Елеонский, С.И. Остаточные напряжения в зоне повреждения пластины из композиционного материала при статическом и динамическом воздействии стального индентора / С.И. Елеонский, В.С. Писарев, А.В. Чернов. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.03 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 1. – С. 34–44.

Perm Polytech Style: Eleonsky S.I., Pisarev V.S., Chernov A.V. Residual Stresses in a Damaged Area of a Composite Plate under Static and Dynamic Influences of a Steel Indenter. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 1, pp. 34-44. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.03

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.03
УДК 539.4

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗОНЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СТАЛЬНОГО ИНДЕНТОРА

С.И. Елеонский, В.С. Писарев, А.В. Чернов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 05 сентября 2024 г.
Одобрена: 18 марта 2025 г.
Принята к публикации: 28 марта 2025 г.

Ключевые слова:

композиционные материалы, контактное взаимодействие, остаточные напряжения, зондирующее отверстие, спекл-интерферометрия.

АННОТАЦИЯ

Разработан и реализован новый подход, обеспечивающий определение главных компонент остаточных напряжений, которые возникают в результате как статического, так и ударного контактного взаимодействия сферического индентора и плоской поверхности пластины, изготовленной из полимерного композиционного материала с продольно-поперечной укладкой. Экспериментальная методика включает в себя сверление зондирующего отверстия и последующее измерение приращений диаметров этого отверстия в направлении главных остаточных деформаций методом спекл-интерферометрии. Картины интерференционных полос высокого качества, необходимые для реализации этой процедуры, визуализированы как внутри контактной вмятины, так и в ближайшей внешней окрестности контура углубления, которое расположено на длинной оси симметрии прямоугольных образцов. Данные интерференционных измерений тангенциальных компонент перемещений используются для определения главных компонент остаточных напряжений на основе единственного решения корректно сформулированной обратной задачи. Это обстоятельство обеспечивает минимально возможную погрешность конечного результата.

Ключевым моментом разработанного подхода является то, что остаточные напряжения определяются количественным образом по результатам прямых физических измерений приращения диаметров зондирующих отверстий, выполненных в различных зонах контактного взаимодействии. На этой основе установлено наличие значительных по величине главных компонент остаточных напряжений, которые возникают в зоне контактного взаимодействия стального индентора и поверхности композиционной пластины. Выявлено, что распределения главных компонент остаточных напряжений вдоль контура контактной вмятины по отношению к ее центру имеет радиально-симметричный характер. При этом тангенциальные компоненты являются растягивающими напряжениями, а радиальные напряжения являются сжимающими в обоих случаях. Наибольшие сжимающие компоненты в обоих случаях возникают в центре контактной вмятины. Представлено сравнение величин главных компонент остаточных напряжений, возникающих при статическом вдавливании сферического индентора и ударном воздействии, которые характеризуются практически одинаковым диаметром контактной вмятины. Полученные данные свидетельствуют, что остаточные напряжения можно использовать в качестве репрезентативного параметра, который способен установить корреляцию между снижением прочности композитной пластины вследствие ударного воздействия и количественными характеристиками поля остаточных напряжений в окрестности контактного углубления.

© **Елеонский Святослав Игоревич** – к. т. н., с. н. с., e-mail: juzzepka@mail.ru.
Писарев Владимир Сергеевич – к. т. н., доц., в. н. с., e-mail: VSP5335@mail.ru.
Чернов Андрей Владимирович – к. т. н., доц., начальник сектора, e-mail: andcherr@rambler.ru.

Svyatoslav I. Eleonsky – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: juzzepka@mail.ru.
Vladimir S. Pisarev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, leading Researcher, e-mail: VSP5335@mail.ru.
Andrey V. Chernov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Sector, e-mail: andcherr@rambler.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

RESIDUAL STRESSES IN A DAMAGED AREA OF A COMPOSITE PLATE UNDER STATIC AND DYNAMIC INFLUENCES OF A STEEL INDENTER

S.I. Eleonsky, V.S. Pisarev, A.V. Chernov

Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 September 2024
Approved: 18 March 2025
Accepted for publication:
28 March 2025

Keywords:

composite materials, contact interaction, residual stresses, probe hole, speckle-pattern interferometry.

ABSTRACT

A novel approach is developed and implemented, which enables determining principal residual stress components arising as a result of both static and impact contact interactions of a spherical indenter and a plane surface of a cross-ply composite plate. The experimental technique employs the probe hole drilling and further measurements of the hole diameter increments in principal strain directions by the speckle-pattern interferometry. Interference fringe patterns of high quality, which are essential for a successful realization of the created procedure, are visualized both inside and outside the contact dimple, which is located on the long symmetry axis of the rectangular samples. In-plane displacement component values, derived from optical interferometric measurements, serve for the residual stress determination proceeding from an unequivocally solution of the correctly-posed inverse problem. This fact provides a minimal possible uncertainty in the final results. The key point of the developed approach is that the residual stresses are quantified based on the direct physical measurements of the increment of the diameters of the probing holes made in different zones of the contact interaction. On this basis, the presence of the significant principal components of residual stresses that occur in the contact zone of the steel indenter and the surface of the composite plate has been established. It is revealed that the distribution of the main components of residual stresses along the contour of the contact indentation in relation to its center has a radially symmetrical character. In this case, the tangential components are tensile stresses, and the radial stresses are compressive in both cases. In both cases, the largest compressive components occur in the center of the contact dent. We compare the values of the main components of the residual stresses arising from the static indentation of a spherical indenter and impact, which are characterized by an almost identical diameter of the contact indentation. The obtained data clearly evidence that the principal stress component values reveal the representative parameter, which can reliably connect the composite plate strength decrease, caused the impact influence, and quantitative characteristics of the residual stress field near the contact dimple.

Введение

Слоистые композиционные материалы широко применяются в авиастроении [1–2]. Одним из очевидных недостатков конструкций из композиционных материалов является высокая чувствительность к контактным, особенно ударным повреждениям. Даже весьма незначительное ударное воздействие, результат которого внешне малозаметен, может привести к существенному снижению как статической прочности, так и усталостной долговечности поврежденного элемента конструкции [3]. Таким образом, количественная оценка влияния ударных повреждений композиционных материалов на остаточную прочность является необходимой составляющей при обосновании эксплуатационной надежности композитных конструкций [4–6]. Пути преодоления данной проблемы в настоящее время до конца не ясны. Дело в том, что отсутствуют надежные методы аналитического или численного определения напряженно-деформированного состояния композиционного материала в окрестности контактного повреждения, вызванного динамическим воздействием. Таким образом, возникает необходимость привлечения экспериментальных методов механики деформируемого тела и получение с их помощью значительного объема данных. Однако такие методы, которые основаны на физических измерениях деформационных параметров, в настоящее время практически не применяются. Оценка влияния ударного воздействия на снижение прочности композиционных конструкций проводится после осуществления значительного объема дорогостоящих испытаний образцов или реальных конструктивных элементов [1–2].

