



УДК 621.19.16

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ДИСКОВ РОТОРОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Л. М. ЛОБАНОВ, Ю. В. БУТЕНКО, А. В. ГОРЯЧЕК, В. И. СЕРБИН, Л. Е. ТИЩЕНКО,
В. А. ФРИДМАН, В. А. ПИВТОРАК, А. А. КАЙДАЛОВ, В. В. САВИЦКИЙ, Г. И. ТКАЧУК

Исследовано напряженное состояние сварных дисков роторов газотурбинного двигателя с использованием метода электронной спекл-интерферометрии. Проведены исследования механических свойств, а также металлографические исследования и разгонные испытания сварного диска ротора.

Stressed state of welded discs of GTE rotors has been studied using the method of electron speckle-interferometry. Investigations of mechanical properties, as well as metallographic examination and overspeed testing of the rotor welded disc have been conducted.

В современных отраслях турбостроения по-прежнему актуальны разработка и создание высоконадежных и работоспособных деталей, узлов и систем газотурбинных двигателей. Одной из ответственных деталей таких двигателей является сварной диск ротора, который работает в условиях высоких нагрузок и температур, вызывающих ползучесть материала диска, а также неравномерное по радиусу и непостоянное во времени распределение температур. Это обуславливает наложение часто периодически изменяющихся во времени температурных напряжений. В процессе работы диска изменяются, как правило, его механические свойства и напряженное состояние.

Для проведения комплексных исследований, включающих определение полей остаточных напряжений, исследование механических свойств, металлографические исследования и разгонные испытания, было изготовлено три сварных диска (Д-1, Д-2, Д-3) из хромоникелевой стали мартенситного типа 07X12НМБФ-Ш (ЭП-609Ш), которую применяют в турбостроении. Каждый диск состоял из двух деталей: ступицы А и обода Б (рис. 1).

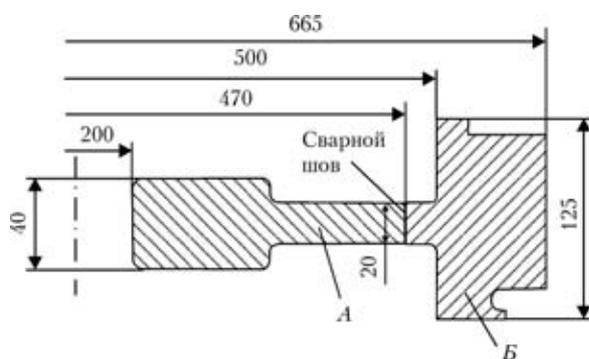


Рис. 1. Геометрические размеры диска и расположение сварного шва

Диски сваривали с помощью электронного пучка на сварочной установке с энергоблоком ЭЛА-30 (ускоряющее напряжение 60 кВ) [1] и системой развертки электронного пучка СУ-165. Перед сваркой провели термообработку деталей диска на следующих режимах: закалка — 1030 °С в течение 1,5 ч, охлаждение в масле; отпуск — 630 °С в течение 2,5 ч, охлаждение на воздухе.

Сборку ступицы и обода выполняли с натягом 0,03...0,07 мм, после чего наносили прихватки аргонодуговой сваркой со стороны корня будущего шва. Размагничивание дисков перед сваркой осуществляли с помощью устройства ПМ-1, разработанного ГП НПКГ «Заря»-«Машпроект» (г. Николаев). Остаточная намагниченность не превышала 0,5 Э. Толщина металла в месте сварки составляла 20 мм. Электронно-лучевую сварку выполняли в режиме: скорость сварки 10 м/ч, сила тока электронного пучка 140 мА, круговая развертка электронного пучка с частотой 420 Гц и диаметром 0,7 мм. Затем провели косметический проход расфокусированным электронным пучком пониженной мощности.

