

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

А.А. Антонов, Г.Н. Чернышев, Л.П. Андреева, В.В. Овчинников



АНТОНОВ
Алексей Алексеевич

Доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Московского государственного индустриального университета (МГИУ). Основное научное направление — разработка методов и средств инструментального неразрушающего контроля напряжений в сварных конструкциях на основе лазерной спекл-интерферометрии. Автор 85 научных работ и двух монографий.



ЧЕРНЫШЕВ
Герман Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор. Ведущий научный сотрудник Института проблем механики (ИПМех). Специалист в области механики сплошных сред и теории упругости. Является одним из разработчиков четырехмерной теории упругости. Автор свыше 250 научных трудов.



ОВЧИННИКОВ
Виктор Васильевич

Доктор технических наук, профессор. Академик Международной академии информатизации. Ведущий специалист по сварке ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Основное научное направление — разработка методов и технологических средств получения качественных сварных соединений при изготовлении ответственных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов. Автор более 235 научных работ, в том числе 85 авторских свидетельств и патентов на изобретения.



АНДРЕЕВА
Людмила Павловна

Кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» МГИУ. Область научных интересов связана с исследованием поведения сварных соединений в условиях ограниченной ползучести. Автор 20 научных трудов и нескольких изобретений.

Введение

Проблема диагностики напряженного состояния сварных конструкций от технологических воздействий при их изготовлении, эксплу-

атации и ремонте в настоящее время является актуальной. Особую остроту она приобретает в связи с постоянным увеличением объема ремонтных работ на ответственных конструкциях, исчерпавших установленный эксплуатационный ресурс. Так, можно отметить, что материальный ущерб от аварий и разрушений резервуаров для хранения нефти и магистральных трубопроводов может превышать первоначальные затраты на их сооружение в 500-1000 раз [1]. Известно, что при изготовлении любой конструкции имеются возможности (хотя и ограниченные) управлять формированием ее начального напряженно-деформированного состояния (до приложения эксплуатационных нагрузок), влияющего на ресурс ее работы, путем выбора оптимальных технологических процессов и обоснованной последовательности технологических операций. При ремонте сварных изделий такие возможности резко ограничиваются, и имеющееся исходное напряженно-деформированное состояние конструкции будет изменяться в результате действия трудно

прогнозируемых возмущений от ремонтных технологических процессов. Оценить подобные возмущения и результаты их воздействия на напряженно-деформированное состояние сложных конструкций расчетными методами очень трудно. Другая возможность получить информацию о напряженном состоянии конструкции или конструктивного узла как в процессе, так и после ремонта – это применение экспериментальных методов определения остаточных напряжений.

К настоящему времени единственным стандартом метода определения остаточных напряжений является стандарт USA ASTM E 837-95 (Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method), в основе которого лежит механический метод проявления остаточных напряжений – метод отверстий (метод Маттара), а деформационные изменения в материале от этого воздействия регистрируются с помощью тензометрической системы. Общая схема реализации указанного метода представлена на рис. 1.