Повреждения наносятся с помощью различных ударных копров со свободно падающим грузом, согласно стандартизованной процедуре [7–9]. При этом в ряде случаев регистрируются зависимости силы от времени при различных потенциальных энергиях ударного воздействия, а также фиксируется степень поглощения энергии удара. Первая проблема, которую необходимо преодолеть, связана с тем, что ударные повреждения по своей форме и размерам для многослойных материалов с различной укладкой имеют существенные различия при одинаковой энергии удара. Таким образом, после нанесения ударного повреждения необходимо проводить измерения глубины и линейных размеров отпечатка, а также оценивать зависимость этих параметров от энергии удара.

Вторая проблема связана с тем, что видимые повреждения на поверхности образцов и данные ультра-

звукового сканирования не дают полного представления о разрушении внутри материала. Наиболее эффективный послойный анализ повреждений проводится на основе сложных и дорогостоящих систем микротомографии.

Остаточная прочность поврежденных образцов определяется при испытаниях как на растяжение, так и на сжатие. В последнем случае результаты имеют вид зависимостей, которые отражают снижение несущей способности пластин при сжатии от энергии удара и от площади повреждения. Особенности и многочисленные нюансы используемых подходов представлены в большом количестве работ [10–19]. В наиболее продвинутых вариантах приводятся данные о текущих деформациях и напряжениях, возникающих при динамическом внедрении индентора, полученных на основе различных неразрушающих методов [20–27].

Для численного моделирования влияния повреждений на прочность композитных конструкций в настоящее время применяется несколько подходов. Один из них основан на численном анализе динамической задачи методом конечных элементов [28]. Второй способ заключается в том, что поврежденность и дефектность структуры сводится к созданию эквивалентного концентратора напряжений в образце в виде сквозного отверстия [29–33]. Алгоритм задания размеров эквивалентного отверстия представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку для слоистых композитов внутренние расслоения и нарушения структуры значительно превышают визуально обнаруженные размеры вмятин.

Представленный выше обзорный материал, который можно значительно расширить, показывает, что используемые подходы в основном обеспечивают определение качественных характеристик повреждений в окрестности зоны ударного взаимодействия. Полученную информацию очень трудно использовать напрямую для анализа и предсказания остаточной прочности. Только в работе [24] отмечается, что величины остаточных напряжений, возникающие в окрестности контактной вмятины, являются наиболее перспективным параметром для количественной оценки влияния ударных повреждений на эксплуатационную надежность композитных конструкций. При этом отмечается, что применимость такого критерия не зависит от укладки волокон композиционного материала.

Целью данной работы является получение новых данных о величинах главных компонент остаточных напряжений, вызванных контактным взаимодействием стальной сферы и поверхностью пластины, которая изготовлена из композиционного материала. Контактная вмятина образуется как путем статического вдавливания стального сферического индентора диаметром 16 мм, так и при ударном воздействии свободно падающего бойка, диаметр действующей полусферы которого равен 20 мм. Приоритетной задачей является отработка методики эксперимента и получение количественных характеристик полей остаточных напряжений в зоне контактного взаимодействия, которые в настоящее время в научных публикациях отсутствуют. Определение остаточных напряжений проводится на основе оригинального подхода, который базируется на сверлении сквозного зондирующего отверстия и последующем измерении диаметров этого отверстия в направлении главных осей анизотропии методом спекл-интерферометрии [34–35].

1. Объекты исследования

Объектам исследования являются шесть прямоугольных образцов размерами 180×30×4,8 мм, которые вырезаны из одного листа углепластикового композиционного материала (carbon fibre reinforced polymers (CFRP)) с размерами в плане 320×320 мм и продольно-поперечной укладкой $[0/90]_{6S}$. Контактные вмятины расположены на вертикальной оси симметрии образцов на расстоянии 60 мм от ближайшего торца. Статическое контактное взаимодействие осуществляется путем вдавливания закаленного стального шарика диаметром 16 мм о плоскую поверхность образцов с размерами 180×30 мм. Ударное воздействие осуществляется на копре Instron Dynatup 9250HV стандартным способом бойком массой 15 кг и диаметром внешней полусферы 20 мм, согласно установленным процедурам [7–9]. Контактные вмятины обоих типов расположены по вертикальной (длинной) оси симметрии образцов на расстоянии 65 мм от короткого торца. Номенклатура образцов, усилие вдавливания/энергия удара и диаметр контактных вмятин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номенклатура образцов и параметры контактного взаимодействия

Table 1

Specimens and contact interaction parameters

Номер образца	Усилие вдавливания P_i, кН (i = 1, 2, 3)	Энергия удара En_i, Дж (i = 4, 5, 6)	Диаметр контактной вмятины $2R_0^i$, мм (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)
SC_1	3,0		6,1
SC_2	3,0		6,0
SC_3	3,0		5,9
DC_1		35	6,1
DC_2		35	6,3
DC_3		45	6,7

В процессе статического вдавливания стальной сферы в купоны SC_1, SC_2 и SC_3 до достижения заданных значений усилия $P_1 = P_2 = P_3 = 3{,}0$ кН появился характерный треск, который свидетельствовал о заметном разрушении волокон поверхностного слоя композиционного материала в зоне контакта. При этом диаметры образовавшихся вмятин совпадают в пределах погрешности измерений. Практически совпадают и диаметры вмятин в образцах, полученные при статическом вдавливании и в результате удара с энергией En_3 En_4 = En_5 = = 35 Дж. Взаимное расположение границы контактной вмятины и зондирующих отверстий

для всех образцов показано на рис. 1. Используемая система координат приведена на рис. 1, *a* (ось y направлена вдоль вертикальной оси симметрии образцов). Сквозные отверстия диаметром $2r_0 = 2{,}0$ мм, необходимые для определения остаточных напряжений, выполнялись твердосплавным сверлом в непосредственной близости от контуров контактных вмятин. Поэтому с целью уменьшить взаимовлияние зондирующих отверстий в купонах SC_1 и SC_2 использовались по две точки измерений. В остальных образцах было выполнено по одному зондирующему отверстию. Нумерация точек соответствует последовательности сверления. Угловая скорость вращения режущего инструмента не превышала 60 оборотов в мин. Такая процедура надежно гарантирует отсутствие дополнительных остаточных напряжений, вызванных процессом сверления, в полимерном композиционном материале, армированным углеродными волокнами.

