

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-6-59-75>**ПОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ОКРЕСТНОСТИ ЗАПОЛНЕННЫХ МОНТАЖНЫХ
ОТВЕРСТИЙ ПАНЕЛИ КРЫЛА САМОЛЕТА**© **Святослав Игоревич Елеонский¹, Михаил Дмитриевич Зайцев¹,
Юрий Григорьевич Матвиенко², Владимир Сергеевич Писарев^{1*}**¹ Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, Россия, 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1; *e-mail: VSP5335@mail.ru² Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4.

*Статья поступила 8 мая 2024 г. Поступила после доработки 8 мая 2024 г.
Принята к публикации 28 мая 2024 г.*

Проведены испытания на сопротивление усталости двух геометрически одинаковых конструктивно подобных моделей нижней панели крыла коммерческого самолета. Панели отличались способом установки монтажных болтов, соединяющих обшивку и стрингер. В первой панели перед монтажом обшивки и стрингера выполняли холодное упрочнение отверстий. Во второй панели после сверления и развертывания дополнительную обработку отверстий не проводили. Болты устанавливали с натягом в пределах от 1,3 до 2,1 % для первой панели и от 2,9 до 3,2 % — для второй панели. Вариации в значениях натяга вызваны наличием полей допуска на диаметры как болтов, так и монтажных отверстий. Сравнение указанных технологий проведено на основе исследования полей остаточных напряжений. Выполнен анализ величин компонент остаточных напряжений в окрестности монтажных отверстий в обшивке, которые заполнены болтами с натягом. Компоненты остаточных напряжений определяли на основе метода сверления отверстия и метода последовательного наращивания длины трещины (ПНДТ). Деформационный отклик измеряли методом электронной спекл-интерферометрии. Первый (дискретный) метод, основанный на сверлении зондирующего отверстия, дает возможность количественно определять компоненты остаточных напряжений, начиная с расстояния 1,1 мм от контура монтажного отверстия. Вторым (непрерывным) методом заключается в последовательном наращивании длины искусственного надреза. Разработан новый вариант метода ПНДТ, который обеспечивает определение параметров механики разрушения для надрезов, распространяющихся в зоне контактного взаимодействия. Он состоит в том, что в середине расстояния между исследуемыми монтажными отверстиями выполняют исходное сквозное отверстие, от контура которого и начинается последовательность искусственных надрезов. Конечной точкой этой последовательности является внешний контур болта. Такой подход обеспечивает анализ полей остаточных напряжений, возникающих при двух технологиях установки болтов, путем сравнения величин КИН. Оба экспериментальных подхода выявляют преимущества соединения с болтами, установленными в упрочненное отверстие. Обоснована и наглядно продемонстрирована высокая эффективность и надежность методов определения остаточных напряжений, использующих оптико-интерференционные измерения деформационного отклика на локальное удаление материала. Эти методы основаны на получении интерферограмм высокого качества, которые обеспечивают разрешение интерференционных полос предельной плотности непосредственно на контуре зондирующего отверстия или на берегах искусственного надреза.

Ключевые слова: конструктивно подобная модель; болтовые соединения; остаточные напряжения; метод сверления отверстия; метод последовательного наращивания длины трещины; электронная спекл-интерферометрия.

**FIELDS OF RESIDUAL STRESSES NEAR FILLED ASSEMBLAGE HOLES
OF THE AIRCRAFT WING PANEL**© **Svyatoslav I. Eleonsky,¹ Mikhail D. Zaitsev,¹
Yury G. Matvienko,² Vladimir S. Pisarev^{1*}**

¹ N. E. Zhukovsky Central AeroHydrodynamics Institute, 1, Zhukovskogo ul., Zhukovsky, Moscow obl., 140180, Russia; *e-mail: VSP5335@mail.ru

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science, 4, Malyi Kharitonyevsky per., Moscow, 101000, Russia.

Received May 8, 2024. Revised May 8, 2024. Accepted May 28, 2024.

Fatigue tests of two geometrically identical and similar in design models of the lower wing panel of a commercial aircraft were performed. The models differ in the way of mounting bolts which join the skin and stringers. Cold expansion of holes drilled both in the skin and stringer has been performed for the first panel before joining. No additional treatment of holes was performed in the second panel after drilling pilot holes and final reaming. Bolts are mounted with the interference fit ranging from 1.3 to 2.1% and from 2.9 to 3.2% for the first and the second panel, respectively. The range of the interference fit values is attributed to the tolerance fields for the diameters of bolts and assemblage holes. A comparison of both technologies proceeded from the experimental study of residual stress fields. The second stage, which is the subject of present paper, includes the analysis of the values of residual stress components in the vicinity of skin holes filled by bolts mounted with the interference fit. The components of residual stressed were determined using the method of hole drilling and successive cracking (crack compliance) method. The deformation response was measured by electronic speckle-pattern interferometry. The first point-wise method, based on drilling a probe hole, provides the quantitative determination of residual stress components, starting from a distance of 1.1 mm from the assemblage hole edge. The second technique consists in successive extension of the notch length. A new version of the crack compliance technique providing the determination of fracture mechanics parameters for notches propagating in the contact zone has been developed. The essence of this approach consists in drilling the initial hole equidistant from two assemblage holes of interest. The edge of this through hole is a starting point of the sequence of artificial notches, the end point of this sequence is the outer contour of the bolt. This approach provides quantitative analysis of residual stress fields proceeding from the comparison of the values of stress intensity factors (SIF) related to different technologies of bolt mounting. Two experimental approaches reveal advantages of joining with bolts mounted into cold-expanded holes. The high efficiency and accuracy of the methods for residual stress determination which employ optical interferometric measurements of the deformation response to local removing of the material is substantiated and clearly demonstrated. The methods are based on recording high-quality interferograms, which provide the resolution of interference fringes of the ultimate density directly on the hole edge and along borders of the artificial notch.

Keywords: design-similar model; bolted joints; residual stress; hole drilling technique; crack compliance method; electronic speckle-pattern interferometry.

Введение

Технология подготовки монтажных отверстий и выбор способа установки болтов — факторы, оказывающие значительное влияние на усталостную прочность соединений авиационных конструкций [1, 2]. Технология монтажа определяет распределения компонент остаточных напряжений в окрестности индивидуальных элементов болтовых соединений. Количественный анализ величин действующих и остаточных напряжений в окрестности болтов, установленных с натягом, является необходимым звеном при обосновании усталостной прочности соединений [3 – 9]. Экспериментальные методы, основанные на локальном удалении материала и оптико-интерференционных измерениях деформационного отклика, весьма эффективны для количественного определения остаточных напряжений в нерегулярных зонах конструкций [10].

В работе [10] представлены результаты определения полей остаточных напряжений в четырех образцах различных типов, вырезанных из конструктивно подобных панелей крыла коммерческого самолета после демонтажа болтового соединения обшивки и стрингера. Целью исследований являлось сравнение значений главных компонент остаточных напряжений, которые со-

храняются в элементах обшивки крыла по завершении испытаний на усталостную прочность. Испытания проводили на двух конструктивно подобных панелях с одинаковыми параметрами цикла нагружения: размах напряжений $\Delta\sigma = 140$ МПа; коэффициент асимметрии $R = 0,01$. Схемы панелей и приложения нагрузки приведены в статье [10]. Панели имели обозначения *ZA* и *ZB* и отличались технологией установки крепежных болтов, соединяющих обшивку со стрингером. В панели *ZA* исходные отверстия после сверления и развертывания были упрочнены методом дорнирования (холодного упрочнения) с натягом 0,5 %. Перед монтажом панели *ZB* такую процедуру не использовали. В панели *ZB* болты устанавливали с натягом от 2,9 до 3,2 %, что связано с полями допуска на диаметры как болтов, так и монтажных отверстий. Для панели *ZA* величина натяга составляла от 1,3 до 2,1 %. Обе панели выдержали нагружение в пределах назначенного ресурса $N_F = 125\,000$ циклов без разрушения в зачетной зоне. На первом этапе после завершения испытаний панели крыла были разобраны на фрагменты для изготовления образцов. При этом болты из монтажных отверстий диам. 10 мм удалили. Второй этап исследований связан с определением полей остаточных напря-

жений в окрестности монтажных отверстий, заполненных болтами. Для этого использовали плоские образцы одинаковой геометрии с размерами $215 \times 200 \times 10$ мм, обозначенные как Z5 и Z6 (рис. 1). Монтажные отверстия выполняли с использованием холодного упрочнения и без него для образцов Z5 и Z6 соответственно. Образец Z5 вырезали из участка панели ZA в непосредственной близости от образца Z3 [10], образец Z6 — из участка панели ZB в непосредственной близости от образца Z4 [10].

Объекты экспериментального исследования

Экспериментальное определение остаточных напряжений методом сверления отверстия проводили на двух образцах, вырезанных из равномерно нагруженных зон конструктивно подобных панелей крыла коммерческого самолета. Образцы с нечетными и четными номерами относились к панелям ZA и ZB соответственно. Три пары центральных монтажных отверстий в каждом образце заполнялись штатными крепежными болтами, установленными с указанным выше натягом (см. рис. 1). На начальном этапе работы для определения компонент остаточных напряжений использовался метод сверления отверстия, а на заключительном этапе — метод последовательного наращивания длины трещины. В обоих случаях деформационный отклик на локальное удаление материала измерялся методом электронной спекл-интерферометрии [11, 12]. Общий вид обоих образцов после проведения экс-

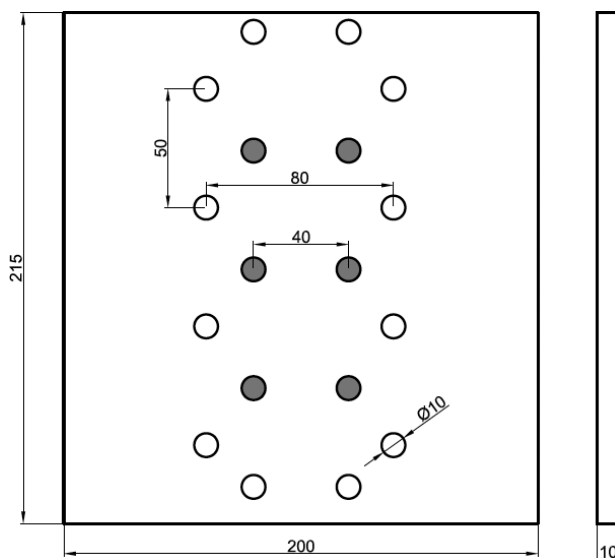


Рис. 1. Геометрические размеры образцов Z5 и Z6 с сеткой монтажных отверстий

Fig. 1. Geometrical dimensions of specimens Z5 and Z6 with a grid of assemblage holes

периментов, используемая система координат и направление циклической нагрузки показаны на рис. 2.