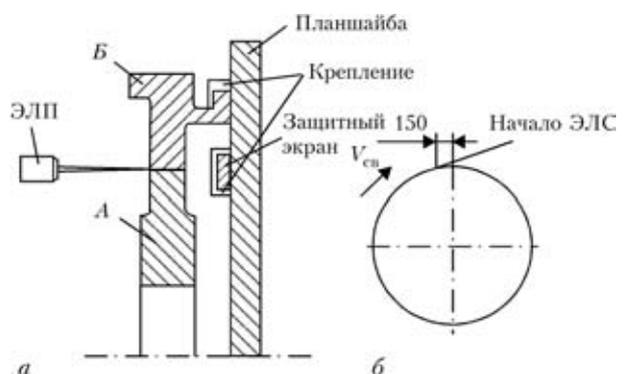


Рис. 2. Схема крепления диска в камере (а) и сварки (б): ЭЛП — электронная пушка; $V_{св}$ — скорость сварки

© Л. М. Лобанов, Ю. В. Бутенко, А. В. Горячек, В. И. Сербин, Л. Е. Тищенко, В. А. Фридман, В. А. Пивторак, А. А. Кайдалов, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук, 2007

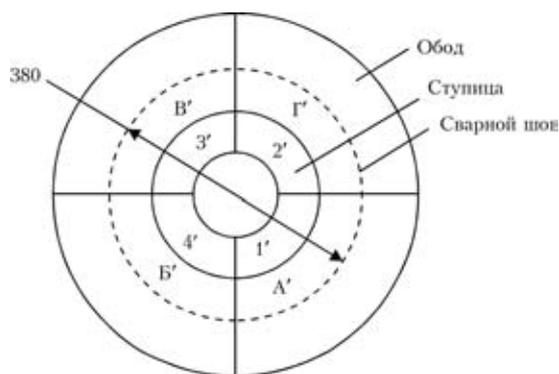


Рис. 3. Схема разрезки сварного диска для последующих исследований

При сварке оси планшайбы вращателя и свариваемого диска располагали в вертикальном положении. Ось электронной пушки находилась в горизонтальном положении и пушка оставалась неподвижной (рис. 2).

После электронно-лучевой сварки для снятия остаточных напряжений диски отжигали на режиме: нагрев до 620 °С и выдержка при данной температуре в течение 2,5 ч с последующим охлаждением на воздухе.

После механической обработки полотна диска в месте сварного стыка до толщины 10 мм с плавным переходом на детали ступицы и обода сварные диски прошли контроль качества с помощью рентгенографии и цветной дефектоскопии. Контроль сварных швов цветной дефектоскопией, выполненный с двух сторон полотна вдоль шва, не выявил дефектов в дисках. Результаты рентгенографического контроля, выполненного аппаратом Isovolt 3002 с использованием пленки марки А-400, показали следующее: в диске Д-1 сварной шов не имеет дефектов; в Д-2 по всей длине сварного шва имеются продольные трещины длиной 8...15 мм с промежутками 40...100 мм; диск Д-3 в сварном шве дефектов не имеет.

Анализ показал, что наличие продольных трещин в диске Д-2 вызвано неточным попаданием электронного пучка в стык (сварочная аппаратура не имеет системы слежения за стыком). Смещение электронного пучка на одну из кромок стыка полотна ослабляет прочность сварного шва, на который действуют остаточные напряжения.

Для устранения выявленных дефектов в диске Д-2 выполняли ремонтную сварку. После рентгенконтроля все же были выявлены дефекты: продольная трещина длиной 6 мм и несколько пор размерами 1,5...2 мм, которые находились в разных местах вдоль сварного шва. Устранение в сварном шве продольной трещины выполняли путем ее высверливания и последующей заварки.

Механические и металлографические исследования выполняли на сварном диске Д-1, который разрезали по диаметру 380 мм на две части (отделяли ободную часть от ступицы). Обод и ступицу