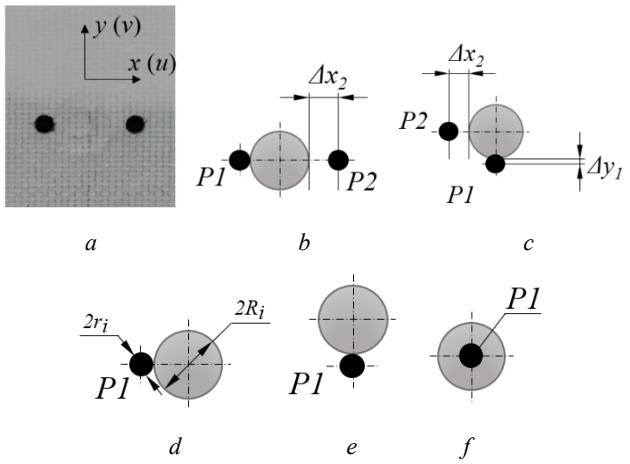


Рис. 1. Схема взаимного расположения границы контактной вмятины и зондирующих отверстий: *a* – SC_1, реальное изображение; *b* – SC_1, чертеж; *c* – SC_2; *d* – DC_1; *e* – DC_2; *f* – SC_3, DC_3

Fig. 1. Scheme of the mutual location of the contact dimple contour and probe holes: *a* – SC_1, real image; *b* – SC_1, draft; *c* – SC_2; *d* – DC_1; *e* – DC_2; *f* – SC_3, DC_3

2. Исходная экспериментальная информация

2.1 Вмятина от статического воздействия

Исходная экспериментальная информация имеет вид картин интерференционных полос, которые возникают при сверлении зондирующего отверстия в поле остаточных напряжений. Эти интерферограммы описывают распределения тангенциальных компонент перемещений u (поперек образца) и v (вдоль образца) в направлении координатных осей x и y соответственно. Подробное описание экспериментального подхода приведено в работах [31; 34]. Картины интерференционных полос, полученные в результате сверления отверстий в точке 1 образца SC_1, приведены на рис. 2.

Экспериментальное определение остаточных напряжений в композитных образцах, которое проводится на основе сверления зондирующего отверстия и последующего измерения деформационного отклика методом спекл-интерферометрии, всегда связано с решением серьезной технической проблемы. Дело в том, что для проведения оптико-интерференционных измерений исходная (черная) поверхность образцов должна быть покрыта тонким слоем белой матовой эмали. Естественно, данный факт оказывает негативное влияние на качество интерференционных полос, полученных при локальном удалении материала даже на неповрежденных поверхностях композитных пластин. Не станет ли ситуация критической в окрестности зоны контактного взаимодействия? Для ответа на этот вопрос поверхность купона SC_1 была покрыта минимально возможным по толщине слоем краски, сквозь который проступает структура поверхности. Тем не менее картины полос на рис. 2 демонстрируют достаточно высокое качество и пригодны для надежной количественной обработки.

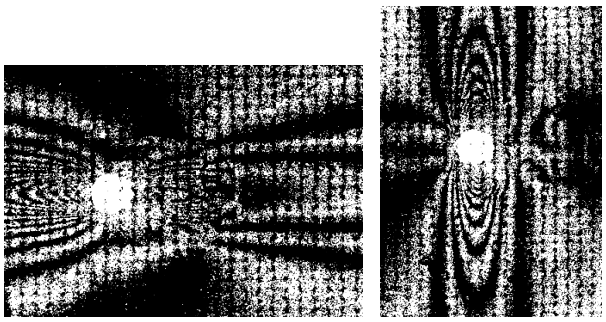
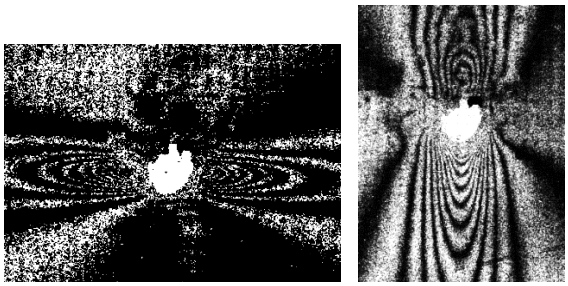


Рис. 2. Картины интерференционных полос, полученные при сверлении отверстия в точке 1 образца SC_1 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (*a* – $\Delta N^u = -29{,}0$) и v (*b* – $\Delta N^v = +24{,}0$)

Fig. 2. Interference fringe patterns generated by the probe hole drilling in point 1 of specimen SC_1 in term of the in-plane displacement component u (a – $\Delta N^u = -29.0$) and v (*b* – $\Delta N^v = +24.0$)

Подготовка поверхности образца SC_2 и всех остальных купонов проводилась путем нанесения более толстого слоя белой матовой краски. Картины интерференционных полос, полученные в результате сверления отверстий в точке 1 и точке 2 образца SC_2, приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

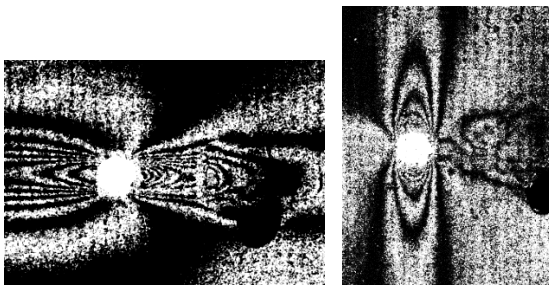
Интерферограммы, полученные для точек 1 и 2 в образце SC_2, характеризуются достаточно высоким качеством, которое обеспечивает разрешение интерференционных полос высокой плотности на контуре отверстия. Контур зондирующего отверстия в точке 1 и контур контактной вмятины практически совпадают в вертикальном сечении образца SC_2. Расстояние между контурами зондирующего отверстия контактной вмятины для точки 2 в горизонтальном направлении составляет 4,2 мм. Наличие даже такого небольшого зазора приводит к заметному уменьшению плотности интерференционных полос, обеспечивая тем самым их практически идеальное разрешение на контуре отверстия.



a *b*

Рис. 3. Картины интерференционных полос, полученные при сверлении отверстия в точке 1 образца SC_2 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (a – ΔN^u = +24,0) и v (b – ΔN^v = –20,0)

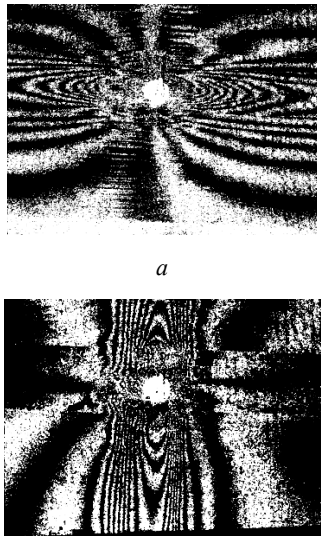
Fig. 3. Interference fringe patterns generated by probe hole drilling in point 1 of specimen SC_2 in term of the in-plane displacement component u (a – ΔN^u = +24.0) and v (b – ΔN^v = –20.0)



a *b*

Рис. 4. Картины интерференционных полос, полученные в точке 2 образца SC_2 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (a – ΔN^u = −17,5) и v (b – ΔN^v = –20,0)

