

Из опыта ИЭС им. Е. О. Патона использования голографической диагностики качества элементов сварных конструкций, эксплуатируемых в условиях космоса

Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Надійшла до редакції 25.05.95

Приведені застосування методу голографічної інтерферометрії для контролю якості та визначення залишкових напружень елементів зварних конструкцій, які використовуються в аерокосмічній техніці. Представленій можливий варіант застосування методу оптичної голографії для використання контролю якості зварних трубчатих елементів в умовах космосу.

В авиастроении, космической технике широкое применение находят тонкостенные и тонколистовые конструкции, к которым предъявляются требования высокой работоспособности и надежности. Обычно эти конструкции работают в условиях сложного механического воздействия и температурных градиентов. Концентрация напряжений, возникающая в зоне дефектов сварных швов в ряде случаев вызывает разрушение таких конструкций.

Для выявления дефектов в материалах и конструкциях разработана группа неразрушающих методов, таких как рентгенографические, радиографические, ультразвуковые, люминесцентные, вихревые токи и т. д. (Самойлов, 1976). Каждый из этих методов имеет свои недостатки и преимущества, однако ни один из этих методов не является универсальным и не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к средствам и методам неразрушающего контроля.

Между тем инженерная практика ставит все новые задачи перед неразрушающими методами. Для их решения необходимы новые методы испытаний, позволяющие получать более полную информацию об объектах контроля. К таким методам относится и метод голографии (Вест, 1982; Кольер и др., 1973).

Одним из разделов оптической голографии является быстро развивающийся метод голографической интерферометрии, который из стадии лабораторных разработок перешел на этап практического использования и занял прочное место не только в исследовательских лабораториях, но и в ряде отраслей промышленности. Голографическая интерферометрия не является альтернативой другим экспериментальным методам механики твердого деформируемого тела, а дополняет их и позволяет осуществить глубокий анализ физических основ и закономерностей протекания реальных процессов. Объективной предпосылкой развития и внедрения голографических методов явилось создание мощных высококогерентных лазеров, новых регистрирующих сред, современной вычислительной техники, средств отображения оптической информации и разработка вычислительных методов обработки такой информации.

Голографическая интерферометрия позволяет, не производя никаких измерений формируемой интерферограммы, получать непосредственно качественную картину распределения деформаций по всей поверхности объекта в результате приложения к нему определенных усилий. Даже без дальнейшего анализа эта картина дает возможность получать

чрезвычайно полезную для задач контроля информацию, позволяя легко обнаруживать различные дефекты.

Возможность использования голографической интерферометрии в области дефектоскопии объясняется следующим. Любые неоднородности структуры материала (трещины, отслоения и т. п.) можно рассматривать как включение элементов с разной степенью жесткости, приводящих к дискретности физико-механических характеристик материала. Это является причиной формирования локальных возмущений силового поля и концентрации напряжений и деформаций в околодефектной области материала, подвергаемого внешним нагрузкам. Поэтому, если величина аномальной деформации поверхности объекта при его нагружении, обусловленная наличием дефекта, превосходит нижний предел чувствительности используемого голографического интерферометра, то такой дефект обнаруживается по изменению интерференционной картины полос по сравнению с картиной, образуемой при таком же нагружении объекта или его части, не имеющим дефекта. Непосредственное влияние дефекта на вид интерференционной картины позволяет осуществить контроль на основе качественного анализа интерферограммы, не прибегая в большинстве случаев к ее количественной обработке, что имеет большое значение при использовании метода в промышленных целях.

Надежность выявления дефектов на основе качественного анализа интерферограмм определяется, в первую очередь, правильным учетом следующих двух факторов. Во-первых, выбором оптимального вида нагружения объекта, т.е. созданием такого напряженного состояния, которое приводит для данного типа дефектов к наибольшим различиям в распределении перемещений и деформаций по поверхности объекта в дефектных и бездефектных областях. Во-вторых, использованием при проведении исследований голографического интерферометра, имеющего наибольшую чувствительность к той компоненте вектора перемещения, на распределение которой при заданном виде нагружения в наибольшей степени влияет наличие дефекта.

Чувствительность голографического интерферометра к нормальной компоненте вектора перемещения в большинстве случаев значительно выше, чем к тангенциальной компоненте, и достигает величины $\lambda/2$. Поэтому в общем случае при использовании голографических методов для неразрушающих исследований целесообразно выбирать оптическую схему, чувствительную главным образом к перемещениям из плоскости, а нагружение объекта осуществляется таким образом, чтобы ано-

малии в поле перемещения соответствовали именно этой компоненте (Эрф, 1979; Джоунс, Уайкс, 1986).