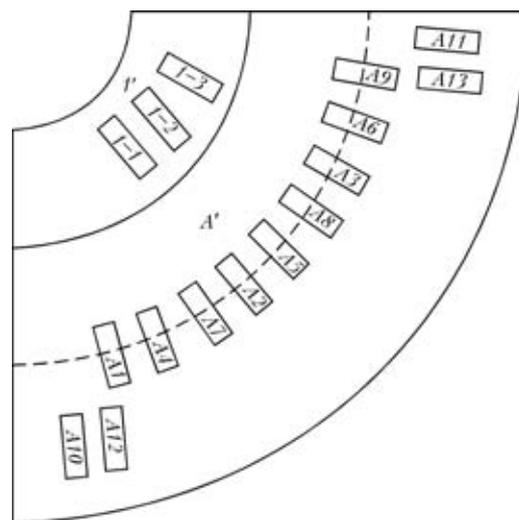


Рис. 4. Схема расположения темплетов на участках А' и I': образцы на растяжение: А1–А3, А10, А11, I–I; образцы на ударный изгиб: А4–А6, А12, А13, I–2, I–3; образцы для макро- и микроисследований: А7–А9

лицу разрезали на четыре равные части в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

Исследование механических свойств металла диска проводили на образцах, вырезанных согласно схемы, приведенной на рис. 4. Исследовали две части ступицы I' и 3' и обода А' и В'. Образцы для определения предела прочности материала изготавливали в соответствии с ГОСТ 1497–84, а для испытаний на ударную вязкость материала — в соответствии с ГОСТ 5494–78.

Проведенные исследования показали, что разрушение сварных образцов, испытанных на растяжение, произошло по основному материалу на расстоянии 5,5 мм от сварного шва. Полученные значения σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ и ψ соответствуют данным механических свойств образцов, вырезанных из основного материала обода и ступицы.

Анализ результатов испытания образцов на ударную вязкость показал, что ударная вязкость сварных образцов ниже ударной вязкости образцов, вырезанных из основного материала обода и ступицы (табл. 1).

Исследования твердости показали, что твердость сварного шва ($HB\ 302...321$) выше таковой основного материала диска ($HB\ 277...285$), однако оба показателя находятся в пределах допустимого интервала твердости и соответствуют нормам для материала ЭП-609Ш.

Результаты количественного спектрального анализа металла обода и ступицы соответствуют составу стали ЭП-609Ш (табл. 2).

Проведенные микро- и макроисследования литой зоны шва и зоны термического влияния на наличие трещин показали, что в исследованных зонах трещины отсутствуют. Однако в корне косметического прохода на макрошлифах попереч-



Таблица 1. Результаты испытаний образцов на растяжение и ударный изгиб при комнатной температуре

Место вырезки	Темплет	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU, кгс-м/см ²	$d_{отп}/HB$	
							Основной материал	Сварной шов
Зона сварного шва	A'	93	82	14	61	4,0	—	3,45/311
		93	83,5	12	61	13,8		
		93,5	83	12	62	5		
	B'	94	85	12	64	5,0	—	3,4/321
		93	86	14	64	6,3		
		94	85	12	61,5	3,8		
Основной металл обода	A'	94,5	85	16	64	10,3	—	—
		93	84	16	61,5	9,0		
	B'	94	84,5	12	61,5	6,3	3,65/277	—
		94	83	14	63	7,3		
Основной металл ступицы	I'	98,5	88	20	66,5	13,1	3,6/285	—
						14,0		
	3'	97	87,5	18	67,0	10,0	3,6/285	—
						12,5		
Требования нормативной документации		77	69	6	34	4,5	3,3...3,8	—

Примечание. Направление вырезки образцов радиальное (поперечное для диска)

Таблица 2. Химический состав металла исследуемого диска, мас. %

Область контроля	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	S	P
Обод	0,07	0,43	0,27	10,89	1,57	0,37	0,07	0,18	0,006	0,02
Ступица	0,08	0,42	0,27	10,93	1,59	0,37	0,07	0,18	0,005	0,02
ЭП-609 (стандарт)	0,05	—	—	10,50	1,4	0,35	0,05	0,15	—	—
И255.105.092-87	0,09	0,60	0,60	12,00	—	0,50	0,15	0,25	0,02	0,03

ного сечения сварного шва темплетов A' и B' выявлены участки несплавлений.