Fig. 4. Interference fringe patterns generated by the probe hole drilling in point 2 of specimen SC_2 in term of the in-plane displacement component u (a – ΔN^u = −17.5) and v (b – ΔN^v = –20.0)



a

b

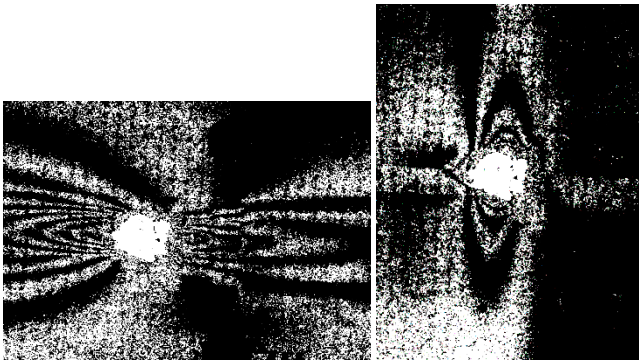
Рис. 5. Картины интерференционных полос, полученные в точке 1 образца SC_3 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (a – $\Delta N^u \geq$ –30,0) и v (b – $\Delta N^v \geq$ –30,0)

Fig. 5. Interference fringe patterns generated by the probe hole drilling in point 1 of specimen SC_3 in terms of the in-plane displacement component u (a – $\Delta N^u \geq$ –30.0) and v (b – $\Delta N^v \geq$ –30.0)

Интерферограммы, характеризующие деформационный отклик на сверление сквозного отверстия в центре вмятины в образце SC_3, приведены на рис. 5. Полученные картины полос характеризуются избыточной плотностью, но с этим обстоятельством ничего поделать нельзя. Тем менее можно надежно определить пороговые значения разностей абсолютных порядков полос в обоих направлениях, а именно $\Delta N^u \geq$ –30,0 и $\Delta N^v \geq$ –30,0, что обеспечивает нижнюю границу оценки величин главных компонент остаточных напряжений.

2.2. Вмятина от ударного повреждения

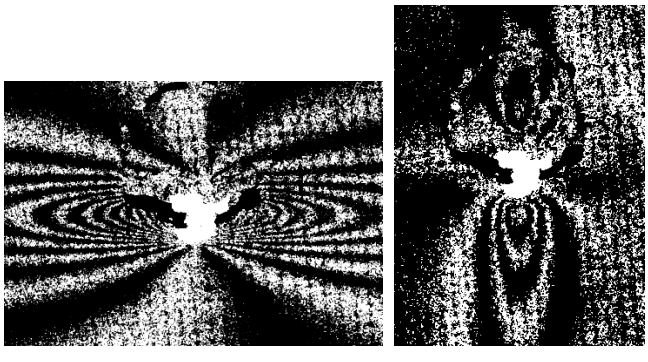
Картины интерференционных полос, источником которых является деформационный отклик на сверление сквозного отверстия в окрестности контактной вмятины, приведены на рис. 6–8 для образцов DC_1, DC_2 и DC_3 соответственно.



a *b*

Рис. 6. Картины интерференционных полос, полученные в точке 1 образца DC_1 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (a – ΔN^u = –14,5) и v (b – ΔN^v = +11,5)

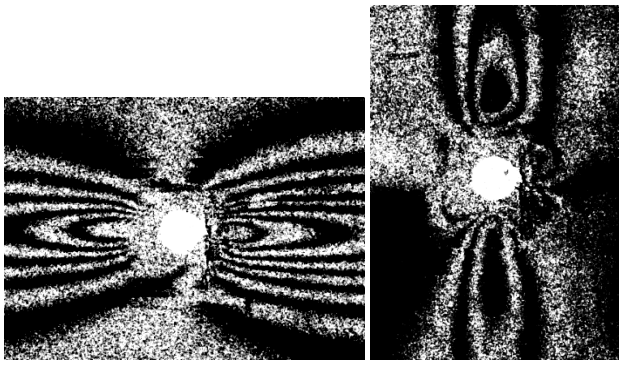
Fig. 6. Interference fringe patterns generated by the probe hole drilling in point 1 of specimen DC_1 in terms of the in-plane displacement component u (a – ΔN^u = –14.5) and v (b – ΔN^v = +11.5)



a *b*

Рис. 7. Картины интерференционных полос, полученные в точке 1 образца DC_2 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (a – ΔN^u = +24,5) и v (b – ΔN^v = –14,5)

Fig. 7. Interference fringe patterns generated by the probe hole drilling in point 1 of specimen DC_2 in terms of the in-plane displacement component u (a – ΔN^u = +24.5) and v (b – ΔN^v = –14.5)



a *b*

Рис. 8. Картины интерференционных полос, полученные в точке 1 образца DC_3 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (a – $\Delta N^u = -14{,}0$) и v (b – $\Delta N^v = 0$)

Fig. 8. Interference fringe patterns generated by the probe hole drilling in point 1 of specimen DC_3 in terms of the in-plane displacement component u (a – $\Delta N^u = -14.0$) and v (b – $\Delta N^v = 0$)

Важнейшим фактом, который выявляется при сравнении изображений на рис. 2–5 и интерферограмм на рис. 6–8, является то, что в обоих случаях получены картины интерференционных полос высокого качества, пригодные для надежной количественной обработки. Данный факт являлся весьма неочевидным до проведения представленных исследований, так как ясно, что степень поврежденности поверхности при ударном повреждении композиционного материала выше, чем в случае статического вдавливания индентора.

3. Определение величин главных компонент остаточных напряжений

Конфигурация картин интерференционных полос на рис. 2–8 наглядно свидетельствует, что направления координатных осей x и y совпадают с направлениями главных остаточных напряжений σ_1 и σ_2 соответственно. Это означает, что количественные характеристики главных компонент остаточных напряжений в срединной плоскости тонких композиционных пластин на основе сверления сквозного отверстия могут быть получены следующим образом [34–35]:

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{2r_0 k}\left\{\frac{n\Delta u + \left(1-\frac{\nu_{12}}{k}\right)\Delta v}{\frac{n^2}{k}-\left(k-\nu_{12}\right)\left(\frac{1}{k}-\nu_{21}\right)}\right\},\quad \sigma_2 = \frac{E_1}{2r_0 k}\left\{\frac{n\Delta v + k^2\left(\frac{1}{k}-\nu_{21}\right)\Delta u}{\frac{n^2}{k}-\left(k-\nu_{12}\right)\left(\frac{1}{k}-\nu_{21}\right)}\right\}, \quad (1)$$

где r_0 – радиус отверстия; E_1 – продольный модуль упругости материала; E_2 – поперечный модуль упругости материала; ν_{12} и ν_{21} – коэффициенты Пуассона материала; Δu и Δv – приращения диаметра зондирующего отверстия в направлении главных напряжений σ_1 и σ_2 соответственно; $k = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$, $n = \sqrt{2(k+1)}$. Значения главных компонент остаточных напряжений σ_1 и σ_2 (1) представляют собой единственное решение корректно сформулированной обратной задачи, что обеспечивает минимально возможную погрешность их определения, как это показано в работах [36–37].

Аналитические формулы (1) получены на основании соотношений, представленных в классической книге С.Г. Лехницкого [38]. Эти соотношения, которые описывают концентрацию напряжений при растяжении ортотропной пластины с круговым отверстием в направлениях главных осей анизотропии, справедливы, если расстояние от контура отверстия до внешней границы прямоугольной пластины превышает пять диаметров отверстия. Это условие выполнятся для всех рассмотренных в работе случаев.