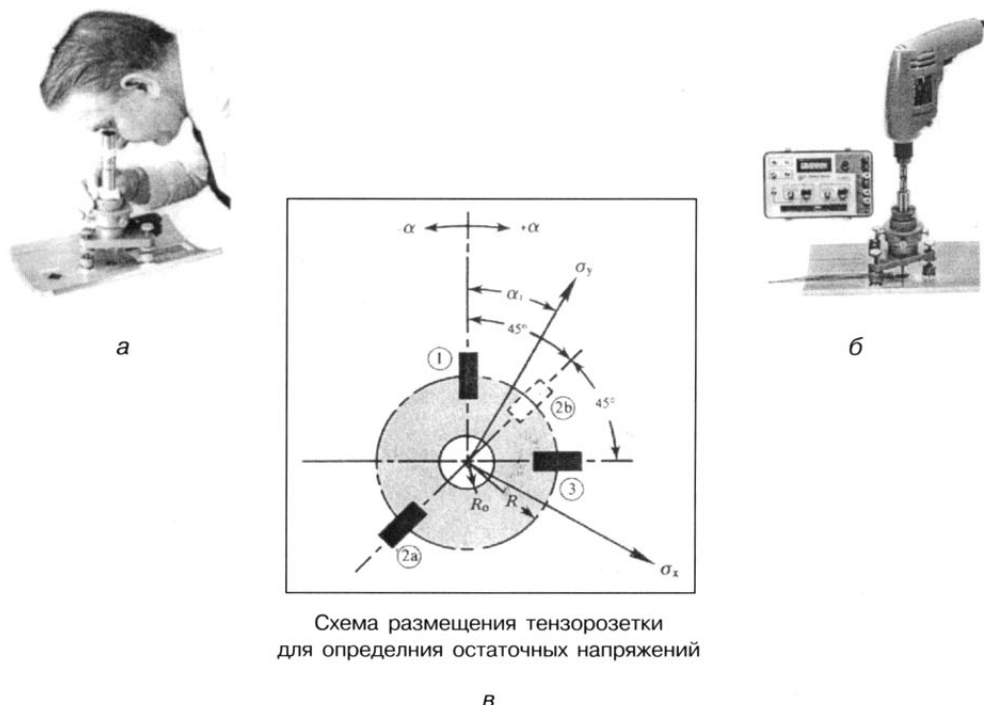


Рис. 1. Подготовительные операции для определения остаточных напряжений в соответствии со стандартом USA ASTM E 837-95:

а – разметка оси зондирующего отверстия и установка тензорозетки;

б – сверление зондирующего отверстия; в – схема размещения тензорозетки

Трудности, возникающие при применении этого метода, определяются требованиями к выполнению условий тензометрических измерений, что не всегда возможно обеспечить на реальных конструкциях. Метод трудоемок, требует высокой квалификации специалистов при выполнении необходимых измерений, имеет ограничения по применению в зависимости от конструктивных особенностей изделий. Несмотря на указанные особенности, данный метод наиболее широко применяется за рубежом для измерения остаточных напряжений. Неоспоримым достоинством этого метода является то, что при определении остаточных напряжений используются основные положения теории упругости, обеспечивающие корректный пересчет измеряемых деформаций в напряжения.

В настоящей статье рассматривается альтернативная реализация стандарта на основе применения достижений лазерной интерферометрии и фундаментальных зависимостей, полученных при решении обратных задач теории упругости. Общим при реализации стандарта является выявление остаточных напряжений путем высверливания глухого отверстия и последующей релаксации их на границе отверстия, приводящей к изменению первоначального деформированного состояния поверхности в зоне зондирующего отверстия. Различие метода тензометрии и интерферометрического метода заключается в различных измерительных системах регистрации параметров напряженно-деформированного состояния поверхности изделия при проявлении остаточных напряжений. В первом случае используется тензометрия, обеспечивающая измерение деформаций в ограниченном числе точек, во втором – лазерно-интерферометрический (оптический) способ, позволяющий выполнять измерения перемещений в неограниченном числе точек. Кроме того, оптический способ измерения является бесконтактным и не требует той тщательной подготовки поверхности изделия, как при тензометрировании [2–5].

Достижения в электронной оптике, лазерной и вычислительной технике способствова-

ли развитию электронно-оптических и спекл-интерферометрических методов. В результате фотографический детектор был заменен на цифровую видеосистему, дающую возможность фиксировать и обрабатывать изображения. Видеокамера коммутируется с персональным компьютером, имеющим соответствующее программное обеспечение для выполнения необходимых расчетов. Цифровая видеокамера обеспечивает разрешающую способность до 100 лин/мм. Этого вполне достаточно как для голографической интерферометрии сфокусированных изображений, так и для спекл-методов [6, 7]. Устройство сопряжения видеокамеры с компьютером обеспечивает практически мгновенное считывание изображения и его передачу в память компьютера. Затем изображение проходит специализированную обработку и сохраняется в виде графического файла. Эти достижения были с успехом применены для создания измерительной аппаратуры [6–9].

Измерительный комплекс ДОН

При разработке комплекса для диагностики остаточных напряжений (ДОН) в реальных изделиях решались следующие задачи:

- обеспечение стабильного качества результатов измерений;
- ослабление влияния внешних факторов на качество интерферограмм;
- обеспечение надежной фиксации оптического блока на поверхности изделия;
- обеспечение возможности измерения как нормальной, так и касательной компонент перемещения;
- снижение требований по подготовке оптического блока к измерениям;
- создание возможности соприкосновения устройств с оптическим блоком при выполнении зондирующих отверстий;
- обеспечение оптического блока автономным питанием.

Конструктивно комплекс ДОН состоит из оптического блока (в который входит спекл-интерферометр), системы фиксации его на

измеряемой поверхности, системы автономного питания лазера и видеокамеры, персонального компьютера и системы дозированного изъятия объема материала для выявления остаточных напряжений.

При измерении оптическая плоскость интерферометра может быть установлена либо нормально, либо под углом 45° к поверхности исследуемого изделия. Подобное решение позволяет выполнять измерения в угловых сварных соединениях, устранять влияние инструмента для создания зондирующего отверстия на формирование интерференционных картин и т.п. Общий вид измерительного комплекса ДОН представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид измерительного комплекса ДОН

Корпус интерферометра оборудован опорной системой, обеспечивающей его установку и крепление к поверхности исследуемого изделия. Конструкция корпуса обеспечивает защиту от высокочастотных колебаний, а также позволяет разместить аккумуляторы для автономного питания лазера и видеокамеры. Жесткое крепление корпуса к поверхности исследуемого изделия реализуется за счет внедрения трех инденторов, закрепленных в основании корпуса, в поверхность исследуемого изделия.