Разгонные испытания проводили на диске Д-3, который был собран в ротор (состыкован с цапфой и насажен на вал), сбалансирован, обмерен (измерен наружный диаметр диска) и смонтирован в разгонной камере на стенде ВРД-500. Цель разгонных испытаний — определение несущей способности диска по месту кольцевого сварного соединения. В связи с этим диск для испытаний имел в месте сварки утонение для локализации разрушения по заданному сечению. Испытания проводили в несколько этапов по следующей программе: а) запуск установки; б) плавное повышение частоты вращения; в) выдержка не менее трех минут на максимальной частоте вращения; г) остановка и охлаждение диска до температуры окружающей среды. После завершения каждого этапа и охлаждения диска до температуры окружающей среды выполняли измерение наружного диаметра диска в шести его сечениях. При выполнении измерений диск находился в разгонной камере. Усредненные результаты измерений диаметра диска в зависимости от частоты его вращения приведены ниже:

Частота вращения, об/мин	0	12000	12500	13000	13500
Наружный диаметр диска, мм	629,94	630,09	630,13	630,13	630,21

Расчет несущей способности диска на частоте вращения 15000 об/мин (с учетом действительной геометрии диска) проводили по методике, описанной в работе [2]. Разрушение диска произошло на частоте вращения 14650 об/мин, при этом коэффициент снижения запаса k по разрушающей частоте вращения по сравнению с расчетной оценкой (0,95) составил $k = 0,99$. Из рис. 5 видно, что обод диска разрушился на несколько частей. Начало разрушения — область проточки в месте расположения сварного шва, которая является самой напряженной частью диска.

На протяжении более чем 4/5 периметра круговой проточки разрушение развивалось в плоскости максимальных растягивающих напряжений под углом примерно 45° с началом со стороны полотна. Дефекты в исходном материале и сварном шве по данным анализа изломов не выявлены.

Анализ результатов макро- и микроисследований области разрушения показали, что разрушение начинается в зоне термического влияния основного

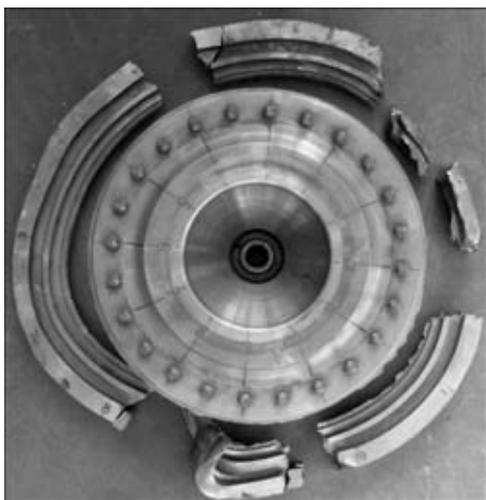


Рис. 5. Разрушенный диск

материала полотна диска и заканчивается в центре сварного шва с другой стороны диска.

Исследование остаточных напряжений выполняли на сварном диске Д-2. Следует отметить, что для определения остаточных напряжений в деталях и узлах конструкций применяют различные методы [3–7]. Среди методов экспериментального определения остаточных напряжений в конструкциях большое распространение получил метод зондирующего отверстия [4], заключающийся в следующем: в исследуемой точке на поверхности объекта высверливают сквозное или несквозное отверстие и измеряют деформации, вызванные упругой разгрузкой объема материала при освобождении остаточных напряжений в нескольких направлениях. Измеряют величины деформаций с помощью наклеенных в окрестности отверстия специальных розеток тензорезисторов. По величине этих деформаций с помощью различных расчетных или аналитических моделей могут быть определены главные направления и соответствующие величины остаточных напряжений.

В последние годы для определения перемещений и деформаций интенсивно развивают новый бесконтактный метод лазерной интерферометрии — электронную спекл-интерферометрию [8–10], которая практически нечувствительна к точному размещению высверливаемого отверстия и к его размерам. Отверстие, используемое для упругой разгрузки остаточных напряжений, можно выполнить в любой точке участка, освещенного лазерным светом. При этом отраженные световые волны до и после выполнения отверстия с помощью CCD-камеры записывают в память компьютера и обрабатывают для получения величин остаточных напряжений.

