только непосредственно измеряемые параметры, а именно тангенциальные компоненты перемещений. Данный факт избавляет от привлечения сложной процедуры определения параметров механики разрушения таких, как КИН и Т-напряжения, а также учитывать радиус вершины трещины. Кроме того, отпадает необходимость учета пластических деформаций в вершине надреза при определении величин КИН.

Важным моментом является то, что оценки (8) и (9) выявляет очень высокую чувствительность используемого подхода к изменению длины искусственного надреза. Это означает, что полученные картины полос дают возможность построить распределения двух тангенциальных компонент перемещений непосредственно на берегах искусственного надреза с высокой степенью точности. Данный факт открывает уникальную возможность верификации различных экспериментальных подходов к определению параметров механики разрушения для трещин, распространяющихся в элементах конструкций, изготовленных из композиционных материалов [24–27]. Эти подходы используют различные версии метода корреляции цифровых изображений, которые характеризуются более низкой чувствительностью и пространственным разрешением по сравнению с методом спекл-интерферометрии.

Экспериментальная информация, количественным образом описывающая поля перемещений в окрестности трещины в композиционном материале, представляет значительный интерес с точки зрения разработки и

верификации численных методов, предназначенных для определения коэффициентов интенсивности напряжений в ортотропных материалах. Большое количество разработанных подходов основано на различных методах, первый этап которых включает вычисление перемещений точек, расположенных в ближайшей окрестности вершины трещины [28–31]. Кроме того, различные силовые и энергетические критерии широко используются в рамках численного моделирования для предсказания прочности ортотропных пластин конечной ширины со сквозным отверстием [32–36]. Эволюция полей перемещений, вызванная пошаговым увеличением длины надреза, распространяющегося от контура отверстия, является необходимым звеном для обоснования выбора подобных критериев. Кроме того, интерпретация картин интерференционных полос дает распределения двух тангенциальных компонент перемещений вдоль берегов надреза, моделирующего трещину. Такая информация обеспечивает экспериментальное определение величин КИН. Это, в свою очередь, дает возможность верификации расчетных методов определения КИН для трещин в ортотропных композиционных материалах.