Исходные данные для метода сверления отверстия

Экспериментальная информация имеет вид картин интерференционных полос, которые возникают при сверлении зондирующего отверстия

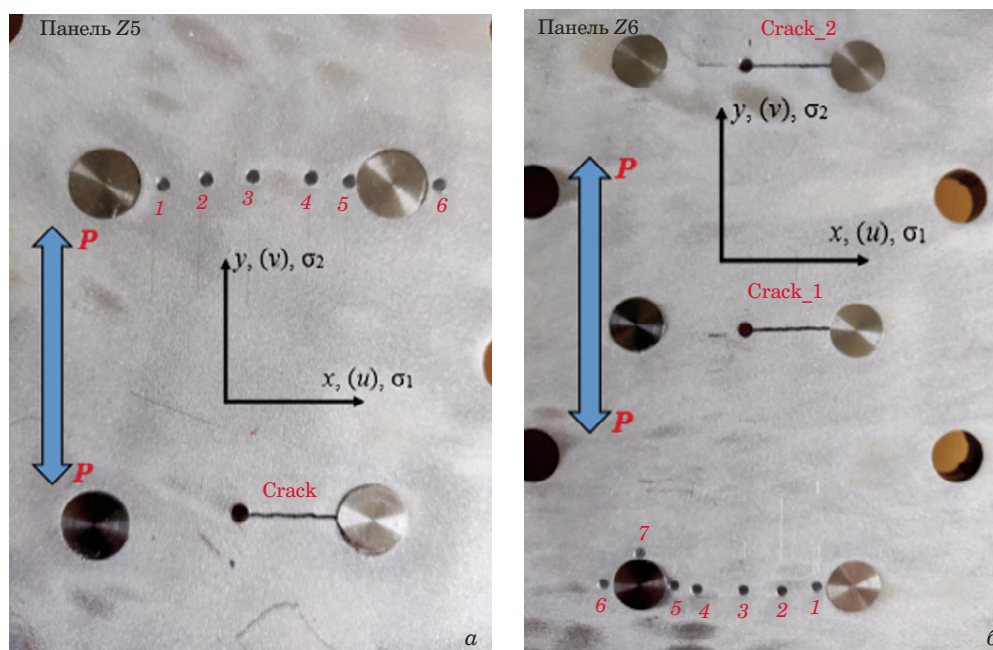


Рис. 2. Фрагменты образцов Z5 (а) и Z6 (б) с сеткой зондирующих отверстий и искусственными надрезами

Fig. 2. Fragments of specimens Z5 (a) and Z6 (b) with a grid of probe holes and artificial notches

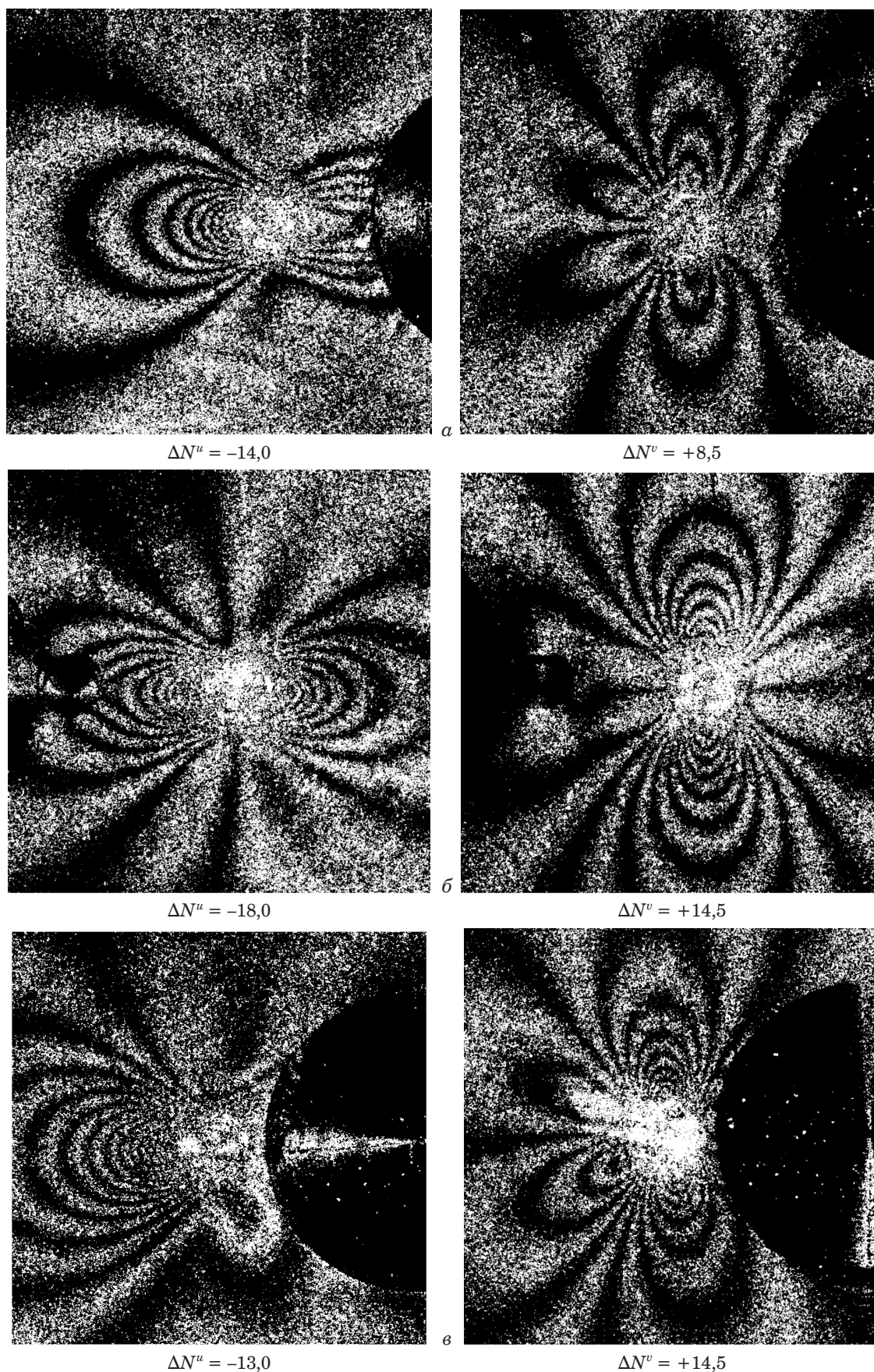


Рис. 3. Картины интерференционных полос, полученные для образца Z5 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (слева) и v (справа), после сверления отверстий в точках 1 (а), 4 (б), 6 (в)

Fig. 3. Specimen Z5. Interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (at the left) and v (at the right) as the result of hole drilling at point 1 (a), 4 (b), 6 (c) (diameter $2r_0 = 1.9$ mm)

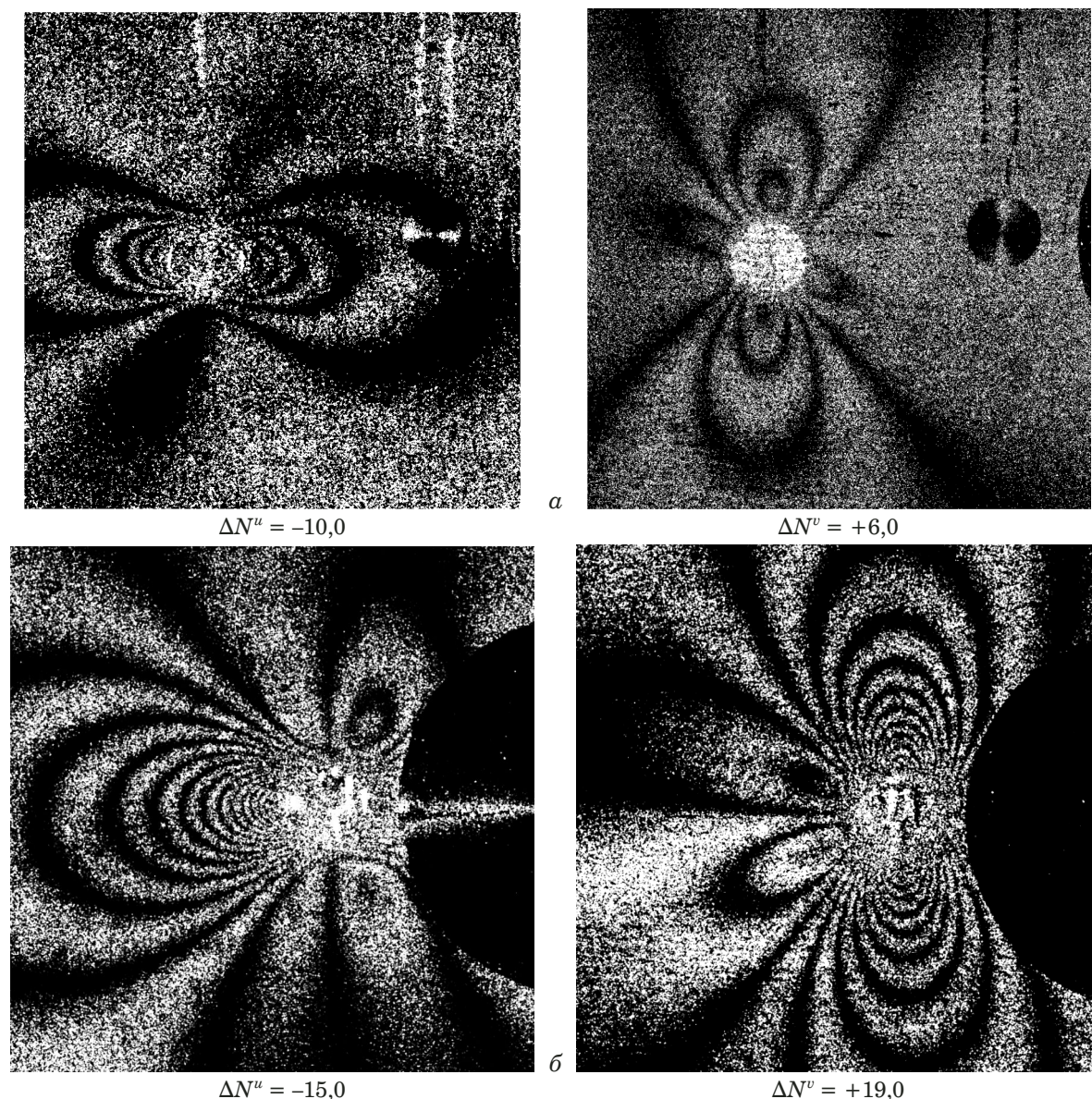


Рис. 4. Картины интерференционных полос, полученные для образца Z6 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (слева) и v (справа) после сверления отверстий в точках 2 (а) и 6 (б)