Процедура получения исходной информации для определения остаточных напряжений (системы интерференционных полос, являющихся линиями равных перемещений) состоит из четырех этапов: предварительной обработки исходных изображений; совмещения изображений; вычитания изображений и обработки разностного изображения.

На первом этапе при необходимости используют средства повышения резкости, изменения яркости и контрастности изображений. На втором этапе осуществляется послойное наложение кадров друг на друга. Кадры должны иметь одинаковые геометрические размеры (в пикселях). На третьем этапе обеспечивается получение разностной картины двух наложенных слоев. Происходит вычитание кодов цветов в совпадающих пикселях и формируется цифровой аналог интерферограммы. На участках, где контраст спеклов между двумя записями не изменился, разностный сигнал равен нулю, и в изображении появляется темная полоса. Области, где контраст спеклов был обратным, разностный сигнал проявляется в виде ярких полос. Поскольку цветовой код несет в себе информацию о перемещении точек поверхности, полосы интерпретируются как интерференционные полосы равных смещений. На четвертом этапе осуществляется улучшение качества разностной картины для удобства ее последующей обработки. Рассмотренные действия могут быть реализованы с помощью современного программного обеспечения (пакеты программ Photoshop, Photostyler и др.), а также в виде самостоятельного прикладного программного продукта.

Принципиальная схема измерительного комплекса представлена на рис. 3. Электронно-оптическая система состоит из полупроводникового одномодового лазера с длиной волны 640 нм и мощностью 15 мВт, технической видеокамеры с чувствительностью 0,1 люкс и разрешением 570 на 400 телевизионных линий (KPC-600 ВН), объектива с фокусным расстоянием 50 мм и диафрагмой (H1214FICS «Computar»), делителя, формирующего опорный и предметный световые пучки. Оптические оси элементов, входящих в состав спекл-интерферометра, располагаются в одной оптической плоскости. Для обеспечения требуемого соотношения между интенсивностями предметного и опорного пучков предлагается несколько вариантов конструктивного оформления делителя. Он может быть выполнен в виде

плоскопараллельной пластины или клина. Элементы интерферометра жестко закрепляются в полости корпуса.

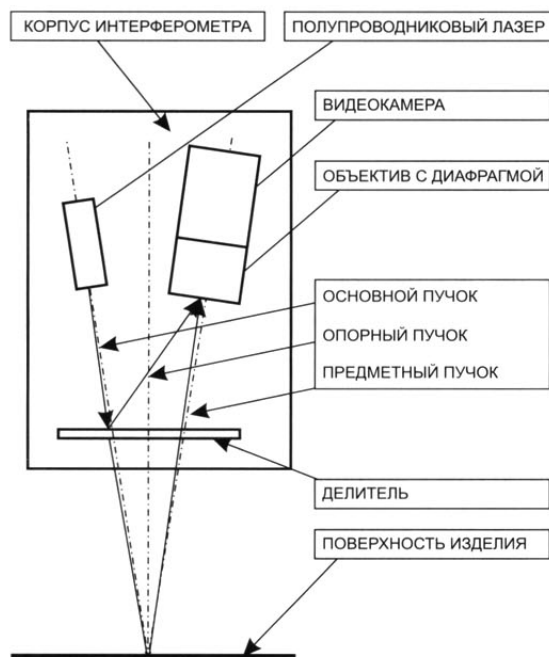


Рис. 3. Принципиальная схема электронно-оптической системы измерительного комплекса ДОН

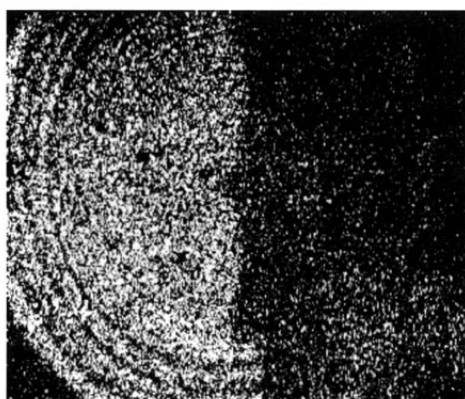
На качество интерферограмм существенное влияние оказывает подготовка и состояние поверхности в зоне контроля. На поверхность наносится светоотражающее покрытие (серо-стального цвета). Влияние покрытия на качество интерферограмм показано на рис. 4. Низкое качество интерференционной картины при визуальном подсчете приводит к зат-

руднениям определения истинного количества полос. На необработанной поверхности интерференционные полосы считываются трудно, в то время как на обработанной поверхности (с нанесенным светоотражающим покрытием) качество картины хорошее.