Спекл-интерферометрический метод определения остаточных напряжений основан на использовании оптической схемы интерферометра (рис. 6, а). При этом исследуемый участок объекта освещают двумя симметричными лучами под уг-

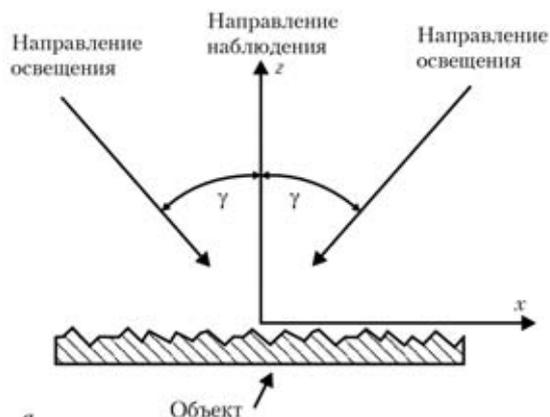


Рис. 6. Спекл-интерферометрическая измерительная система: а — оптическая схема спекл-интерферометра; б — общий вид спекл-интерферометрической измерительной системы

лом γ . Это позволяет определять плоскостные компоненты вектора перемещений, которые характеризуют деформацию объекта в его плоскости.

Для определения остаточных напряжений в элементах и узлах конструкций на основе этой оптической схемы в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины были разработаны методика определения остаточных напряжений и малогабаритный прибор, который устанавливают непосредственно на поверхность исследуемого объекта (рис. 6, б). В состав прибора входят спекл-интерферометр 1, CCD-камера 2, световод 3, лазер 4 и компьютер 5. Измерение выполняют в следующей последовательности: прибор устанавливают на поверхности объекта. Отраженную световую волну, характеризующую исходное состояние контролируемого участка, с помощью CCD-камеры вводят в память компьютера. После упругой разгрузки напряжений путем сверления несквозного отверстия диаметром и глубиной $\sim 1 \dots 2$ мм отраженную световую волну вводят в память компьютера аналогично исходной световой волне. После компьютерной обработки этих двух световых волн на мониторе наблюдают интерференционную картину полос в окрестности отверстия, которая содержит информацию о величине остаточных напряжений в контролируемой точке исследуемого участка объекта (рис. 7) [15].

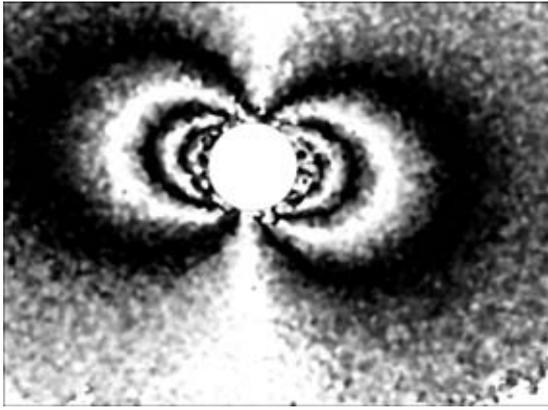


Рис. 7. Типичная интерференционная картина окрестности несквозного отверстия в поле остаточных напряжений

Для пластины со сквозным отверстием, которая находится в поле растягивающих напряжений, величины перемещений в окрестности отверстия могут быть вычислены аналитически с использованием зависимостей, полученных в работах [6, 7]. Аналогичная задача для пластины с несквозным отверстием не имеет аналитического решения, и поэтому в этом случае используются эмпирические формулы, приведенные в работах [11, 12].

Зависимость перемещений u_r и u_θ , возникающих в результате разгрузки напряжений σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} на некотором расстоянии r от центра отверстия, от угла θ (угол между радиус-вектором измеряемой точки и осью OX) имеет вид [13]:

$$u_r(r, \theta) = \bar{A}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \bar{B}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} \sin 2\theta], \quad (1)$$

$$u_\theta(r, \theta) = \bar{C}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \sin 2\theta - 2\tau_{xy} \cos 2\theta], \quad (2)$$

где \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} — эмпирические коэффициенты, которые зависят от механических свойств материала, расстояния от центра отверстия и его диаметра