Fig. 4. Specimen Z6. Interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (at the left) and v (at the right) as the result of hole drilling at point 2 (a) and 6 (b) (diameter $2r_0 = 1.9$ mm)

в поле остаточных напряжений. Эти интерферограммы количественным образом описывают распределения тангенциальных компонент перемещений u и v в направлении координатных осей x и y соответственно. Подробное описание экспериментального подхода приведено в работах [10–12]. Все зондирующие отверстия, выполненные твердосплавным сверлом, имеют диаметр $2r_0 = 1,9$ мм. Во всех случаях глубина несквозных отверстий h отвечает условию $h \geq 3r_0$. Типичные картины интерференционных полос, полученные для образца Z5, показаны на рис. 3.

Картины интерференционных полос, полученные для образца Z6, представлены на рис. 4.

Все полученные интерферограммы, часть которых приведена выше, характеризуются высоким качеством. Таким образом, обеспечивается надежное разрешение полос непосредственно на контуре отверстия. Как характерные следует отметить картины полос на рис. 3, а (слева) и рис. 4, б (справа), где на отверстиях диаметром $2r_0 = 1,9$ мм надежно идентифицируются 18 и 19 полос соответственно. Кроме того, конфигурация картин интерференционных полос наглядно свидетельствует, что направления координатных осей x и y практически совпадают с направлениями главных остаточных напряжений σ_1 и σ_2 соответственно. Это означает, что для определения главных компонент остаточных напряжений в

Таблица 1. Результаты обработки картин интерференционных полос и величины остаточных напряжений в образце Z5
Table 1. Interpretation of interference fringe patterns and values of residual stress components in Specimen Z5

Номер точки (см. рис. 2)	Δx , пикс.	Δx , мм	ΔN^u , полос	ΔN^v , полос	Δu , мкм	Δv , мкм	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
1	122	2,26	-14,0	+8,5	-5,32	+3,23	-93,2	+31,8
2	228	4,22	-13,0	+7,5	-4,94	+2,85	-87,7	+26,3
3	252	4,66	-8,5	+7,0	-3,23	+2,66	-51,5	+34,7
4	350	6,48	-18,0	+16,0	-6,84	+6,08	-105,6	+83,3
5	10	0,185	-12,0	+16,5	-4,56	+6,27	-54,1	+104,3
	198	3,66						
6	34	0,63	-13,0	+14,5	-4,94	+5,51	-68,1	+84,8

Таблица 2. Величины главных компонент остаточных напряжений вдоль линии A в образце Z5

Table 2. Values of principal components of residual stresses along line A in specimen Z5

Параметры	Номер точки						Граница контура монтажного отверстия
	6	1	2	3	4	5	
x , мм	1,58	2,15	8,17	14,73	23,11	28,7	29,8 ($\Delta x = 1,1$ мм)
σ_1 , МПа	-68,1	-93,3	-87,7	-51,5	-105,6	-54,1	
σ_2 , МПа	+84,8	+31,8	+26,3	+34,7	+83,3	+104,3	

Таблица 3. Результаты обработки картин интерференционных полос и величины остаточных напряжений в образце Z6

Table 3. Interpretation of interference fringe patterns and values of residual stress components in specimen Z6

Номер точки (см. рис. 2)	Δx , пикс.	Δx , мм	ΔN^u , полос	ΔN^v , полос	Δu , мкм	Δv , мкм	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
1	58	1,07	-14,5	+20,0	-5,51	+7,60	-65,2	+126,6
2	254	4,70	-10,0	+6,0	-3,80	+2,28	-66,8	+22,1
3	300	5,55	-9,0	+3,5	-3,42	+1,33	-65,4	+4,1
4	376	7,0	-14,5	+13,5	-5,51	+5,13	-83,4	+72,3
5	24	0,44	-10,0	+17,0	-3,80	+6,46	-36,0	+114,1
	118	2,18						
6	48	0,89	-15,0	+19,0	-5,70	+7,22	-72,3	+116,8

Образец Z6 с болтами, начальная точка A1 надреза C1 ($2r_0 = 2,5$ мм)

A1 глухое отверстие $h = 7,5$ мм	-14,0	+8,0	-5,32	+3,04	-71,5	+20,9
A1 сквозное отверстие $t = 10,0$ мм	-14,5	+8,5	-5,51	3,23	-73,5	+23,0

тонких пластинах можно использовать алгоритм, подробно изложенный в работе [10].

Результаты определения остаточных напряжений

Сетки зондирующих отверстий в образце Z5 и образце Z6 показаны на рис. 2, а и б. Полученные результаты обработки картин интерференционных полос и определения главных компонент остаточных напряжений для этих образцов приведены в табл. 1 – 4. Величина Δx обозначает расстояние между контурами соседних как зондирующих, так и монтажных отверстий. Все представленные данные относятся к условной линии A, направление которой для обо-

их образцов совпадает с координатной осью x (см. рис. 2).

При анализе данных, приведенных в табл. 1 – 4, следует учитывать следующие обстоятельства. Величины главных компонент остаточных напряжений определяются по следующим формулам [10]:

$$\sigma_1 = \frac{E}{2r_0} \left\{ \frac{a\Delta u + b\Delta v}{a^2 - b^2} \right\}, \quad \sigma_2 = \frac{E}{2r_0} \left\{ \frac{a\Delta v + b\Delta u}{a^2 - b^2} \right\}, \quad (1)$$

где r_0 — радиус отверстия; E — модуль упругости материала; μ — коэффициент Пуассона изотропного материала; Δu и Δv — приращения диаметра зондирующего отверстия в направлении глав-

ных напряжений σ_1 и σ_2 ; $a = (\alpha_1 - 1)$, $b = (\alpha_2 - \mu)$, α_1 и α_2 — коэффициенты концентрации напряжений при одноосном растяжении пластины с несквозным отверстием. Для зондирующих отверстий, расположенных в регулярной зоне конструкции (на расстояниях от контура монтажных отверстий $\Delta x \geq 5r_0 = 4,5$ мм), значения коэффициентов α_1 и α_2 находятся на основе численного решения упругой задачи о концентрации напряжений, схема которой приведена на рис. 5, а. Для обоих образцов этому решению отвечают точки 2, 3 и 4. В этом случае для несквозных зондирующих отверстий, глубина которых $h \geq 3r_0$, величины коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_1 = 3,0$, $\alpha_2 = 1,0$.

Для точек 1, 5 и 6, расположенных в окрестности монтажных отверстий, которые заполнены болтами с натягом, использование формул (1) со значениями $\alpha_1 = 3,0$ и $\alpha_2 = 1,0$ приводит к некоторым погрешностям определения главных компонент остаточных напряжений. Значения коэффициентов концентрации напряжений, которые соответствуют реальному взаимному расположению зондирующего и монтажного отверстий, можно получить на основе численного решения упругой задачи, схематично показанной на рис. 5, б. Данная задача является более сложной, чем определение коэффициентов концентрации напряжений в толстой плите с несквозным отверстием (см. рис. 5, а). Тем не менее современные вычислительные средства позволяют получить численное решение с высокой степенью точности. Однако реализация подобной процедуры выходит за рамки данной работы. Кроме того, следует учитывать, что основная задача — сравнение величин остаточных напряжений в окрестности заполненных монтажных отверстий, выполненных по двум различным технологиям. Это означает, что погрешности определения компонент остаточных напряжений одинаковы для зондирующих отверстий, выполненных у монтажных отверстий обоих типов.

Поэтому оценку возможных погрешностей проводят на основе сравнения величин компонент остаточных напряжений, полученных для различных значений коэффициентов α_1 и α_2 . Для этого выбирают величины коэффициентов кон-

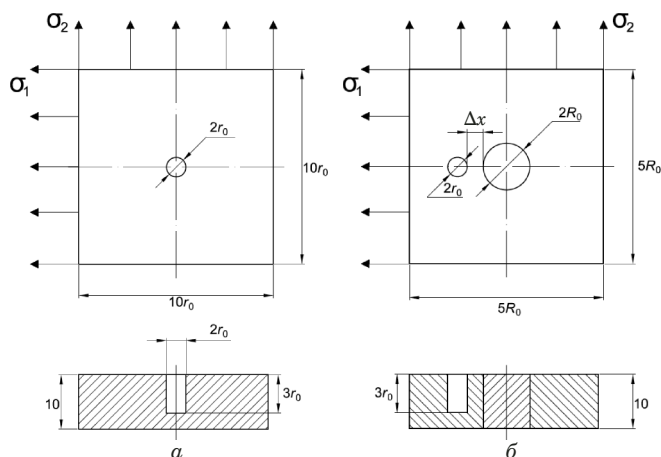


Рис. 5. Схемы определения коэффициентов концентрации напряжений на основе численного решения упругой задачи в регулярной зоне (а) и в области заполненного отверстия (б)

Fig. 5. Schemes of SIF determination from the numerical solution of elastic problem in a regular zone (a) and in the area containing filled hole (b)