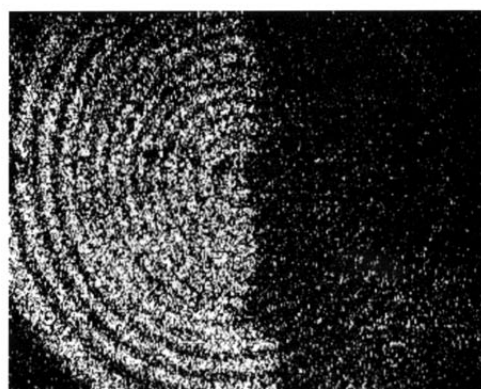
Применение комплекса ДОН для измерения остаточных напряжений в реальных сварных конструкциях

Разработанная аппаратура и программное обеспечение были применены для диагностического контроля и измерений остаточных напряжений в ряде сварных изделий. Также проведено исследование влияния различных технологических факторов на уровень остаточных напряжений в сварных соединениях авиационных конструкций.

Комплекс ДОН был использован для измерения остаточных напряжений в спиральном сварном шве трубы диаметром 600 мм, которая эксплуатировалась в составе магистрального газопровода. Работы выполнялись на фрагменте трубы размером 400x400 мм. Шов выполнен автоматической сваркой под слоем флюса, его ширина с лицевой стороны составляла 18 мм. Перед измерением поверхность была подготовлена соответствующим образом и на нее нанесено светоотражающее покрытие. Проверка правильности определения остаточных напряжений в исследуемой точке выпол-



а



б

Рис. 4. Интерферограмма поверхности исследуемого изделия:
а – без светоотражающего покрытия; б – со светоотражающим покрытием

нялась путем рассверливания зондирующего отверстия при соблюдении постоянной глубины отверстия. Эти операции выполнялись за одну установку оптического блока. Полученные результаты вычислений остаточных напряжений сравнивались между собой: сопоставление показало незначительное различие в полученных напряжениях (не более 10%).

На рис. 5 приведена фотография расположения зондирующих отверстий на поверхности фрагмента трубы. На рис. 6 показаны интерференционные картины, соответствующие номерам точек зондирования. В результате расшифровки интерферограмм получено, что для представленных точек зондирования значения остаточных напряжений изменяется в пределах от 153 до 238 МПа. При этом во всех случаях максимальные напряжения являются сжимающими.

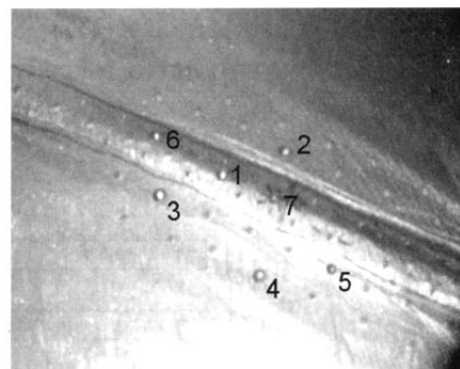


Рис. 5. Расположение точек зондирования и их порядковые номера на фрагменте трубы

В авиационной и космической технике при изготовлении сварных топливных баков в последние годы находит применение термоупрочняемый алюминиево-литиевый сплав 1460.

При изготовлении сварных конструкций из указанного сплава толщиной 3–4 мм при-



а



б



в



г

Рис. 6. Интерференционные картины, соответствующие номерам точек зондирования, уровень максимальных напряжений в них:

а – точка 1, сжимающие напряжения 238 МПа; б – точка 4, сжимающие напряжения 198 МПа; в – точка 5, сжимающие напряжения 153 МПа; г – точка 6, сжимающие напряжения 198 МПа

менялись автоматическая аргодуговая сварка (ААрДЭС) и электронно-лучевая сварка (ЭЛС).

Было проведено исследование остаточных напряжений в стыковых соединениях пластин толщиной 3,2 мм в характерных точках (рис. 7).

На рис. 8 приведены интерферограммы для точки 2, расположенной со стороны основного металла в соприкосновении с линией сплавления. Полученные значения остаточных напряжений в исследуемых точках сварных соединений представлены в табл. 1.