Заключение

Разработан новый экспериментальный метод, обеспечивающий визуализацию картин интерференционных полос, вызванных нанесением искусственного надреза заданной длины в композиционном материале. Разрез наносится от контура центрального сквозного отверстия в прямоугольном образце при его растяжении. Интерпретация интерферограмм, полученных для образцов с однонаправленной и продольно-поперечной укладкой, в терминах тангенциальных компонент перемещений дает возможность определять величины двух деформационных параметров. Эти параметры представляют собой текущие индикаторы повреждаемости, которые необходимы для количественного описания процесса накопления повреждений при циклическом нагружении образцов с концентраторами напряжений. Важнейшим фактом является то, что оба индикатора повреждаемости определяются путем прямых физических измерений на основе подсчета количества интерференционных полос. Представлен анализ погрешностей определения индикаторов повреждаемости, которые связаны с некорректным заданием длины искусственного надреза. Два индикатора повреждаемости, которые определяются при нанесении одного надреза, обеспечивают получение двух функций накопления повреждений. Сравнение этих функций является важным фактором для оценки достоверности конечного результата.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ю.Н. Работнов. *Механика деформируемого твердого тела* (Наука, Главная редакция Физматлит, М., 1979)
- [2] Н.А. Махутов. *Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность* (Машиностроение, М., 1981)
- [3] В.В. Москвитин. *Циклическое нагружение элементов конструкций* (Наука. Главная редакция Физматлит, М., 1981)
- [4] А.А. Мовчан. Известия АН СССР. Механика твердого тела, **3**, 115 (1990).
- [5] S. Murakami. *Continuum Damage Mechanics* (Springer Dordrecht Heidelberg London NY., 2012), DOI: 10.1007/978-94-007-2666-6
- [6] Л.В. Степанова. Вестник ПНИПУ. Механика, **3**, 71 (2008). DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.08
- [7] Н.А. Махутов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, **66** (8), 46 (2000).
- [8] S. Elias Ferreira, J. Tupiassú Pinho de Castro, M. Antonio Meggiolaro. Intern. J. Fatigue, **103**, 557 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.039>
- [9] S. Elias Ferreira, J. Tupiassú Pinho de Castro, M. Intern. J. Fatigue, **115**, 89 (2018). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.001
- [10] Н.А. Махутов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, **85** (9), 61 (2019).
- [11] A. Haghshenas, M.M. Khonsari. Intern. J. Fatigue, **107**, 130 (2017). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.10.009
- [12] Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky. Engineering Failure Analysis, **106**, Article 104175 (2019). DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104175
- [13] С.И. Елеонский, Ю.Г. Матвиенко, В.С. Писарев, А.В. Чернов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, **86** (10), 46 (2020).
- [14] Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky. Intern. J. Fatigue, **149**, 106310 (2021). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106310
- [15] Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky. Intern. J. Fatigue, **155**, 106590 (2022). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106590
- [16] V.S. Pisarev, Yu.G. Matvienko, S.I. Eleonsky, I.N. Odintsev. Engineering Fracture Mechanics, **179**, 348 (2017). DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.029
- [17] V.S. Pisarev, I.N. Odintsev, S.I. Eleonsky, A.A. Apalkov. Opt. Laser. Engineer., **110**, 437 (2018). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.022
- [18] В.И. Гришин, А.С. Дзюба, Ю.И. Дударьков. *Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов* (Изд-во Физматлит, М., 2013)
- [19] В.И. Голован, В.И. Гришин, А.С. Дзюба, Г.Н. Замула, М.В. Лимонин, Ю.И. Дударьков, В.С. Писарев, К.А. Балуннов. *Проектирование, расчеты и статические испытания металлокомпозитных конструкций* (Техносфера, М., 2022)
- [20] S.G. Lekhnitsky. *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body* (Holden-day, Translation of 1950 Russian edition, 1963)
- [21] S.I. Eleonsky, V.S. Pisarev, D.M. Zajtsev, M.Ch. Zinchenkov, M.R. Abdullin. Frattura ed Integritá Strutturale, **56**, 171 (2021). DOI: 10.3221/IGF-ESIS.56.14
- [22] R. Jones, C. Wykes. *Holographic and Speckle Interferometry* (Cambridge: Cambridge Univer. Press, 1989)
- [23] P. Rastogi. *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques* (West Sussex: John Wiley, 2001)
- [24] J.J. Dai, X. Dong Liang, X. Feng Yao, H.Y. Yeh. J. Reinforced Plastics and Composites, **24** (16), 1737 (2005).
- [25] S.H. Ju, S.H. Liu. Composite Structures, **81**, 614 (2007).
- [26] S.H. Ju, S.H. Liu, K.W. Liu. Intern. J. Solids and Structures, **43**, 1009 (2006).
- [27] P. Gajanan Mogadpalli, V. Parameswaran. Strain, **44** (6), 446 (2008). DOI: 10.1111/j.1475-1305.2007.00391.x
- [28] W.T. Chow, S.N. Atluri. Computational Mechanics, **21**, 1 (1998).
- [29] E. Viola, F. Tornabene, N. Fantuzzi. Composite Structures, **106**, 815 (2013).
- [30] L. Banks-Sills, I. Hershkovitz, P.A. Wawrzynek, R. Eliahi, A.R. Ingrassia. Engineer. Fracture Mechanics, **72**, 2328 (2005). DOI: 10.1016/j.engfracmech.2004.12.007
- [31] N. Fantuzzi, R. Dimitri, F. Tornabene. Composite Structures **145**, 162 (2016). DOI: dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.076
- [32] J. Hebel, W. Becker. Mechanics of Advanced Materials and Structures, **15** (6–7), 410 (2008).
- [33] J. Hebel, R. Dieringer, W. Becker. Engineer. Fracture Mechanics, **77** (18), 3558 (2010).
- [34] E. Martin, D. Leguillon, N. Carrere. Intern. J. Solids and Structures, **49** (26), 3915 (2012).
- [35] J. Felger, N. Stein, W. Becker. Intern. J. Solids and Structures, **122–123**, 14 (2017). DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.05.039
- [36] J. Felger, N. Stein, W. Becker. Engineer. Fracture Mechanics, **182**, 621 (2017). DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.05