центрации напряжений α_1 и α_2 , которые в какой-то мере соответствуют таковым при сверлении зондирующего отверстия в окрестности заполненного монтажного отверстия. Это можно сделать, например, опираясь на результаты экспериментальных исследований, приведенных в [11]. На основе прецизионных измерений тангенциальных компонент перемещений на контуре отверстия в прямоугольном образце, которое заполнено стальной шайбой с натягом 1,2 %, при последовательном увеличении растягивающей нагрузки установлено, что $\alpha_1 = 2,0$; $\alpha_2 = 0,6$. Поскольку зондирующие отверстия расположены на некотором удалении от контура монтажного отверстия, заполненного болтом с натягом, для оценки возможных погрешностей предлагается использовать усредненные значения, а именно — $\tilde{\alpha}_1 = 2,5$; $\tilde{\alpha}_2 = 0,8$. Величины главных компонент остаточных напряжений, полученные с использованием усредненных коэффициентов концентрации напряжений, представлены в табл. 5. Как и следовало ожидать, с уменьшением коэффициентов концентрации напряжений величины компонент остаточных напряжений возрастают, для рассмотренных пар коэффициентов concentra-

Таблица 4. Величины главных компонент остаточных напряжений вдоль линии А в образце Z6

Table 4. Values of the principal components of residual stressed along line A in Specimen Z6

Параметры	Номер точки					Граница контура монтажного отверстия
	(1 + 6)/2	2	3	4	5	
x, мм	1,93	8,53	15,98	24,88	28,96	30,35
σ_1 , МПа	-68,8	-66,8	-65,4	-83,4	-36,0	
σ_2 , МПа	+121,7	+22,1	+4,1	+72,3	+114,1	

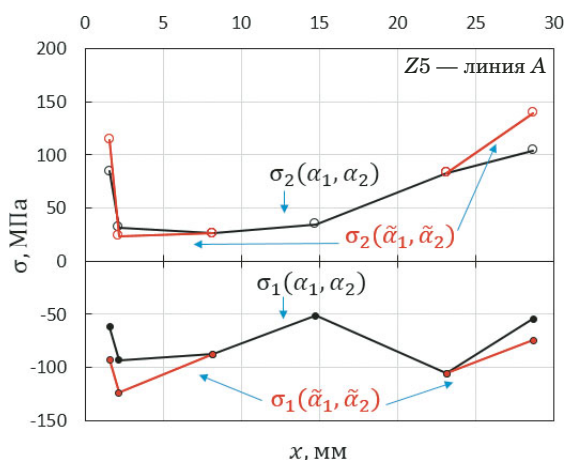


Рис. 6. Распределения главных компонент остаточных напряжений σ_1 и σ_2 вдоль линии A в образце Z5

Fig. 6. Distributions of the principal components of residual stress σ_1 and σ_2 along line A in specimen Z5

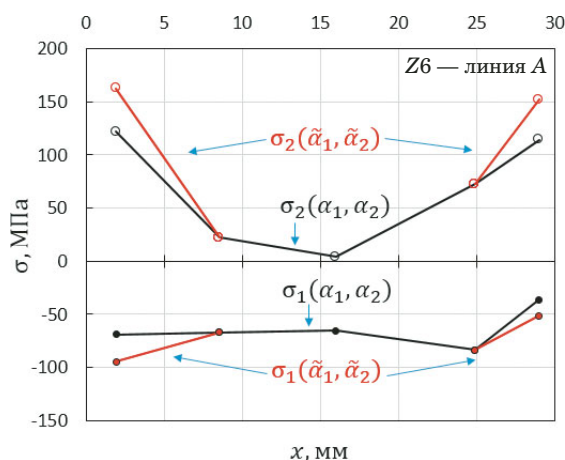


Рис. 7. Распределения главных компонент остаточных напряжений σ_1 и σ_2 вдоль линии A в образце Z6

Fig. 7. Distributions of the principal components of residual stress σ_1 and σ_2 along line A in specimen Z6

Таблица 5. Величины остаточных напряжений в образцах Z5 и Z6, полученные для различных значений коэффициентов концентрации напряжений

Table 5. Values of residual stresses in Specimens Z5 and Z6 obtained for different pairs of stress concentration factors

Определяемые параметры	Номер точки				
	Z5		Z6		
	6	1	5	(1 + 6)/2	5
$\sigma_1(\alpha_1, \alpha_2)$	-68,1	-93,3	-54,1	-68,8	-36,0
$\sigma_1(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2)$	-92,5	-124,0	-74,6	-94,5	-51,1
$\delta(\sigma_1)$	0,26	0,25	0,26	0,27	0,25
$\sigma_2(\alpha_1, \alpha_2)$	+84,8	+31,8	+104,3	+121,7	+114,1
$\sigma_2(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2)$	+114,1	+23,5	+139,5	+162,7	+152,0
$\delta(\sigma_2)$	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25

ции напряжений — 25–27%. Таким образом, значения, приведенные в табл. 1–4, которые получены для коэффициентов концентрации $\alpha_1 = 3,0$ и $\alpha_2 = 1,0$, представляют собой нижнюю границу величин компонент остаточных напряжений в окрестности заполненных монтажных отверстий. Реальные характеристики поля остаточных напряжений в нерегулярной зоне можно получить на основе численного моделирования упругой задачи о концентрации напряжений, схема которой показана на рис. 5, б. Главное, для зондирующих отверстий, расположенных на минимально возможных расстояниях от контура монтажных отверстий, получена исходная экспериментальная информация в виде картин интерференционных полос высокого качества (см. рис. 3, 5 и 7).

Экспериментальные зависимости компонент остаточных напряжений для образца Z5 и образца Z6 представлены на рис. 6 и 7. Начало каждой оси находится на контуре монтажного отверстия,

ближайшего к контуру зондирующего отверстия. Для крайних точек этих зависимостей представлены два типа значений компонент остаточных напряжений из табл. 5. Главная особенность этих распределений состоит в том, что компоненты остаточных напряжений σ_1 и σ_2 имеют отрицательный и положительный знаки для обоих образцов. В случае свободных монтажных отверстий выявлены отрицательные знаки обеих компонент [10]. При этом наблюдалась релаксация величин компоненты σ_2 , совпадающей с направлением нагрузки, в отличие от отрицательных значений компоненты σ_1 . При наличии болтов с натягом, установленных в монтажные отверстия обоих типов, в поле приложения циклической нагрузки с растягивающими внешними напряжениями наблюдаются положительные знаки компоненты остаточных напряжений σ_2 , направленной вдоль линии приложения усилия. Очевидно, что данный факт оказывает некоторое негативное влияние на долговечность соединений.

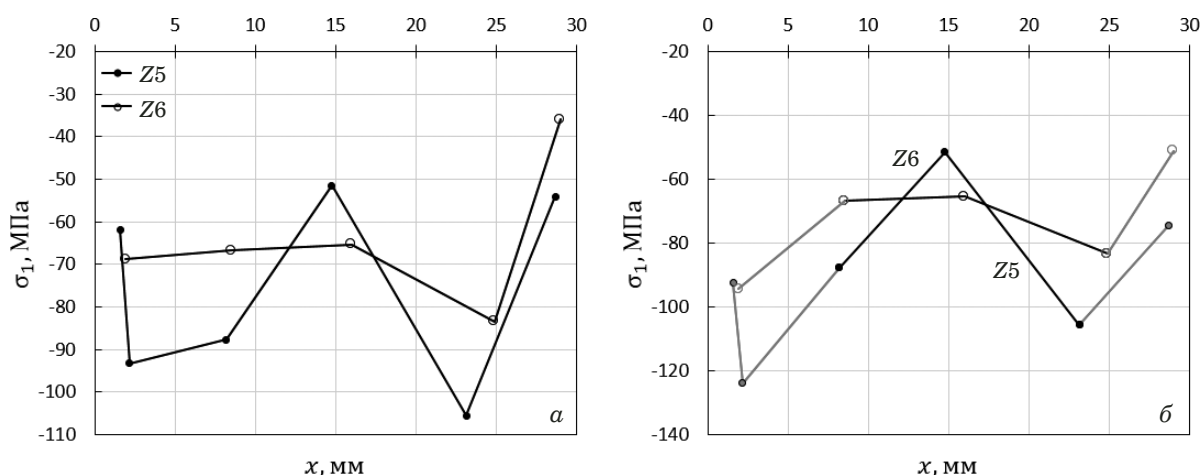


Рис. 8. Распределения главной компоненты остаточных напряжений σ_1 вдоль линии A в образце Z5 и образце Z6 для коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_1 = 3,0, \alpha_2 = 1,0$ (а) и $\tilde{\alpha}_1 = 2,5, \tilde{\alpha}_2 = 0,8$ (б)

Fig. 8. Distributions of the principal component σ_1 along line A in specimens Z5 and Z6 for SIF $\alpha_1 = 3.0, \alpha_2 = 1.0$ (a) and $\tilde{\alpha}_1 = 2.5, \tilde{\alpha}_2 = 0.8$ (b)

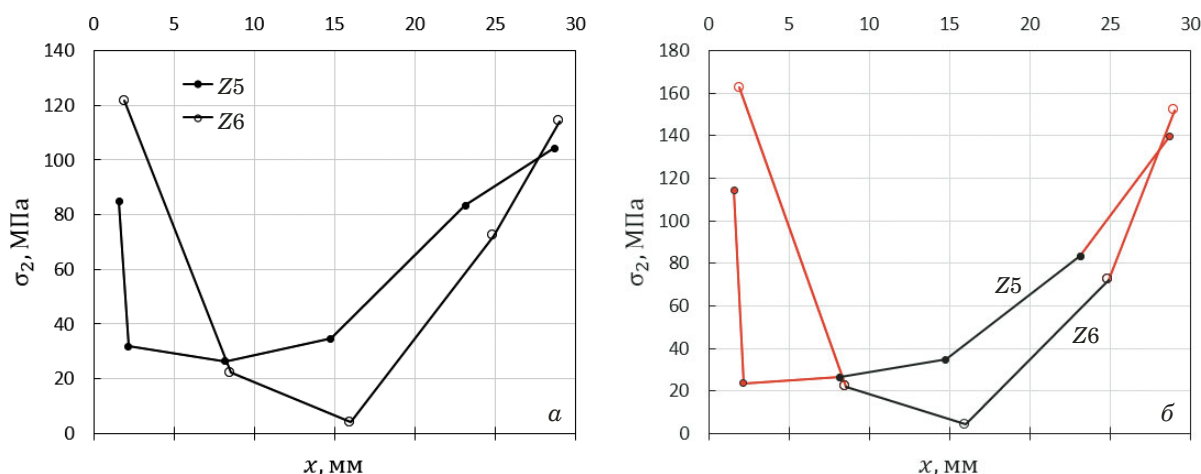


Рис. 9. Распределения главной компоненты остаточных напряжений σ_2 вдоль линии A в образце Z5 и образце Z6 для коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_1 = 3,0, \alpha_2 = 1,0$ (а) и $\tilde{\alpha}_1 = 2,5, \tilde{\alpha}_2 = 0,8$ (б)

Fig. 9. Distributions of principal component σ_2 along line A in specimens Z5 and Z6 for SIF $\alpha_1 = 3.0, \alpha_2 = 1.0$ (a) and $\tilde{\alpha}_1 = 2.5; \tilde{\alpha}_2 = 0.8$ (b)

Далее оценим, для какой технологии подготовки монтажных отверстий это негативное влияние наиболее выражено. Для этого сравним величины одинаковых компонент остаточных напряжений. Соответствующие зависимости приведены на рис. 8 и 9.