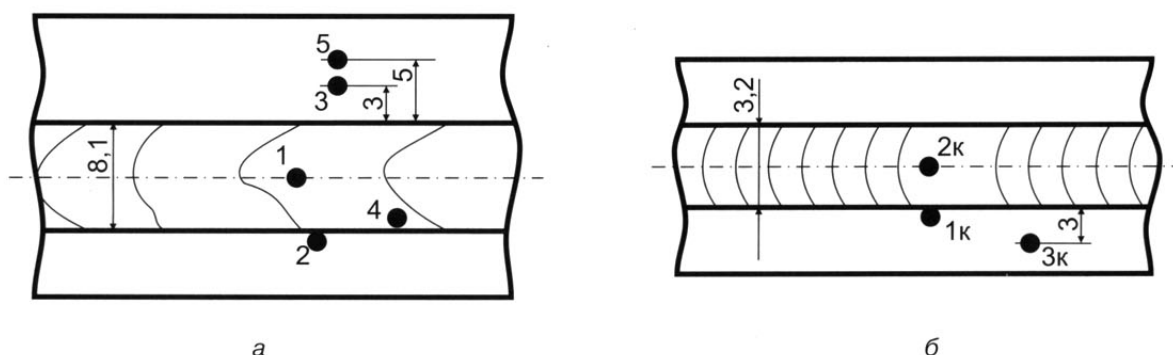


Рис. 7. Расположение точек 1–5 определения напряжений в сварных соединениях сплава 1460 при ААрДЭС:

а – с лицевой поверхности соединения; б – со стороны проплава соединения

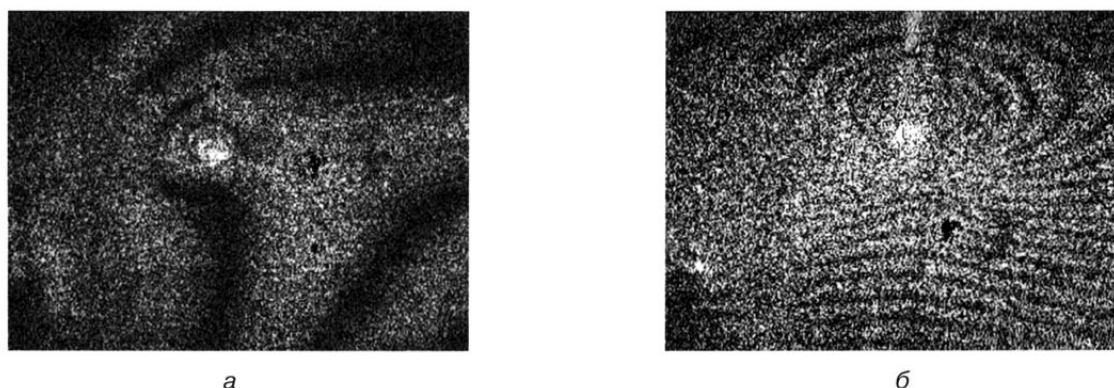


Рис. 8. Интерференционная картина точки, расположенной на линии сплавления со стороны основного металла, в соединении сплава 1460 при ААрДЭС:

а – диаметр зондирующего отверстия 1,5 мм при глубине 0,5 мм;

б – диаметр зондирующего отверстия 1,5 мм при глубине 1,5 мм

Таблица 1

Значения остаточных напряжений в исследуемых точках сварных соединений листов сплава 1460 толщиной 3,2 мм

Способ сварки	Расположение точки	Значения напряжений, МПа				
		Номер точки замера				
		1	2	3	4	5
ААрДЭС	Лицевая сторона соединения	90	135	153	153	35
	Со стороны проплава	208	214	36	–	–
ЭЛС	Лицевая сторона соединения	–	255	120	–	102
	Со стороны проплава	–	255	120	–	102

Результаты измерений показывают, что при ЭЛС остаточное напряжение с лицевой стороны и со стороны проплава примерно одинаково. Это определяется одинаковой шириной шва с обеих сторон соединения. В случае применения ААрДЭС остаточные напряжения со стороны проплава в зоне сплавления существенно выше, чем с лицевой стороны соединения. Анализ данных табл. 1 показывает также, что уровень остаточных напряжений в зоне сплавления при электронно-лучевой сварке существенно выше, чем при аргодуговой сварке.

В процессе определения остаточных напряжений в сварных соединениях панелей сплава 1420, полученных с помощью ААрДЭС, была выявлена аномалия, заключающаяся в существенном снижении величины напряжений в точках, расположенных в основном металле на границе сплавления (рис. 9). Выполненный до измерений рентгеновский контроль соединения не выявил наличия в этой зоне каких-либо дефектов. В то же время металлографические исследования показали, что в точке 1 (см. рис. 9) в структуре зоны сплавления соединения присутствуют зерна с частично оплавленными границами в результате воздействия термического цикла сварки. Величина остаточных напряжений составляла 135–153 МПа. В точке 2, расположенной на той же линии сплавления, уровень остаточных напряжений был ниже (85–95 МПа). Металлографические исследования выявили в зоне зондирующего отверстия данной точки микрорыхлоту (рис. 10). В точке 3 значения остаточных напряжений составляли 35–40 МПа, и с помощью металлографических исследований установлено наличие межзеренной трещины, не выходящей на поверхность металла и не выявленной рентгеновским методом (рис. 11). Этот факт свидетельствует о том, что применение метода лазерной спекл-интерферометрии позволяет дополнительно судить о наличии дефекта в соединении по снижению значений остаточных напряжений и более объективно идентифицировать результаты рентгеновского контроля участков сварного соединения там, где плоскость расположения воз-

можного дефекта (трещины) совпадает с плоскостью распространения рентгеновских лучей.