Все образцы изготовлены из продольно-поперечного слоистого углепластика с укладкой $[0/90]_{6S}$. Толщина образца составляет t = 4,78 мм. Механические свойства ортотропного материала равны: E_1 = 73100 МПа; E_2 = = 73100 МПа; G_{12} = 5300 МПа; $\nu_{12} = \nu_{21} = 0.25$; $k = 1$; $n = 2$. Обобщенные механические свойства композиционного материала определялись на основе итерационного численного анализа форм колебаний прямоугольных пластин, вызванных точечным импульсным ударом. Детальное описание используемой методологии приведено в работе [35].

Величины приращений диаметра зондирующего отверстия в направлении главных напряжений Δu и Δv, которые необходимы для вычисления остаточных напряжений по формулам (1), определяются на основе следующих соотношений [36]:

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

где λ = 532 нм – длина волны лазерного излучения; $\Psi = \pi/4$ – угол между наклонным направлением освещения и нормальным к поверхности объекта направлением наблюдения; ΔN^u и ΔN^v представляют собой разности абсолютных порядков полос. Эти значения определяются как количество интерференционных полос, которое подсчитывается по одной картине полос между двумя базисными точками, соответствующими направлениям главных напряжений σ_1 – ΔN^u (горизонтальное направление) и σ_2 – ΔN^v (вертикальное направление). Каждая пара базисных точек расположена на пересечении соответствующего диаметра с контуром зондирующего отверстия. Иллюстрации практического применения данной процедуры приведены, например, в работах [36–37].

Исходные экспериментальные данные, которые получены после обработки картин интерференционных полос, представлены в табл. 2 и табл. 3 для статического и ударного взаимодействия соответственно. Эти же таблицы содержат соответствующие результаты определения главных компонент остаточных напряжений,

Таблица 2

Результаты интерпретации картин интерференционных полос и величины главных компонент остаточных напряжений в окрестности статической вмятины

Table 2

The results of the interference patterns interpretation and the values of the principal residual stress component near the static dimple

Образец/ Точка	Расстояние от контура вмятины до центра отверстия $\Delta x/\Delta y$, мм	ΔN^u, полос	ΔN^v, полос	Δu, мкм	Δv, мкм	σ_1, МПа	σ_2, МПа
SC_1/1	1,0 (Δx), см. рис. 1, *b*	–29,0	+24,0	–11,02	+9,12	**–162,0**	**+106,0**
SC_1/2	2,30 (Δx), см. рис. 1, *b*	–19,0	+14,0	–7,22	+5,32	**–111,0**	**+57,9**
SC_2 /1	0,63 (Δy_1), см. рис. 1, *c*	+24,0	–20,0	+9,12	–7,60	**+135,1**	**–88,3**
SC_2 /2	5,20 (Δx_2), см. рис. 1, *c*	–17,5	+13,0	–6,65	+4,94	**–106,3**	**+52,1**
SC_3/1	2,95 (центры вмятины и отверстия совпадают), см. рис. 1, *f*	–30,0	–30,0	–11,4	–11,4	**–336,6**	**–336,6**

Таблица 3

Результаты интерпретации картин интерференционных полос и величины главных компонент остаточных напряжений в окрестности ударной вмятины

Table 3

The results of the interference patterns interpretation and values of the principal residual stress component near the impact dimple

Образец	Расстояние от контура вмятины до центра отверстия $\Delta x/\Delta y$, мм	ΔN^u, полос	ΔN^v, полос	Δu, мкм	Δv, мкм	σ_1, МПа	σ_2, МПа
DC_1	1,0 (Δx), см. рис. 1, *d*	–14,5	+11,5	–5,51	+4,37	**–82,4**	**+49,0**
DC_2	1,0 (Δy), см. рис. 1, *e*	+24,5	–2,0	+9,31	–0,76	**+192,1**	**–58,1**
DC_3	3,35 (центры вмятины и отверстия совпадают), см. рис. 1, *f*	–14,0	0,0	–5,32	0,0	**–113,2**	**–40,0**

4. Анализ результатов

В первую очередь, необходимо отметить, что распределения главных компонент остаточных напряжений вдоль контура контактной вмятины по отношению к ее центру имеют характер, близкий к радиально-симметричной структуре. Некоторые отклонения от идеальной формы вызваны наличием исходных технологических остаточных напряжений в исследуемых образцах, а именно σ_1 = +12,2 МПа; σ_2 = + 47,4 МПа [35]. При этом тангенциальные компоненты, как и ожидалось, являются растягивающими напряжениями, как при статическом вдавливании (SC_1, точка 1 – σ_2 = = +106,0 МПа; SC_2; точка 2: σ_1 = +135,1 МПа), так и при ударном воздействии (DC_1, точка 1: σ_2 = +49,0 МПа; DC_2; точка 2: σ_1 = +192,1 МПа). Естественно, радиальные напряжения являются сжимающими в обоих случаях (SC_1, точка 1: σ_1 = –162,0 МПа; SC_2; точка 2: σ_2 = –111,0 МПа; DC_1; точка 1 – σ_1 = –82,4 МПа, DC_2; точка 2: σ_2 = –58,1 МПа).

Необходимо обратить внимание на высокий уровень растягивающих остаточных напряжений в окрестности контура контактной вмятины. Дело в том, что статическая прочность образцов без повреждений при испытаниях на растяжение характеризуется предельными напряжениями σ_B = 750 ↔ 800 МПа. Таким образом, величины σ_1 = +135,1 МПа (статический контакт) и σ_1 = +192,1 МПа (ударное воздействие) составляют 17 и 24 % от предельного значения соответственно. Минимальное значение сжимающей компоненты σ_1 = –162,0 МПа при статическом контакте в два раза меньше, чем аналогичная величина, полученная при ударном воздействии σ_1 = –82,4 МПа. При сопоставлении, однако, следует учитывать, что последнее значение соответствует достаточно низкой энергии удара E_{n4} E_{n3} = 35 Дж. При испытаниях на остаточную прочность композитных пластин толщиной более 4 мм, изготовленных из материала с максимальным модулем упругости $E_1 \geq$ 70 000 МПа, обычно используется энергия удара $En = 50 \div 70$ Дж.

Но даже на этом фоне выделяются симметричные величины сжимающих напряжений, полученные для центра вмятины в образце SC_3: σ_1 = σ_2 = –336,6 МПа. Ударное воздействие нарушает симметрию напряженного состояния в центре контактной вмятины, а именно σ_1 = –113,2 МПа, σ_2 = –40,0 МПа.

Более детальный анализ характера распределений компонент остаточных напряжений в окрестности контактных вмятин и их влияния на остаточную прочность поврежденных образцов требует дополнительной информации, а также статистической обработки. Все это будет предметом дальнейших исследований. Однако даже на начальном этапе можно утверждать, что наличие остаточных напряжений в окрестности контактной вмятины оказывает значительное влияние на снижение остаточной прочности образцов, изготовленных из слоистых композиционных материалов.