При сравнении данных, полученных для болтов, установленных с натягом, считали, что предпочтительна технология, которая обеспечивает минимальные значения положительных компонент остаточных напряжений σ_2 в направлении внешней нагрузки. Причем интерес представляют точки, ближайšie к контуру монтажного отверстия: в левой такой точке для коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_1 = 3,0, \alpha_2 = 1,0$ значения $\sigma_2^{Z5-L} = +84,8$ МПа, $\sigma_2^{Z6-L} = +121,7$ МПа; в правой точке — $\sigma_2^{Z5-R} = +104,3$ МПа, $\sigma_2^{Z6-R} =$

$= +114,1$ МПа. Средние величины $\bar{\sigma}_2^{Z5} = +94,5$ МПа, $\bar{\sigma}_2^{Z6} = +117,9$ МПа; разница между ними — 20 %. Аналогичные данные получены для коэффициентов концентрации напряжений $\tilde{\alpha}_1 = 2,5, \tilde{\alpha}_2 = 0,8$: $\sigma_2^{Z5-L}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = +114,1$ МПа, $\sigma_2^{Z6-L}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = +162,7$ МПа и $\sigma_2^{Z5-R}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = +139,5$ МПа, $\sigma_2^{Z6-R}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = +152,0$ МПа; разница — 19,4 %. Таким образом, с точки зрения снижения вероятности зарождения усталостной трещины между монтажными отверстиями в горизонтальном направлении лучшие результаты демонстрирует образец Z5. Как и следовало ожидать, результаты сравнения величин компоненты σ_2 для обеих пар коэффициентов концентрации напряжений полностью совпадают.

Представленные результаты определения компонент остаточных напряжений и их сравни-

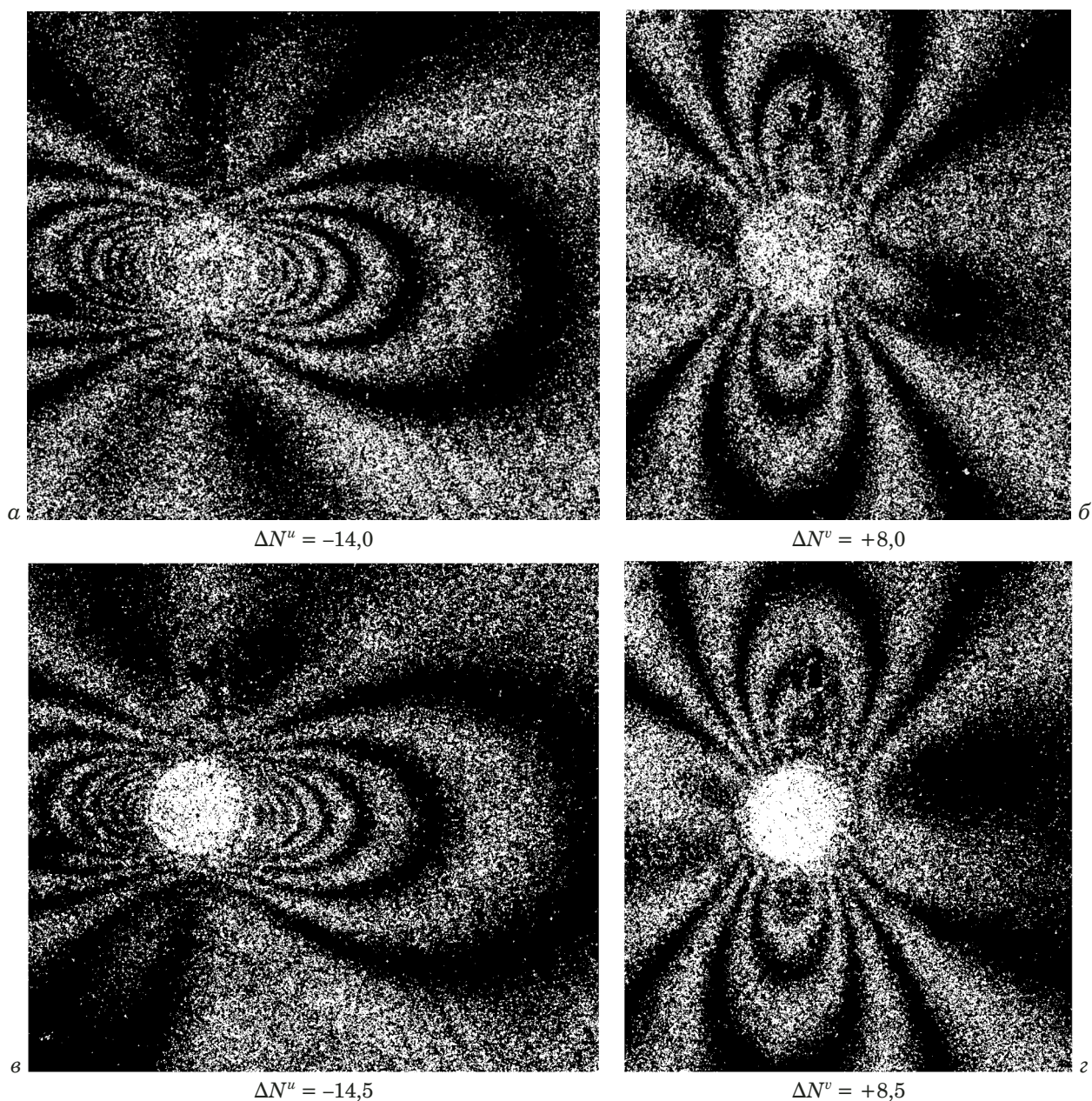


Рис. 10. Картины интерференционных полос, полученные для образца Z6 в терминах тангенциальных компонент перемещений u (а) и v (б), после сверления отверстия диаметром $2r_0 = 2,5$ мм в точке A1: а, б и в, г — несквозное и сквозное отверстия

Fig. 10. Specimen Z6. Interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (а, с) and v (б, д) as a result of hole drilling at point A1. Blind hole (а, б) and through hole (с, д) (diameter $2r_0 = 2.5$ mm)

тельного анализа получены на основе дискретного метода сверления зондирующих отверстий. По техническим причинам не все отверстия выполнены на одинаковых расстояниях от исследуемого контура монтажного отверстия, где наиболее высоки градиенты остаточных напряжений. Наличие значительных градиентов в горизонтальном направлении наглядно демонстрируется несимметричными картинками интерференционных полос, приведенных на рис. 3, а, в (слева) и рис. 4, б (слева). Поэтому для уточнения полученной информации и сделанных на ее осно-

ве выводов желательно использовать метод, который способен характеризовать непрерывное распределение компоненты остаточных напряжений σ_2 вдоль линии А. Результаты применения подобного подхода представлены ниже.

Сравнительный анализ остаточных напряжений на основе метода последовательного наращивания длины трещины