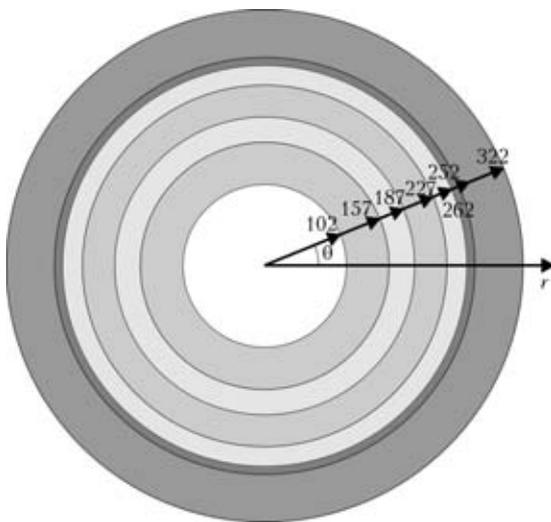


Рис. 8. Схема расположения и размеры контролируемых участков на исследуемом сварном диске

и не зависят от вида напряженного состояния; поэтому, вычисленные для одноосного напряженного состояния, они должны быть верны и для двухосного напряженного состояния исследуемого объекта [9]. Это утверждение положено в основу разработанных численных и экспериментальных методов определения эмпирических коэффициентов \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} .

Для экспериментального определения эмпирических коэффициентов дополнительно разработаны соответствующие методика и оборудование. Методика предполагает создание одноосного напряженного состояния в специальном тестовом образце с известным уровнем напряжения. В нагруженном образце высверливали отверстие и с помощью спекл-интерферометра в зоне отверстия измеряли компоненты векторов перемещений. По данным о перемещениях в исследуемых точках по формулам из работы [15] вычисляли эмпирические коэффициенты. Значения эмпирических коэффициентов для дополнительной проверки определяли с помощью метода конечных элементов по разработанному алгоритму. Полученные результаты показали, что данные численного определения эмпирических коэффициентов \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} хорошо согласуются с экспериментальными. Это позволило дополнительно получить ряд зависимостей, повышающих точность определения остаточных напряжений для различных материалов без проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований.

В разработанной методике предлагается измерение методом электронной спекл-интерферометрии компоненты перемещений u_x на постоянном расстоянии от центра отверстия ($r = 2,5r_0$, r_0 — радиус высверленного отверстия).

В общем случае определение остаточных напряжений предложенным методом выполняют в следующей последовательности [15]:

на расстоянии $2,5r_0$ от центра высверленного отверстия радиусом r_0 выбирают три точки под произвольными углами θ_1 , θ_2 и θ_3 относительно оси освещения;

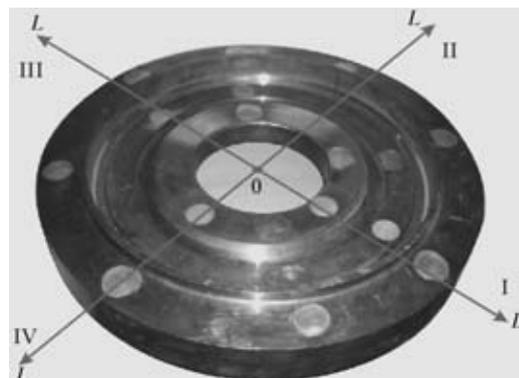


Рис. 9. Схема исследуемых сечений и областей при определении остаточных напряжений



Таблица 4. Результаты определения остаточных напряжений вдоль основных сечений I-IV (рис. 9)

L, мм	I		II		III		IV	
	σ_{rr} , МПа	$\sigma_{\theta\theta}$, МПа						
112	6,32	217,85	23,25	194,84	2,34	231,14	29,14	216,40
122	28,65	195,85	43,32	165,96	11,05	209,31	27,98	177,79
132	37,36	165,02	23,20	153,79	32,07	179,96	39,99	163,25
195	55,15	125,38	56,44	144,52	39,79	154,81	49,02	144,60
202	83,31	128,23	88,51	141,20	88,63	149,03	74,90	143,36
282	27,60	-138,23	37,98	-143,20	41,30	-158,51	57,13	-136,24
292	43,56	-128,45	57,16	-126,08	34,01	-150,11	32,31	-124,34
302	43,09	-120,93	37,58	-135,51	37,56	-115,71	43,00	-104,07

Примечание: σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ — напряжения, измеренные соответственно в радиальном и окружном направлениях.