Набор величин остаточных напряжений, полученных для различных локаций, предоставляет широкую базу для выбора параметров, которые будут количественным образом связывать энергию ударного повреждения со снижением остаточной прочности поврежденных образцов. В настоящее время снижение остаточной прочности вследствие ударного повреждения

соотносится только с косвенными параметрами, такими как геометрические размеры отпечатка и процент поврежденных волокон, которые связаны с энергией удара, но не дают количественное описания напряженно-деформированного состояния в окрестности контактной вмятины. Ключевым моментом предлагаемого в данной работе подхода является то, что остаточные напряжения определяются количественным образом по результатам прямых физических измерений приращения диаметров зондирующих отверстий, выполненных в различных зонах контактного взаимодействия. Совершенно ясно, что величины остаточных напряжений, в отличие от косвенных параметров, представляют собой надежный репрезентативный индикатор, который можно использовать для установления корреляции между результатами испытаний на остаточную прочность и количественными характеристиками поля остаточных напряжений в окрестности контактного углубления.

Наличие подобной информации позволит существенно снизить количество образцов, используемых для обоснования остаточной прочности, и, что самое главное, разработать и верифицировать модели, необходимые для численного анализа исследуемого процесса. Таким образом, можно утверждать, что разработанный экспериментальный подход обеспечивает получение данных, которые впервые дают количественные характеристики механизма снижения прочности композиционных материалов при моделировании ударных повреждений. Кроме того, значения компонент остаточных напряжений можно получить на различных этапах циклического нагружения образцов и использовать в качестве текущих индикаторов повреждаемости. Эволюция этих индикаторов по периоду долговечности является необходимым звеном для количественного анализа процесса накопления усталостных повреждений в зоне ударного повреждения композиционного материала. Подтверждение этого факта будет представлено в ходе дальнейших исследований.

Заключение

Разработан и реализован новый подход, обеспечивающий определение главных компонент остаточных напряжений, которые возникают в результате как статического, так и динамического контактного взаимодействия стального сферического индентора и плоской поверхности композиционного материала. Новизна экспериментальной процедуры заключается в том, что картины интерференционных полос высокого качества, необходимые для извлечения исходной экспериментальной информации, впервые получены при сверлении зондирующего отверстия на участках поверхности композитных образцов, которые подвергались контактному взаимодействию. До начала исследований данный факт являлся совершенно неочевидным.

Экспериментальная методика включает сверление зондирующего отверстия и измерение приращений диаметров этого отверстия в направлении главных остаточных деформаций методом спекл-интерферометрии. Визуализирован набор картин интерференционных полос высокого качества, которые составляют основу для надежного извлечения исходной экспериментальной информации в виде приращений диаметра зондирующего отверстия, выполненного как внутри контактной вмятины, так и в окрестности контура отпечатка. Такая информация обеспечивает определение главных компонент остаточных напряжений на основе единственного решения корректно сформулированной обратной задачи, что обеспечивает минимально возможную погрешность конечного результата. Установлено наличие значительных по величине остаточных напряжений, которые возникают в зоне контактного взаимодействия стального индентора и поверхности композиционной пластины. Величины локальных остаточных напряжений дают возможность количественным образом установить различие в характере контактного взаимодействия стального индентора и композиционной пластины в случае статического и динамического нагружения. Полученные данные представляют значительный интерес в следующих направлениях:

– создание и верификация численных моделей, необходимых для анализа эксплуатационной надежности поврежденных конструкций;

– использование величин остаточных напряжений в качестве критериального параметра при стандартных сертификационных испытаниях для установления зависимости остаточной прочности поврежденных образцов с различной укладкой волокон от энергии удара;

– использование остаточных напряжений в качестве текущих индикаторов повреждаемости при испытаниях образцов с ударными повреждениями на усталостную прочность.

Библиографический список

1. Савин, С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолётов семейства МС-21 / С.П. Савин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4 (часть 2). – С. 686–693.

2. Проектирование, расчеты и статические испытания металлокомпозитных конструкций / В.И. Голован [и др.]. – М.: Техносфера, 2022. – 408 с.

3. Talreja, R. Damage and failure of composite materials / R. Talreja, C.V. Singh. – Cambridge University Press, 2012. – 304 p.

4. Небелов, Е.В. Механизм развития повреждений лопастей воздушного винта из композиционных материалов при воздействии поражающих элементов / Е.В. Небелов, М.В. Потоцкий, А.В. Родионов, А.Н. Горский // Вестник Московского авиационного института. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 26–31.

5. Полянский В.В., Нестеров В.А. Оценка изменения надежности конструкции планера с механическими повреждениями // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16, № 5. – С. 32–39.

6. Обеспечение прочности композитных авиационных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий / Ю.М. Фейгенбаум [и др.]. – М.: Техносфера, 2022. – 228 с.

7. ГОСТ 33495-2015. Композиты полимерные. Методы испытания на сжатие после удара. – М., 2015.

8. ГОСТ 33496-2015. Композиты полимерные. Методы испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом. – М., 2015.

9. ASTM D7137 / D7137M – 17. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. – 2017. 33495-2015

10. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом / В.С. Ерасов, В.Д. Крылов, С.В. Панин, А.А. Гончаров // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 60–64.

11. Feng, D. Structural response and damage resistance of sandwich composites subjected to low velocity impact / D. Feng, A., Cerioni F. Aymerich // 16th European conference on composite materials. – Seville, Spain, 22-26 June 2014. – P. 1–8

12. Lopresto, V. Residual Strength evaluation after impact tests in extreme conditions on CFRP laminates / V. Lopresto, A. Langella, I. Papa // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 167. – P. 138–142. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.680

13. Impact performance of GFRP laminates with modified epoxy resin / I. Papa, M.R. Ricciardi, V. Antonucci [et al.] // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 167. – P. 160–167. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.683

14. Taheri, H. Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: a comparative advantage of phased array ultrasonic / H. Taheri, A.A. Hassen // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, no 8. 1628. DOI: 10.3390/app9081628.