Применение метода последовательного наращивания длины трещины (ПНДТ) в зоне кон-

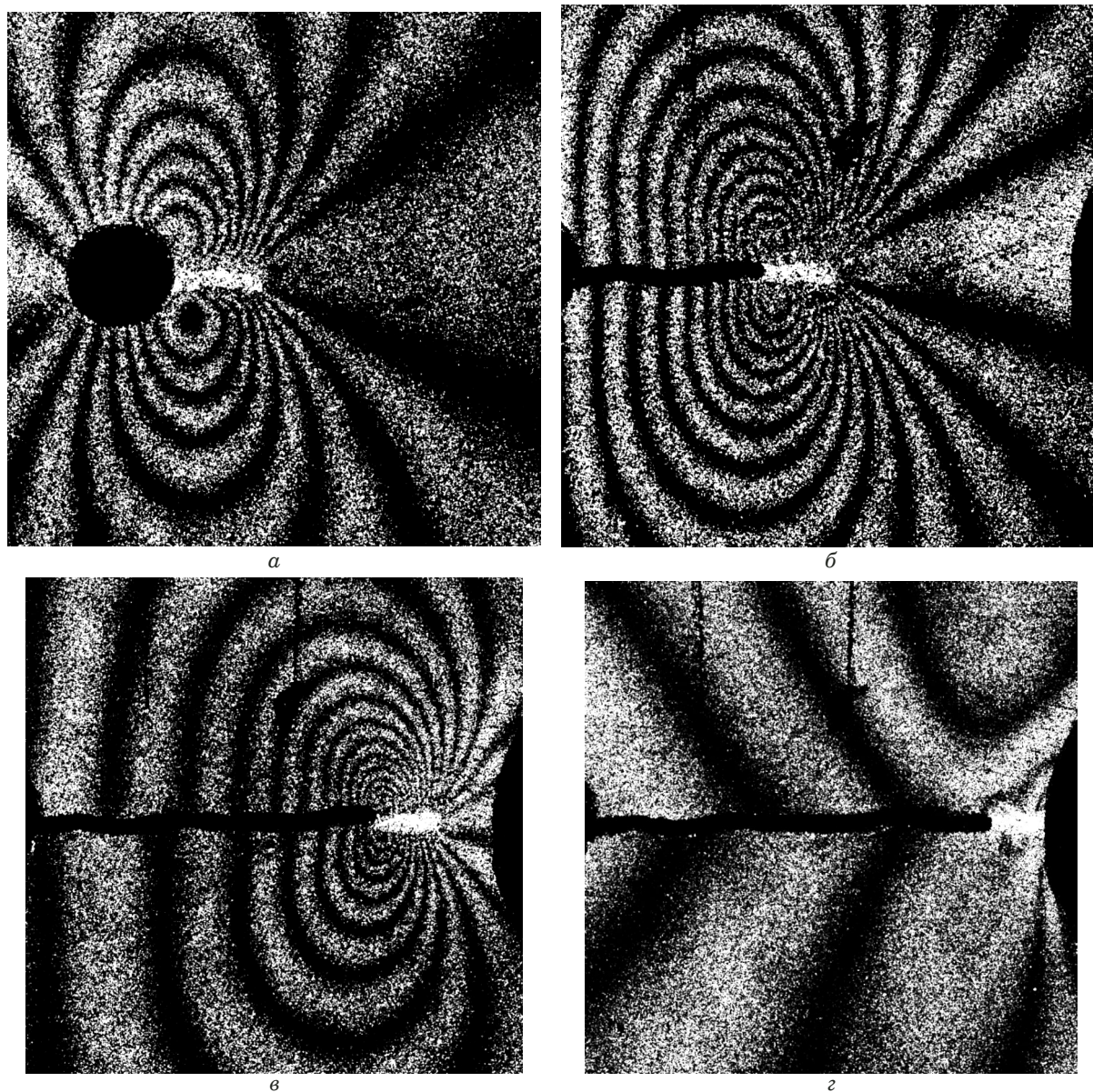


Рис. 11. Картины интерференционных полос, полученные для образца Z5 в терминах тангенциальной компоненты v , как результат нанесения узкого надреза: a — исходная длина надреза $a_0 = 0$ мм с приращением $\Delta a_1 = 2,48$ мм; $б$ — $a_2 = 2,74$ мм с $\Delta a_3 = 2,37$ мм; $в$ — $a_5 = 10,03$ мм с $\Delta a_6 = 1,96$ мм; $г$ — $a_6 = 11,99$ мм с $\Delta a_7 = 1,5$ мм

Fig. 11. Specimen Z5. Interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component v as the result of inserting a narrow notch: initial notch length $a_0 = 0$ with an increment $\Delta a_1 = 2.48$ mm (a); initial notch length $a_2 = 5.03$ mm with an increment $\Delta a_3 = 2.37$ mm ($б$); initial notch length $a_5 = 10.03$ mm with an increment $\Delta a_6 = 1.96$ mm ($в$); initial notch length $a_6 = 11.99$ mm with an increment $\Delta a_7 = 1.59$ mm ($д$)

тактного взаимодействия имеет свои особенности. Так, искусственный надрез невозможно начать от контура заполненного болтом отверстия. Поэтому в данной работе предложен новый вариант метода ПНДТ. Его сущность заключается в том, что в середине расстояния между исследуемыми монтажными отверстиями выполняется исходное зондирующее отверстие, от контура которого и начинается последовательность искусственных надрезов, как это показано на рис. 2. При этом сначала определяют компоненты остаточных напряжений. Технически сверление про-

водят в два этапа. На первом шаге выполняют сверление глухого отверстия диаметром $2r_0$ глубиной $h = 3r_0$. На втором шаге глухое отверстие рассверливают до сквозного отверстия. Главные компоненты остаточных напряжений определяют в обоих случаях. Картины интерференционных полос, полученные при реализации этой процедуры, показаны на рис. 10.

Эти интерферограммы практически совпадают как по конфигурации, так и по значениям разностей абсолютных порядков полос, как это видно из табл. 3 (см. последние строки). Разница в

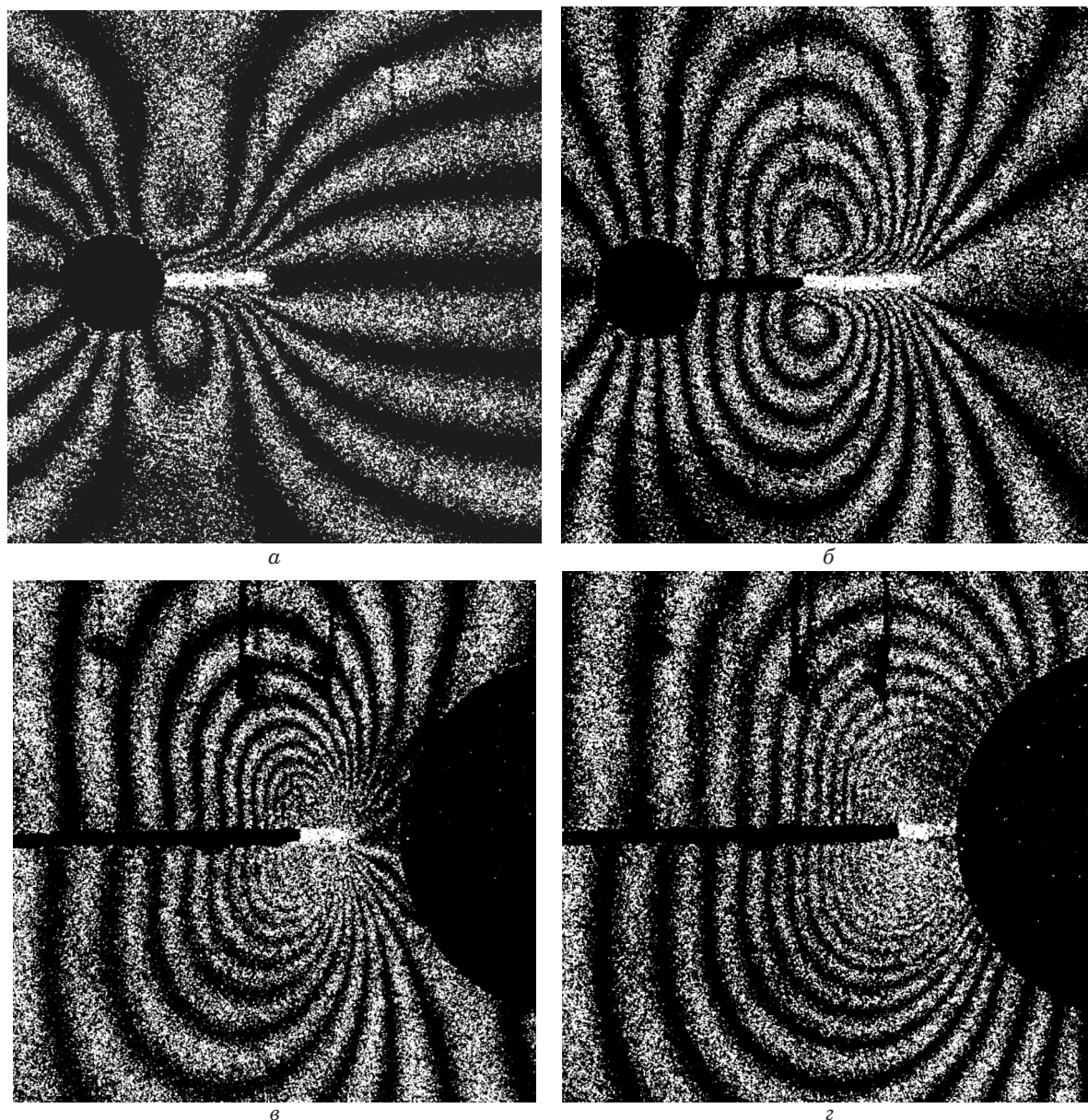


Рис. 12. Картины интерференционных полос, полученные для образца Z6 в терминах тангенциальной компоненты v , как результат нанесения узкого надреза: a — исходная длина надреза $a_0 = 0$ мм с приращением $\Delta a_1 = 2,81$ мм; b — $a_1 = 2,81$ мм с $\Delta a_2 = 3,29$ мм; c — $a_5 = 11,94$ мм с $\Delta a_6 = 1,30$; d — $a_6 = 13,24$ мм с $\Delta a_7 = 1,60$ мм

Fig. 12. Specimen Z6. Interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component v as the result of inserting a narrow notch: initial notch length $a_0 = 0$ mm with an increment $\Delta a_1 = 2.81$ mm (a); initial notch length $a_1 = 2.81$ mm with an increment $\Delta a_2 = 3.29$ mm (b); initial notch length $a_5 = 11.94$ mm with an increment $\Delta a_6 = 1.30$ mm (c); initial notch length $a_6 = 13.24$ mm with an increment $\Delta a_7 = 1.60$ mm (d)

величинах остаточных напряжений — 2,7 и 9,1 % для компонент σ_1 и σ_2 соответственно. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение того факта, что в случае глухих отверстий глубиной $h \geq 3r_0$ для упрощения вычислений, необходимых при определении главных компонент остаточных напряжений в регулярных зонах обоих образцов на основе формулы (1), можно использовать коэффициенты концентрации напряжений для сквозного отверстия $\alpha_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$. Именно такой подход и применен в статье [10] и в данной работе при использовании метода свер-

ления отверстия для сравнения величин остаточных напряжений в двух различных образцах.