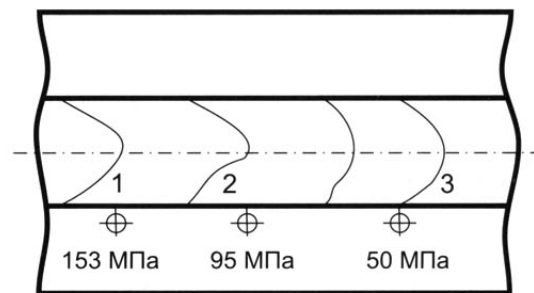


Рис. 9. Остаточные напряжения в точках 1, 2 и 3, расположенных на линии сплавления сварного соединения сплава 1460

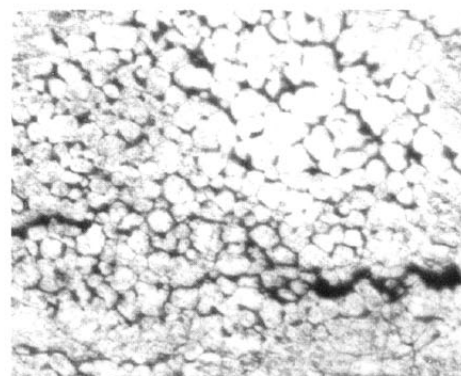


Рис. 10. Микрорыхлота в зоне точки 2 (x200)



Рис. 11. Микротрещина в зоне точки 3 (x200)

В процессе эксплуатации сварной конструкции из алюминиевых сплавов типа 1420 и 1460 возможно влияние на нее кратковременных нагревов до температуры 80–120 °С. Такие нагревы могут вызывать изменение структуры металла и распределение остаточных напряжений в элементах конструкции. Поэтому при изготовлении сварной конструкции необходимо проводить дополнительную термическую обработку после сварки, которая приводила бы к терми-

ческой стабильности изделия под действием эксплуатационных нагревов. Были проведены исследования влияния нагревов сплава 1420 и его сварных соединений с целью выбора режима термообработки, обеспечивающего повышение механических свойств соединения и релаксацию остаточных напряжений.

Все исследования проводились на штамповках сплава 1420, изготовленных по серийной технологии в промышленных условиях. Указанные штамповки используются для изготовления сварных силовых шпангоутов топливных баков с применением электронно-лучевой сварки. Внешний вид шпангоута представлен на рис. 12.

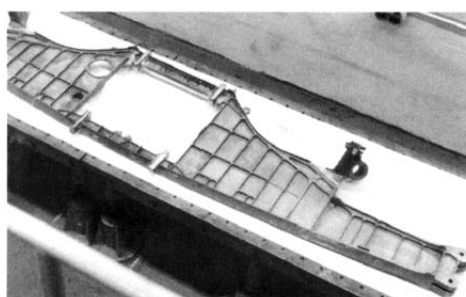


Рис. 12. Сварной силовой шпангоут топливного бака самолета МиГ29К

Штамповки соответствовали действующим техническим условиям ТУ 1.92.111-91. Остаточные напряжения были созданы в образцах за счет их изгиба в струбцине для основного материала штамповки. В сварных соединениях на-

пряжения определяли в зоне сплавления со стороны основного металла на одном и том же участке до и после выполнения термической обработки.

На рис. 13 приведены кривые релаксации напряжений в образцах сварных соединений. Анализ кривых зависимости от температуры (рис. 13, а) показывает, что степень снижения остаточных напряжений при температуре 120–180 °С в основном определяется температурой нагрева, в меньшей степени влияет время выдержки. Снижение остаточных напряжений более, чем на 50% происходит при нагревах до температуры выше 160 °С и последующей выдержке более 5 часов. Нагрев до температуры более 200 °С позволяет снизить уровень остаточных напряжений до 20–30 МПа. Снижение остаточных напряжений в сварных соединениях в зависимости от времени выдержки при разных температурах показано на рис. 13, б. Заметный эффект наблюдается уже при небольшой по времени выдержке (до одного часа).