15. Староверов, О.А. Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии / О.А. Староверов, А.В. Бабушкин, С.М. Горбунов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 161–172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14

16. Бойчук, А.С. Оценка площади ударных повреждений ПКМ различными методами ультразвукового контроля / А.С. Бойчук, И.А. Диков, А.С. Генералов // Труды ВИАМ. – 2022. – № 7. – С. 125–133. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133

17. Митряйкин, В.И. Прочность многослойных пластин с ударными повреждениями / В.И. Митряйкин, О.Н. Беззаметнов // Ученые Записки Казанского Университета. Серия физико-математические науки. – 2022. – Т. 164. – № 2–3. – С. 206–220. DOI: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220

18. Дударьков, Ю.И. Экспериментальные исследования влияния энергии низкоскоростного удара на остаточную прочность силовых панелей из ПКМ / Ю.И. Дударьков, М.В. Лимонин // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2024. – Т. 30, № 1. – С. 72–84. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2024.30.01.05

19. Мольков, О.Р. Методика по определению уровня деградации упругих свойств композитных панелей больших толщин под воздействием низкоскоростных ударных воздействий / О.Р. Мольков, А.А. Больших // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – Вып. 8. – EDN LJDGYS

20. The effect of orientation on the shock response of a carbon fibre–epoxy composite / J.C.F. Millett, N.K. Bourne, Y.J.E. Meziere [et al.] // Composites Science and Technology. – 2007. – Vol. 67. – P. 3253–3260. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.03.034

21. Vieille, B. About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study / B. Vieille, V.M. Casado, C. Bouvet // Composite Structures. – 2013. – Vol. 101. – P. 9–21. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.01.025

22. Namala, K.K. Digital image correlation of low velocity impact on a glass/epoxy composite / K.K. Namala, P. Mahanjan, N. Bhatnagar // International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. – 2014. – Vol. 15, no. 3. – P. 203–217. DOI: 10.1080/15502287.2014.882441

23. Destic, F. Impact damages detection on composite materials by THz imaging / F. Destic, C. Bouvet // Case Stud. Nondestruct. Test. Eval. – 2016. – Vol. 6. – P. 53–62. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.09.003

24. High-speed 3D digital image correlation of low-velocity impacts on composite plates / M. Flores, D. Mollenhauer, V. Runatunga [et al.] // Composites Part B. – 2017. – Vol. 131. – P. 153–164. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.078

25. Жаренов, И.А. Измерение методом видеограмметрии полей деформации панелей в результате ударного повреждения / И.А. Жаренов, В.П. Кулеш, К.А. Курулюк // Труды МАИ. – 2018. – Вып. № 101. – С. 11.

26. An experimental study of the damage growth in composite laminates under tension–fatigue after impact / R. Bogenfeld, P. Schmiedel, N. Kuruvadi, [et al.] // Composites Science and Technology. – 2020. – Vol. 191. – P. 108082. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108082

27. Остаточная прочность и усталостная долговечность слоистого полимерного композита в условиях сжатия после удара / О.А. Староверов, Е.М. Струнгарь, А.И. Мугатаров, М.А. Дубровская // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – С. 106–119. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.09

28. Perillo, G. Numerical/Experimental study of the impact and compression after impact on GFRP composite for wind/marine applications / G. Perillo, J.K. Jorgensen // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 167. – P. 129–137. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.679

29. Pavelko, I. Equivalent Hole as an Evaluation Criterion of a Composite Material Residual Strength after a Low-Speed Impact / I. Pavelko, M. Smolaninovs // Machines, Technologies, Materials: International Virtual Journal for Science, Techniques and Innovations for the Industry. – 2010. – N. 7. – P.12–16.

30. Павелко, И. Исследование влияния ударного повреждения на прочностные характеристики композита / И. Павелко, М. Смолянинов // Механика композитных материалов. – 2011. – Т. 47, № 3. – С. 471–484.

31. Tan, K.T. Finite element model for compression after impact behaviour of stitched composites / K.T. Tan, N. Watanabe, Y. Iwahori // Composites. Part B: engineering. – 2015. – Vol. 79. – P. 53–60. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.04.022

32. Romano, F. Compression After Impact Analysis of Composite Panels and Equivalent Hole Method / F. Romano, F. Di Caprio, U. Mercurio // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 167. – P. 182–189. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.686

33. Исследование прочности композитной лопасти несущего винта вертолета, имеющей ударные повреждения, по теории предельного равновесия / И.Н. Сидоров, В.И. Митряй-

кин, А.В. Горелов, Л.П. Шабалин // Журнал Средневолжского математического общества. – 2019. – Т.21, №3. – С. 343–352. DOI: 10.15507/s2079-6900.201903.343-352

34. Pisarev, V.S. Residual stress determination in orthotropic composites by displacement measurements near through hole / V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky, A.V. Chernov // Experimental Mechanics. – 2015. – Vol. 55. no. 7. – P. 1225–1238. DOI: 10.1007/s11340-015-0015-3

35. Influence of plate thickness on the results of residual stresses determination by through hole drilling in orthotropic composites of different fiber orientation / S. Eleonsky, D. Kazantsev, V. Pisarev, E. Statnik // Materials Today: Proceedings. – 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.09.072

36. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments / V.S. Pisarev, I.N. Odintsev, S.I. Eleonsky, A.A. Apalkov // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Vol. 110. – P. 437–456. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.022

37. Residual stress determination by blind hole drilling and local displacement mapping in aluminium alloy aerospace components / S.I. Eleonsky, V.S. Pisarev, E.S. Statnik, A.I. Salimon, A.M. Korsunsky // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2024. – Vol. 69. – P. 192–209. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.69.14.

38. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – 2-е изд. – М: Наука, 1977. − 416 с.

References

1. Savin S.P. Primenenie sovremenny`x polimerny`x kompozicionny`x materialov v konstrukcii planera samolyotov semejstva MS-21 [Application of modern polymeric composite materials in the design of MS-21 airplane family]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (part 2), pp. 686–693

2. Golovan V.I., Grishin V.I., Dzyuba A.S., et al. Proektirovanie, raschety` i staticheskie ispy`taniya metallokompozitny`x konstrukcij [Design, numerical analysis and static tests of metallic-composite structures]. M.: Texnosfera, 2022, 408 p

3. Talreja R., Singh C.V. Damage and failure of composite materials. Cambridge University Press, 2012, 304 p

4. Nebelov E.V., Potozky M.V., Rodionov A.V., Gorsky A.N. Mechanism of damage propagation to the propeller blades of composite materials with exposed damaging elements. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 26–31

5. Poliansky V.V., Nesterov V.A. Estimation of reliability alteration of airframe configuration with mechanical damage. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 32-39.

6. Feigenbaum Yu. M. Ensuring the strength of composite aircraft structures taking into account accidental operational shock effects. M: Texnosfera, 2022, p.7

7. GOST 33495-2015. «Kompozity` polimerny`e. Metody` ispy`taniya na szhatie posle udara».

8. GOST 33496-2015. «Kompozity` polimerny`e. Metody` ispy`taniya na soprotivlenie povrezhdeniyu pri udare padayushhim gruzom» [Russian Federation State Standard 33496-2015. Polymer Composites. Methods of Drop-Weight Testing for Damage Resistance Qualification]

9. ASTM D7137 / D7137M – 17. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. – 2017. 33495-2015

10. Erasov V.S., Krylov V.D., Panin S.V., Goncharov A.A. Ispy`taniya polimernogo kompozicionnogo materiala na udar padayushhim gruzom [Drop-weight testing of polymer composite material]. *Aviacionny`e materialy` i texnologii*, 2013, no. 3, pp. 60–64

11. Feng D., Cerioni A., Aymerich F. Structural response and damage resistance of sandwich composites subjected to low velocity impact. *16th European conference on composite materials*, 2014, Seville, Spain, 22-26 June, pp. 1–8