Метод ПНДТ дает экспериментальную информацию в виде картин интерференционных полос, которые возникают при нанесении узкого надреза в поле остаточных напряжений. Полученные интерферограммы количественным образом описывают распределения тангенциальных компонент перемещений u и v в направлении координатных осей x и y соответственно. Такой подход подробно описан в работах [13–19]. Все искусственные надрезы выполнены юве-

Таблица 6. Значения раскрытия надреза и величины КИН в образце Z5**Table 6.** Notch opening and SIF values for specimen Z5

Определяемые параметры	Номер надреза						
	1	2	3	4	5	6	7
Δa_n , мм	2,48	2,55	1,96	1,67	1,37	1,96	1,59
a_n , мм	2,48	5,03	6,99	8,66	10,03	11,99	13,58
ΔN_{n-1}^v , полос	14,0	22,0	28,0	28,0	26,0	26,0	0
Δv_{n-1} , мкм	5,32	8,36	10,64	10,64	9,88	9,88	0
$\Delta N_{n-0,5}^v$, полос	11,5	19,5	23,0	21,0	23,0	20,0	0
$\Delta v_{n-0,5}$, мкм	4,37	7,41	8,74	7,98	8,74	7,6	0
K_I^n , МПа · м ^{1/2}	3,3	5,8	7,4	6,8	9,3	6,1	0

Таблица 7. Значения раскрытия надреза и величины КИН для надреза C1 в образце Z6**Table 7.** Notch opening and SIF values for crack C1 (specimen Z6)

Определяемые параметры	Номер надреза					
	1	2	3	4	5	6
Δa_n , мм	3,11	3,40	2,26	2,04	2,26	2,21
a_n , мм	3,11	6,51	8,77	10,81	13,07	15,28
ΔN_{n-1}^v , полос	8,0	21,5	18,5	28,5	38,5	6,5
Δv_{n-1} , мкм	3,04	8,17	7,03	10,83	14,63	2,47
$\Delta N_{n-0,5}^v$, полос	4,0	14,0	15,0	26,0	35,5	7,0
$\Delta v_{n-0,5}$, мкм	1,52	5,32	5,7	9,88	13,49	2,66
K_I^n , МПа · м ^{1/2}	0,5	2,7	4,4	8,6	11,5	2,5

Таблица 8. Значения раскрытия надреза и величины КИН для надреза C2 в образце Z6**Table 8.** Notch opening and SIF values for crack C2 (specimen Z6)

Определяемые параметры	Номер надреза						
	1	2	3	4	5	6	7
Δa_n , мм	2,81	3,29	3,29	1,37	1,18	1,30	1,60
a_n , мм	2,81	6,10	9,39	10,76	11,94	13,24	14,84
ΔN_{n-1}^v , полос	7,0	16,5	29,0	27,5	27,0	35,0	5,0
Δv_{n-1} , мкм	2,66	6,27	11,02	10,45	10,26	13,3	1,9
$\Delta N_{n-0,5}^v$, полос	3,0	11,0	22,5	21,5	21,0	29,0	2,5
$\Delta v_{n-0,5}$, мкм	1,14	4,18	8,55	8,17	7,98	11,02	0,95
K_I^n , МПа · м ^{1/2}	0,2	2,2	5,3	7,9	8,3	11,5	0,5

лирным лобзиком шириной $\Delta b = 0,24$ мм в направлении оси x (см. рис. 2). Отметим, что такой узкой пилкой разделяют берега надреза в плите толщиной 10 мм. Типичные картины интерференционных полос, полученные для образца Z5, показаны на рис. 11. Направление пульсирующей нагрузки при усталостных испытаниях совпадает с координатной осью y , перпендикулярной линии надреза.

Типичные картины интерференционных полос, полученные при нанесении надреза C1 в образце Z6, показаны на рис. 12.

Результаты обработки картин интерференционных полос, полученных при последовательном увеличении длины надреза, в терминах раскрытия трещины и величин коэффициентов интенсивности напряжений приведены в табл. 6 для образца Z5. В образце Z6 в целях повышения надежности измерений выполнено два последовательных надреза — C1 и C2. Соответствующие данные представлены в табл. 7 и 8.

Распределения КИН по длине надрезов, полученные для образца Z5 и образца Z6 (см. табл. 6 – 8), представлены на рис. 13. Отметим, что величины КИН относятся к крайней точке

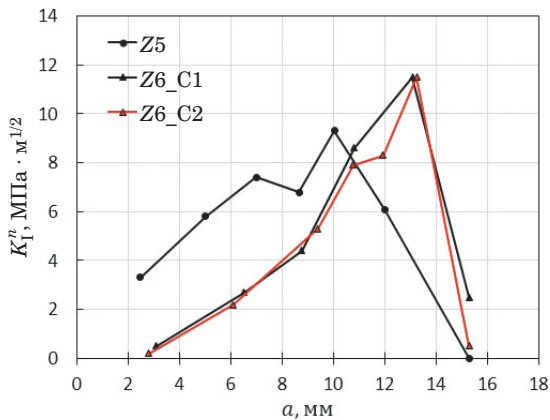


Рис. 13. Зависимость величин КИН (K_I^n) от длины надреза

Fig. 13. SIF values (K_I^n) vs. notch length

каждого надреза, но отражают влияния распределения остаточных напряжений по всей длине надреза. Естественно, следует ожидать, что больший вклад вносит компонента σ_2 , направление которой совпадает с линией действия нагрузки. Начальной точкой каждой зависимости является контур исходного зондирующего отверстия. Крайние правые точки на всех графиках соответствуют контуру заполненного монтажного отверстия. В первую очередь необходимо отметить хорошее совпадение величин КИН, полученных для двух последовательных надрезов в образце Z6.

Основным критерием сравнения данных, полученных для болтов, установленных с натягом в отверстия, подготовленные двумя способами, служит предпочтительность той технологии, которая после усталостных испытаний обеспечивает минимальные значения положительных компонент остаточных напряжений σ_2 в направлении внешней нагрузки. С этой точки зрения лучшие результаты демонстрирует образец Z5. В окрестности заполненного отверстия положительные значения КИН для образца Z5 меньше аналогичных величин, полученных для образца Z6. Данный факт означает снижение вероятности зарождения усталостной трещины в наиболее опасном (горизонтальном) направлении между монтажными отверстиями, заполненными болтами.

Анализ результатов

Для двух образцов при сверлении зондирующих отверстий в поле остаточных напряжений получен обширный набор картин интерференционных полос очень высокого качества. По результатам обработки интерферограмм установлено, что в обоих образцах сохраняется одинаковый тип поля остаточных напряжений в горизонталь-

ном направлении между заполненными отверстиями. А именно, выявлены отрицательные значения главной компоненты σ_1 и положительные величины главной компоненты σ_2 , которые направлены соответственно перпендикулярно и вдоль линии приложения внешней нагрузки. Их предельные значения составили: $\sigma_1^{Z5} = -105,6$ МПа, $\sigma_2^{Z5} = +83,3$ МПа ($\Delta x = 6,7$ мм); $\sigma_1^{Z5} = -54,1$ МПа, $\sigma_2^{Z5} = +104,3$ МПа ($\Delta x = 1,1$ мм) — для образца Z5; $\sigma_1^{Z6} = -68,8$ МПа, $\sigma_2^{Z6} = +121,7$ МПа ($\Delta x = 1,9$ мм) — для образца Z6; Δx — расстояние от центра зондирующего отверстия до контура ближайшего заполненного монтажного отверстия. Таким образом, выявлены два факта, на которые необходимо обратить внимание. Во-первых, предельные величины главных компонент остаточных напряжений достаточно близки для обоих образцов. Это может означать, что установка болтов с натягом от 1,3 до 2,1 % в упрочненные отверстия снижает величины сжимающих напряжений, вызванные холодным упрочнением отверстия. Это обстоятельство вызывает вопросы о целесообразности использования натяга при монтаже панелей с упрочненными отверстиями. Во-вторых, имеет место весьма неожиданная трансформация исходного поля монтажных напряжений в образце Z6. Дело в том, что исходное поле действующих напряжений в окрестности болта, установленного с натягом в неупрочненное отверстие, должно характеризоваться положительными компонентами напряжений с радиальной симметрией. После усталостных испытаний наблюдается наличие отрицательных остаточных напряжений σ_1 в горизонтальном направлении.

В качестве критерия предпочтительности для технологии установки крепежных болтов в монтажные отверстия рассматривается величина растягивающих остаточных напряжений в точках, наиболее близких к контуру заполненного отверстия. Наибольший интерес представляют различия в величинах компоненты остаточных напряжений σ_2 в окрестности монтажного отверстия, которая больше всего изменяется под действием внешней нагрузки, так как совпадает с направлением этой нагрузки. В окрестности упрочненного отверстия для всех рассмотренных случаев сохраняются меньшие по величине значения растягивающей компоненты остаточных напряжений σ_2 , чем возле неупрочненного отверстия. Этот факт означает снижение вероятности появления наиболее опасной усталостной трещины в горизонтальном направлении между заполненными отверстиями, причем большее снижение для образца Z5, чем для образца Z6. Количе-

ственная характеристика данного сравнения имеет вид:

$$\frac{\tilde{\sigma}_2^{Z6} - \tilde{\sigma}_2^{Z5}}{\tilde{\sigma}_2^{Z5}} = \frac{117,9 - 94,5}{117,9} = 0,20.$$

Все представленные результаты определения компонент остаточных напряжений получены на основе дискретного метода сверления зондирующих отверстий. Естественно, что по техническим причинам не все отверстия выполнены на одинаковых расстояниях от исследуемого контура монтажного отверстия, где наиболее высоки градиенты остаточных напряжений. Поэтому для уточнения полученной информации и сделанных на ее основе выводов применяется подход, который способен характеризовать непрерывное распределение компоненты остаточных напряжений σ_2 вдоль горизонтальной линии А. А именно, предложен и реализован новый вариант метода последовательного наращивания длины трещины. Его сущность заключается в том, что в середине расстояния между исследуемыми монтажными отверстиями, которые заполнены болтами, выполняется исходное зондирующее отверстие, от контура которого и начинается последовательность искусственных надрезов. На этой основе построены зависимости величин КИН от длины искусственного надреза в зоне контактного взаимодействия. Установлено, что положительные значения КИН в окрестности заполненного отверстия меньше для образца Z5, чем для образца Z6. Этот факт означает снижение вероятности появления наиболее опасной усталостной трещины на контуре монтажного отверстия в горизонтальном направлении для образца Z5 по сравнению с образцом Z6. Ранее такой же вывод был сделан на основе сравнения положительных значений компоненты σ_2 вдоль горизонтальной линии между заполненными отверстиями.

Распределения КИН, впервые полученные при нанесении искусственного надреза в зоне контактного взаимодействия, являются исходной экспериментальной информацией для количественного определения величин остаточных напряжений. Это можно сделать, например, с помощью подхода, представленного в работе [20].