При ремонте топливных баков самолета МиГ-23 появляется необходимость приварки узла поворота крыла к силовой раме шпангоута сваркой «в щель». Поскольку конструкция изготавливается из стали ВНС-2, для повышения стойкости сварного соединения к коррозии под напряжением целесообразно осуществлять процесс с получением наименьших остаточных напряжений.

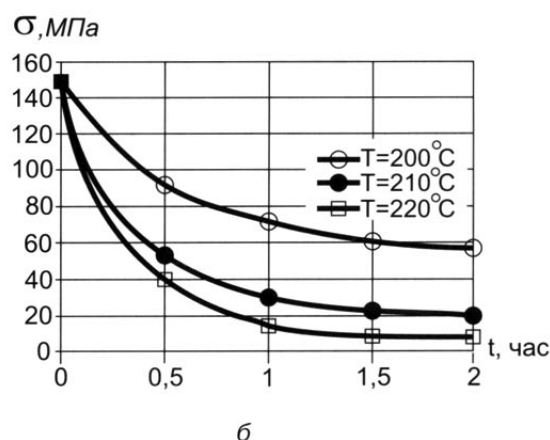
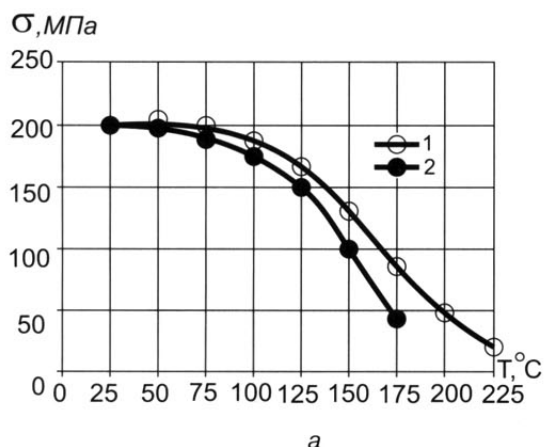


Рис. 13. Изменение остаточных напряжений штамповок сплава 1420:
а – при нагревах с выдержкой 5 часов (кривая 1) и 12 часов (кривая 2);
б – релаксация напряжений в сварном соединении штамповок сплава 1420

Для исследования были изготовлены образцы, для одних из которых осуществляли соединение сваркой «в щель» на одном режиме с послойным охлаждением после сварки каждого слоя до 80–100 °С, что соответствует схеме сварки швов длиной 500 мм, для других – без охлаждения с интервалом 1–2 мин перед наложением очередного слоя, что соответствует реальному темпу сварки коротких стыков с длиной шва 150 мм. Остаточные напряжения в таких образцах получаются различными.

На рис. 14 приведена эпюра остаточных напряжений по толщине образца 30 мм (z – линейная координата по толщине) при сварке с послойным охлаждением: в корне шва, $z = 0$, возникают растягивающие напряжения, величина которых близка к пределу текучести 600–800 МПа; в центре шва (по толщине) возникают напряжения сжатия величиной 250–500 МПа; у вершины шва ($z = 30$ мм) остаточные напряжения являются растягивающими. Пунктирными линиями показана конфигурация сварного шва.

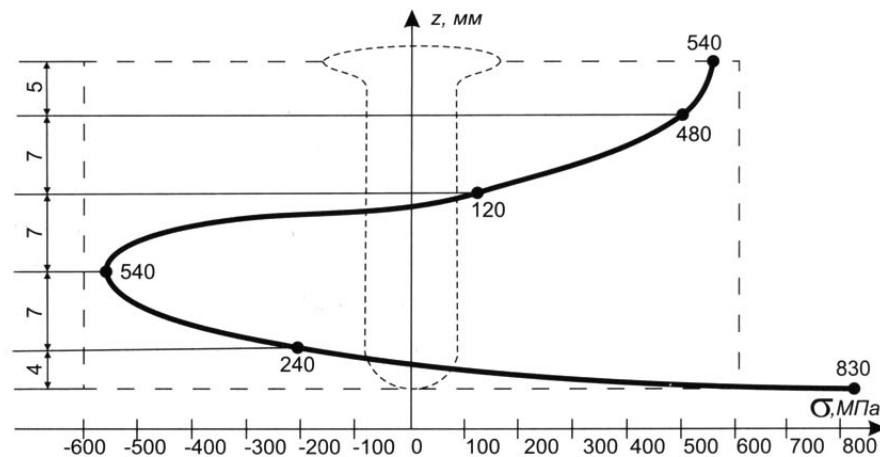


Рис. 14. Остаточные напряжения в образцах сварных соединений стали ВНС-2, выполненных сваркой «в щель» с послойным охлаждением