12. Lopresto V., Langella A., Papa I. Residual Strength evaluation after impact tests in extreme conditions on CFRP laminates. *Procedia Engineering,* 2016, vol. 167, pp. 138–142 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.680

13. Papa I., Ricciardi M.R., Antonucci V., et al. Impact performance of GFRP laminates with modified epoxy resin. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 167, pp. 160–167 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.683

14. Taheri H., Hassen A.A. Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: a comparative advantage of phased array ultrasonic. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 8, 1628 DOI:10.3390/app9081628

15. Staroverov O.A., Babushkin A.V., Gorbunov S.M. Ocenka stepeni povrezhdennosti ugleplastikovy`x kompozicionny`x materialov pri udarnom vozdejstvii [Evaluation of the damage degree to carbon-fiber composite materials under impact]. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mehanika, 2019, no. 1, pp. 161–172 DOI:10.15593/perm.mech/2019.1.14

16. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Ocenka ploshhadi udarny`x povrezhdenij PKM razlichny`mi metodami ul`trazvukovogo kontrolya [Assessment of the area of shock damage to the PCM by various methods of ultrasonic testing]. *Trudy` VIAM*, 2022, no. 7, pp. 125-133 DOI:10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133

17. Mitryaykin V.I., Bezzametnov O.N. Prochnost` mnogoslojny`x plastin s udarny`mi povrezhdeniyami [Strength of multilayered plates with impact damage] .*Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2022, vol. 164, no. 2–3, pp. 206–220 DOI:10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220

18. Dudarkov Yu.I., Limonin M.V. E`ksperimental`ny`e issledovaniya vliyaniya e`nergii nizkoskorostnogo udara na ostatochnuyu prochnost` silovy`x panelej iz PKM [Experimental studies of the effect of low-velocity impact energy on the residual strength of PCM power panels]. *Mechanics of composite materials and structures*, 2024, vol. 30, no. 1. pp. 72-84.

19. Molkov O.R., Bolshikh A.A. Metodika po opredeleniyu urovnya degradacii uprugix svojstv kompozitny`x panelej bol`shix tolshhin pod vozdejstviem nizkoskorostny`x udarny`x vozdejstvij [Method of determining the elastic properties degradation level in the heavy gage composite panels exposed to the low-velocity impact action]. Inzhenerny`j zhurnal: nauka i innovacii, 2024, no. 8

20. Millett J.C.F., Bourne N.K., Meziere Y.J.E., et al. The effect of orientation on the shock response of a carbon fibre–epoxy composite // Composites Science and Technology. – 2007. – V. 67. – P. 3253–3260. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.03.034

21. Vieille B., Casado V.M., Bouvet C. About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study // Composite Structures. – 2013. – V. 101. – P. 9–21. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.025

22. Namala K.K., Mahanjan P., Bhatnagar N. Digital image correlation of low velocity impact on a glass/epoxy composite // International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. – 2014. – V. 15. – N 3. – P. 203–217. https://doi:10.1080/15502287.2014.882441

23. Destic F., Bouvet C. Impact damages detection on composite materials by THz imaging // Case Stud. Nondestruct. Test. Eval. – 2016. – V. 6. – P. 53–62. http://dx.doi.org/10.1016/j.csndt.2016.09.003

24. Flores M., Mollenhauer D., Runatunga V., et al. High-speed 3D digital image correlation of low-velocity impacts on composite plates // Composites Part B. – 2017. – V. 131. – P. 153–164.

25. Zharenov I.A., Kulesh V.P., Kuruliuk K.A. Izmerenie metodom videogrammetrii polej deformacii panelej v rezul`tate udarnogo povrezhdeniya [Measuring deformation fields of panels suffering impact damages with videogrammetry method]. *Trudy MAI*, 2018, Issue 101, P. 11

26. Bogenfeld R., Schmiedel P., Kuruvadi N., et al. An experimental study of the damage growth in composite laminates under tension–fatigue after impact // Composites Science and Technology. – 2020. – V. 191. – 108082. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108082

27. Staroverov O.A., Strungar E.M., Mugatarov A.I., Dubrovskaya M.A. Residual Strength and Fatigue life of Woven Composite under Compression after Impact Loading. PNRPU Mechanics Bulletin, 2024, no. 5, pp. 106-119. https://doi.org/perm.mech/2024.5.09

28. Perillo G., Jorgensen J.K. Numerical/Experimental study of the impact and compression after impact on GFRP composite for wind/marine applications // Procedia Engineering. – 2016. – V. 167. – P.129–137. https://doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.679

29. Pavelko I., Smolaninovs M. Equivalent Hole as an Evaluation Criterion of a Composite Material Residual Strength after a Low-Speed Impact // Machines, Technologies, Materials: International Virtual Journal for Science, Techniques and Innovations for the Industry. – 2010. – N. 7. – P.12–16

30. Pavelko I., Smolyaninov M. Investigation of the impact of shock damage on the strength characteristics of a composite. *Mechanics of composite materials*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 471-484

31. Tan K.T., Watanabe N., Iwahori Y. Finite element model for compression after impact behaviour of stitched composites. *Composites. Part B: Engineering,* 2015, vol. 79, pp. 53-60 DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.04.022

32. Romano F., Di Caprio F., Mercurio U. Compression After Impact Analysis of Composite Panels and Equivalent Hole Method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 167, pp. 182–189 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.686

33. Sidorov I.N., Mitryaikin V.I., Gorelov A.V., Shabalin L.P. Issledovanie prochnosti kompozitnoj lopasti nesushhego vinta vertoleta, imeyushhej udarny`e povrezhdeniya, po teorii predel`nogo ravnovesiya [Strength analysis of composite rotor helicopter blade, having percussive damage, by limit equilibrium theory]. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshhestva*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 343–352 DOI: 10.15507/s2079-6900.201903.343-352

34. Pisarev V.S., Eleonsky S.I., Chernov A.V. Residual stress determination in orthotropic composites by displacement measurements near through hole. *Experimental Mechanics,* 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1225–1238 DOI: 10.1007/s11340-015-0015-3

35. Eleonsky S., Kazantsev D., Pisarev V., Statnik E. Influence of plate thickness on the results of residual stresses determination by through hole drilling in orthotropic composites of different fiber orientation. *Materials Today: Proceedings* DOI: 10.1016/j.matpr.2023.09.072

36. Pisarev V.S., Odintsev I.N., Eleonsky S.I., Apalkov A.A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 110, pp. 437–456 DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.022

37. Eleonsky S.I., Pisarev V.S., Statnik E.S., Salimon A.I., Korsunsky A.M. Residual stress determination by blind hole drilling and local displacement mapping in aluminium alloy aerospace components. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2024, 69, pp. 192-209, https://doi:10.3221/IGF-ESIS.69.14

38. Lekhnitsky S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela Izd. 2-e [Theory of elasticity of an Anistotropic elastic body. Holden-day], translation of 1950 Russian edition. 404 p.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The study was not supported by sponsorship.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.