Выводы

Проведены испытания по сопротивлению усталости двух геометрически одинаковых конструктивно подобных моделей нижней панели крыла коммерческого самолета. Панели отличаются способом установки монтажных болтов, соединяющих обшивку и стрингер. Обе панели обеспечили достижение заданного ресурса, не выявив преимущества одной из технологий. По-

этому было проведено двухэтапное сравнение обеих технологий на основе исследования полей остаточных напряжений. Этап, представленный в данной статье, включает анализ величин компонент остаточных напряжений в окрестности монтажных отверстий в обшивке, которые заполнены болтами с натягом. Для определения компонент остаточных напряжений использованы два подхода, заключающиеся в измерении деформационного отклика на локальное удаление материала методом спекл-интерферометрии. Первый — дискретный метод, основанный на сверлении зондирующего отверстия, обеспечивает количественное определение компонент остаточных напряжений, начиная с расстояния 1,0 мм от контура заполненного отверстия. Второй — непрерывный метод основан на последовательном наращивании длины искусственного надреза. В данной работе предложен и реализован новый вариант метода ПНДТ. Его сущность заключается в том, что в середине расстояния между соседними монтажными отверстиями, которые заполнены болтами, выполняется исходное зондирующее отверстие. От контура этого отверстия и начинается последовательность искусственных надрезов. На этой основе построены зависимости величин КИН от длины искусственного надреза, которые дают возможность сравнения величин компоненты остаточных напряжений σ_2 , относящихся к двум технологиям установки болтов. В качестве критерия предпочтительности технологии установки крепежных болтов в монтажные отверстия рассматривается величина растягивающих остаточных напряжений в точках, наиболее близких к контуру монтажного отверстия. Чем ниже значение положительной компоненты остаточных напряжений σ_2 , которая больше всего релаксирует под действием внешней нагрузки, так как совпадает с направлением этой нагрузки, тем лучше технология установки болтов с точки зрения усталостной прочности. Оба экспериментальных подхода выявляют преимущества соединения с болтами, установленными в упрочненное отверстие.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность и надежность методов определения остаточных напряжений, использующих оптико-интерференционные измерения деформационного отклика на локальное удаление материала. Эти свойства основаны на получении интерферограмм высокого качества, которые обеспечивают разрешение интерференционных полос предельной плотности непосредственно на контуре зондирующего отверстия или на берегах искусственного надреза. Представленный в работе набор методов определения полей остаточных напряжений в элементах панели крыла самолета и полученные на этой основе ре-

зультаты представляют собой базис комплексных исследований, которые необходимо проводить для повышения ресурса болтовых соединений с одновременной оптимизацией весовых характеристик конструкции. Первым шагом, дополняющим этот комплекс, является определение исходных полей остаточных и монтажных напряжений в окрестности болтовых соединений и их эволюции на различных этапах циклического нагружения с использованием модельных образцов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00117)

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярковец А. И., Сироткин О. С., Фирсов В. А., Киселев Н. М. Технология выполнения высокоресурсных соединений в конструкциях самолетов. — М.: Машиностроение, 1987. — 192 с.
2. Белов В. К., Калюта А. А., Рудзей Г. Ф. Обеспечение усталостной долговечности авиационных конструкций технологическими методами. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. — 404 с.
3. Furukawa A., Kamiya K., Hagiwara M. Effect of the Residual Stress on the Fatigue Strength of a Bolt in Bolt/Nut Assemblies (Verification of the hypotheses using an axis-symmetric bolt model) / Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2012. Vol. 6. N 1. P. 189 – 197.
4. Yunbo Bi, Jiefeng Jiang, Yinglin Ke. Effect of interference fit size on local stress in single lap bolted joints / Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7. N 6. P. 1 – 12. DOI: 10.1177/1687814015590307
5. Keith W. J., Ralph W. B. Investigation of residual stress relaxation in cold expanded holes by the slitting method / Engineering Fracture Mechanics. 2017. Vol. 179. P. 213 – 224. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.004
6. Unglaub J., Jahns H., Thiele K. Finite element analysis of residual stresses in large cold-rolled threads. XV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications. COMPLAS 2019 E. Oñate, D. R. J. Owen, D. Peric, M. Chiumenti & Eduardo de Souza Neto (eds.).
7. Schajer G. S., To L. Simulation of Infinite Boundaries When Evaluating Hole-Drilling Calibration Data / Experimental Mechanics. 2022. Vol. 62. N 8. P. 1247 – 1255. DOI: 10.1007/s11340-022-00834-w
8. Welch M. Fatigue Analysis of Preloaded Bolted Joints / FME Transactions. 2022. Vol. 50. N 4. P. 607 – 614. DOI: 10.5937/fme2204607W
9. Welch M. An Analytical Study of Asymmetrical Preloaded Bolted Joints / International Journal of Modern Research in Engineering and Technology. 2022. Vol. 7. N 3. P. 6 – 11.
10. Елеонский С. И., Зайцев М. Д., Матвиенко Ю. Г., Писарев В. С. Поля остаточных напряжений в панели крыла самолета по данным измерения деформационного отклика на локальное удаление материала. 1. Свободные монтажные отверстия / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 11. С. 71 – 88.
11. Shchepinov V. P., Pisarev V. S., Novikov S. A., et al. Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry. — Chichester: John Wiley, 1996. — 483 p.
12. 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. P. 437 – 456. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.022
13. Pisarev V. S., Matvienko Yu. G., Eleonsky S. I., Odintsev I. N. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses / Engineering Fracture Mechanics. 2017. Vol. 179. P. 348 – 374. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.029
14. Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I. The effect of low-cycle fatigue on evolution of fracture mechanics parameters in residual stress field caused by cold hole expansion / Frattura ed Integrità Strutturale. 2019. Vol. 47. P. 303 – 320. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.47.23
15. Matvienko Yu., Pisarev V., Eleonsky S. Investigation of fatigue damage accumulation by measurements of deformation response to narrow notch increment / Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. P. 584 – 590.
16. Елеонский С. И., Матвиенко Ю. Г., Писарев В. С., Чернов А. В. Эволюция параметров механики разрушения при малоциклового усталости по данным моделирования трещины узкими надрезами в окрестности отверстия / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 9. С. 52 – 62. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-9-52-62
17. Елеонский С. И., Матвиенко Ю. Г., Писарев В. С., Чернов А. В. Исследование накопления повреждений при малоциклового усталости по данным измерений локального деформационного отклика / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 10. С. 46 – 55. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-46-55
18. Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I. Evolution of fracture mechanics parameters relevant to narrow notch increment as a measure of fatigue damage accumulation / International Journal of Fatigue. 2021. 149. 106310. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106310
19. Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I. Low-cycle fatigue damage accumulation near the cold-expanded hole by crack compliance data / International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 155. 106590. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106590
20. Усов С. М., Разумовский И. А., Одинцов И. Н. Исследование неоднородных полей остаточных напряжений способом наращиваемой трещины в сочетании с методом ЭСИ / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 86. № 10. С. 50 – 58. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58

REFERENCES

1. Yarkovets A. I., Sirotkin O. S., Firsov V. A., Kiselev N. M. Manufacturing technology for high fatigue life rivet and bolt joints in aircraft structures. — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 192 p. [in Russian].
2. Belov V. K., Kaliuta A. A., Rudzey G. F. The provision of fatigue durability of aircraft structures by technology means. — Novosibirsk: Izd. NGTU, 2012. — 404 p. [in Russian].
3. Furukawa A., Kamiya K., Hagiwara M. Effect of the Residual Stress on the Fatigue Strength of a Bolt in Bolt/Nut Assemblies (Verification of the hypotheses using an axis-symmetric bolt model) / Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2012. Vol. 6. N 1. P. 189 – 197.
4. Yunbo Bi, Jiefeng Jiang, Yinglin Ke. Effect of interference fit size on local stress in single lap bolted joints / Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7. N 6. P. 1 – 12. DOI: 10.1177/1687814015590307
5. Keith W. J., Ralph W. B. Investigation of residual stress relaxation in cold expanded holes by the slitting method / Engineering Fracture Mechanics. 2017. Vol. 179. P. 213 – 224. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.004
6. Unglaub J., Jahns H., Thiele K. Finite element analysis of residual stresses in large cold-rolled threads. XV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and

- Applications. COMPLAS 2019 E. Oñate, D. R. J. Owen, D. Peric, M. Chiumenti & Eduardo de Souza Neto (eds.).
7. **Schajer G. S., To L.** Simulation of Infinite Boundaries When Evaluating Hole-Drilling Calibration Data / *Experimental Mechanics*. 2022. Vol. 62. N 8. P. 1247 – 1255. DOI: 10.1007/s11340-022-00834-w
 8. **Welch M.** Fatigue Analysis of Preloaded Bolted Joints / *FME Transactions*. 2022. Vol. 50. N 4. P. 607 – 614. DOI: 10.5937/fme2204607W
 9. **Welch M.** An Analytical Study of Asymmetrical Preloaded Bolted Joints / *International Journal of Modern Research in Engineering and Technology*. 2022. Vol. 7. N 3. P. 6 – 11.
 10. **Eleonsky S. I., Zajtsev M. D., Matvienko Yu. G., Pisarev V. S.** Residual stress fields in aircraft wing panel proceeding from measurement of deformation response to local material removing. 2. Filled assemblage holes / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 11. P. 77 – 88 [in Russian].
 11. **Shchepinov V. P., Pisarev V. S., Novikov S. A., et al.** Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry. — Chichester: John Wiley, 1996. — 483 p.
 12. **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. P. 437 – 456. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.022
 13. **Pisarev V. S., Matvienko Yu. G., Eleonsky S. I., Odintsev I. N.** Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses / *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. Vol. 179. P. 348 – 374. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.029
 14. **Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I.** The effect of low-cycle fatigue on evolution of fracture mechanics parameters in residual stress field caused by cold hole expansion / *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. Vol. 47. P. 303 – 320. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.47.23
 15. **Matvienko Yu., Pisarev V., Eleonsky S.** Investigation of fatigue damage accumulation by measurements of deformation response to narrow notch increment / *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 584 – 590.
 16. **Eleonsky S. I., Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Chernov A. V.** Evolution of the fracture mechanics parameters in the vicinity of the hole in conditions of low-cycle fatigue according to the data of modeling a crack with narrow notches / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2020. Vol. 86. N 9. P. 52 – 62 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-9-52-62
 17. **Eleonsky S. I., Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Chernov A. V.** Damage accumulation near a hole under low cycle fatigue proceeding from measurements of local deformation response / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2020. Vol. 86. N 10. P. 46 – 55 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-46-5518
 18. **Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I.** Evolution of fracture mechanics parameters relevant to narrow notch increment as a measure of fatigue damage accumulation / *International Journal of Fatigue*. 2021. 149. 106310. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106310
 19. **Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I.** Low-cycle fatigue damage accumulation near the cold-expanded hole by crack compliance data / *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 155. 106590. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106590
 20. **Usov S. M., Razumovsky I. A., Odintsev I. N.** Study of Residual Stress Fields Using Indicating Fracture and the Method of Electron Speckle Interferometry / *Inorganic Materials*. 2022. Vol. 58. N 15. P. 71 – 77. DOI: 10.1134/S0020168522150146