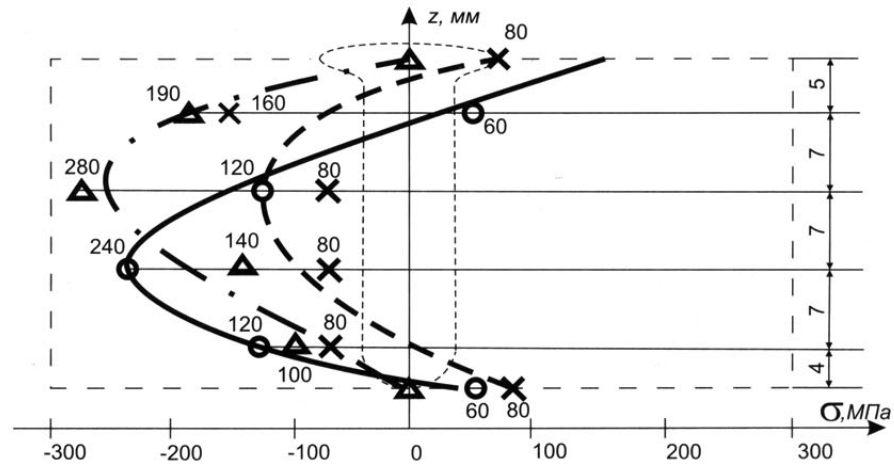


Рис. 15. Остаточные напряжения в образцах стали ВНС-2, выполненных сваркой «в щель» без послойного охлаждения:

l_0 – расстояние от границы сварного шва до центра зондирующего отверстия;

○ — — — — — $l_0 = 20$ мм, X — — — — — $l_0 = 30$ мм, Δ — — — — — $l_0 = 50$ мм

На рис. 15 приведены эпюры остаточных напряжений по толщине образца (на разном расстоянии от сварного шва), полученного при сварке без послойного охлаждения: напряжения в корне и вершине шва являются растягивающими, но существенно меньшей величины, чем сжимающие напряжения в центральной части образца. Аналогичные эпюры остаточных напряжений имеют незакрепленные образцы, сваренные электронным лучом в вакууме.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при сварке без послойного охлаждения наблюдается существенное снижение остаточных напряжений в конструкции бака, которое позволит предупредить коррозионное поражение материала в процессе эксплуатации. По-видимому, этот эффект обусловлен благоприятной скоростью охлаждения металла сварных соединений и отжигающим эффектом наложения последующего валика шва на предыдущий валик.

Заключение

Разработанный диагностический комплекс ДОН позволяет проводить оперативное определение остаточных напряжений в сварных конструкциях. Комплекс мобилен, достаточно удобен в эксплуатации.

В результате промышленного применения диагностического комплекса впервые была получена картина распределения остаточных напряжений в сварной конструкции силового элемента (шпангоута) топливного бака самолета МиГ-23 после ремонта. На основе проведенных исследований рекомендована схема сварки швов «в щель» без послойного охлаждения валиков, обеспечивающая наименьшие значения остаточных напряжений и повышенную стойкость конструкции к коррозии под напряжениями в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. *Стеглов О.И.* Реновация сварных металлоконструкций и изношенных деталей машин

- и механизмов // Сварщик-профессионал. 2004. № 1. С. 2–6.
2. *Антонов А.А., Бобрик А.И., Морозов В.К.* Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1980. № 2. С. 182–189.
3. *Антонов А.А.* Разработка методики и оборудования голографического контроля остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство. 1983. № 12. С. 26–28.
4. *Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В.* Голографические интерференционные методы измерения деформаций. – М.: Наука, 1988. 248 с.
5. *Одинцов И.Н., Щепинов В.П., Щиринов А.Ю.* Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 106–110.
6. *Власов Н.Г., Левин Г.Г.* Электронный (телевизионный) спекл-интерферометр // Доклады Всесоюзного научного семинара «Метрولوجические лазерные измерительные системы». – Волгоград. 1991. Ч. 1. С. 17–18.
7. *Flemming T., Hertwig M., Usinger R.* Spekle intererometry for highly localized displacement fields // Meas. Sci. and Technol. 1993. Vol. 4. No. 8. P. 820–825.
8. *Игнатьев А.Г., Шахматов М.В., Зарезин А.А.* Электронная спекл-интерферометрия при измерении остаточных сварочных напряжений // Сварочное производство. 1998. № 12. С. 24–27.
9. *Шахматов М.В., Игнатьев А.Г.* Разработка измерительного комплекса для оценки реальной надежности трубопроводов в процессе их технической диагностики без остановки перекачки нефтепродуктов // Нефтяная и газовая промышленность. Сер. «Транспортировка и хранение нефти и нефтепродуктов: Экспресс-информация». 1993. Вып. 5. С. 1–6.