экспериментально измеряют перемещения $u_x(\theta_1)$, $u_x(\theta_2)$ и $u_x(\theta_3)$ в выбранных точках;

находят компоненты σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} тензора напряжений как решение системы из трех линейных уравнений;

вычисляют значения главных напряжений σ_1 , σ_2 и угол η между осью освещения спекл-интерферометра и направлением σ_1 ;

повторение четырех последних пунктов для других трех точек с последующим усреднением получаемых результатов расчета напряжений позволяет значительно повысить точность определения остаточных напряжений.

Для оценки точности измерения плоскостных перемещений с помощью малогабаритного спекл-интерферометра и автоматизированной компьютерной обработки интерферограмм использовали решение известной задачи об изгибе консольной балки. Выполненные эксперименты показали, что отклонение значений напряжений, которые определяли спекл-интерферометрическим методом, от расчетных не превышают 6% предела текучести исследуемого материала [14, 15].

На рис. 8, 9 показаны расположение и размеры контролируемых участков, сечения и области, в которых определяли остаточные напряжения. Выполняя последовательно операции, описанные выше, определяли остаточные напряжения в исследуемых сечениях I-IV (табл. 4).

Анализ результатов показал, что остаточные напряжения распределены неравномерно на поверхности ступицы, полотна и обода. Тем не менее, при проведении разгонных испытаний модельного диска существенного влияния сварки на его прочность не выявлено.

Для создания оптимальной конструкции сварного диска необходимы дальнейшие комплексные исследования, включающие натурные исследования прочностных характеристик и напряженного

состояния дисков в лабораторных и производственных условиях в составе изделия.

1. Кайдалов А. А. Электронно-лучевая сварка / Изд. 2-е, испр. и доп. — Киев: Экотехнология, 2004. — 260 с.
2. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Шнейдерович Р. М. Расчет на прочность деталей машин. — М.: Машиностроение, 1966. — 420 с.
3. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. — Киев: Наук. думка, 1981. — 583 с.
4. Экспериментальная механика. Кн. 2 / Под ред. А. Кобаяси. — М.: Машиностроение, 1990. — 551 с.
5. Биргер И. А. Остаточные напряжения в элементах конструкций // Тр. II Всесоюз. симп. «Остаточные технологические напряжения». — М.: 1985. — С. 5–27.
6. Лобанов Л. М., Пивторак В. А. Развитие голографической интерферометрии для исследования напряженно-деформированного состояния и контроля качества сварных конструкций // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. — Київ: Наук. думка, 1998. — С. 620–636.
7. Остаточные напряжения в элементах авиационных конструкций, выполненных из сплава 1420 / А. Г. Братухин, Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак и др. // Автомат. сварка. — 1995. — № 3. — С. 10–13.
8. Moore A. J., Tyrer J. R. Two-dimensional strain measurement with ESPI / Opt. Lasers Eng. — 1996. — 24. — P. 381–402.
9. Zhang J. Two-dimensional in-plane its application to residual stress determination / Opt. Eng. — 1998. — 37. — P. 2402–2409.
10. Speckle Metrology / Ed. By R. S. Sirohi. — New-York: Marcel Dekker, 1993. — 342 с.
11. Makino A., Nelson D. Residual stresses determination by single-axis holographic interferometry and hole-drilling. Pt. I: Theory / Exp. Mech. — 1994, 34. — P. 66–78.
12. Wu Z., Lu J., Joulaud P. Study of residual stresses distribution by moire interferometry incremental hole drilling method / The Fifth Int. Conf. on Residual Stresses. — Lin Koping (Sweden) June 16–18, 1997. — P. 1127–1132.
13. Schaer G. S. Application of finite element calculations to residual stresses measurements. — J. Eng. Mater. Tech., 1981. — 103, № 4. — P. 157–163.
14. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1972. — 501 с.
15. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 25–30.