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в течение ряда лет метод голографической интерферометрии используется для контроля качества элементов и узлов различных конструкций из металлических и композитных материалов (Лобанов и др., 1986, 1993). К достоинствам метода можно отнести следующее: бесконтактность измерений; отсутствие вредного влияния на окружающую среду и обслуживающий персонал (метод экологически чистый); возможность простого визуального наблюдения картины интерференционных полос по всему полю; применимость к исследованию объектов, имеющих весьма сложную форму; отсутствие специальных требований к обработке поверхности исследуемых объектов; количественное определение с высокой точностью малых значений пространственного вектора перемещения по поверхности исследуемого объекта; простота интерпретации интерференционных картин полос при контроле качества; отсутствие влияния магнитных и электрических полей на точность измерений; безопасность в работе; возможность автоматизации и другое.

Опыт использования метода голографической интерферометрии для контроля качества сварных конструкций различного назначения показал высокую его эффективность. При этом используются различные схемы голографических интерферометров, имеющие регулируемую чувствительность (Лобанов и др., 1989; Островский и др., 1977, 1988; 1981, Касаткин (ред.), 1981). Так, например, при контроле качества конструкций с сотовым наполнителем, которые широко используются в аэрокосмической промышленности, использовались схемы записи голограмм в реальном масштабе времени.

Конструкция сотовой панели представляла собой плоскую трехслойную пластину размером 1140 × 440 мм и толщиной 13 мм, которая состояла из двух наружных титановых листов толщиной 1 мм каждый и сотового наполнителя (толщина стенок сотового наполнителя 0.1 мм). Соединения сотового наполнителя с наружными листами осуществлялось с помощью контактной сварки.

Методика и реализующая ее оптическая схема интерферометра ориентированы на контроль панелей с помощью нагружения ее внутренним давлением.

Основные этапы контроля включали предварительный наддув панели до $0.8 \cdot 10^5$ Па, после чего выполнялась регистрация ее поверхности с помощью термопластичной камеры. Затем давление

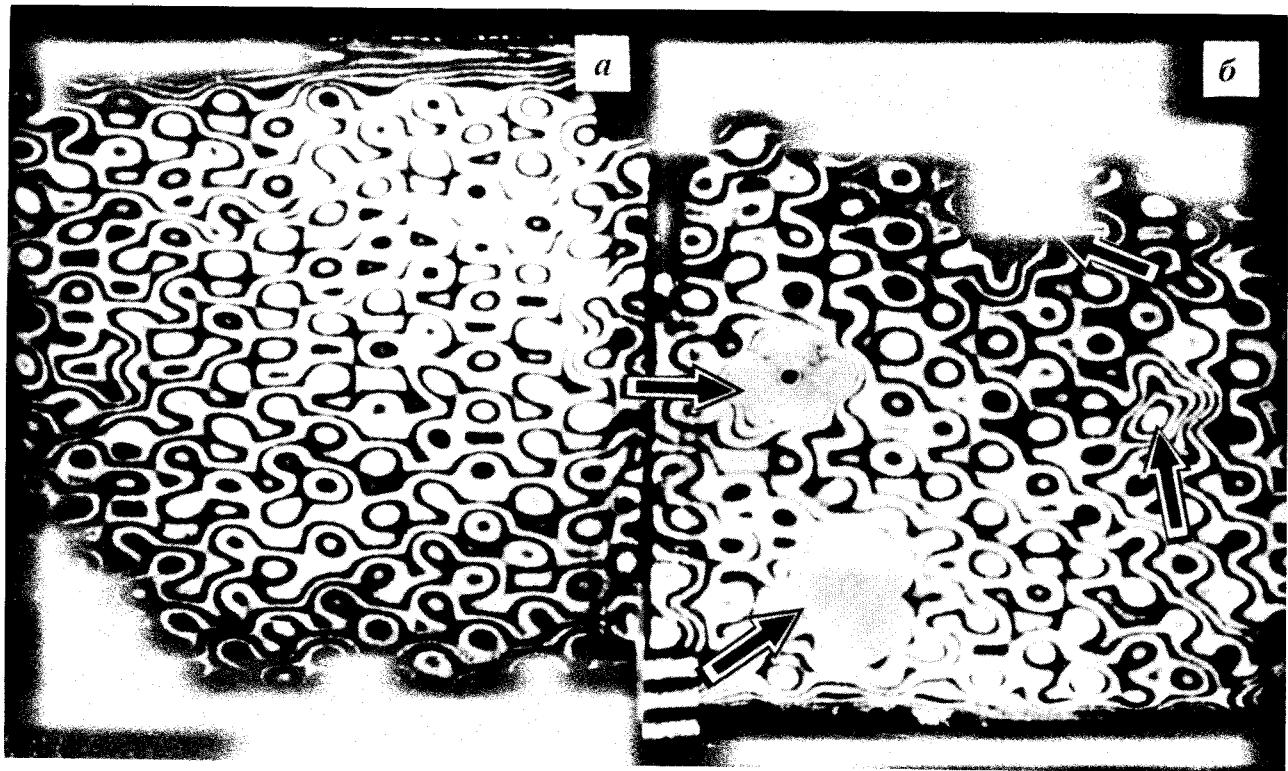


Рис. 1. Интерференционные картины полос, характеризующие качество сотовых панелей: а — эталонная картина полос, б — картина полос в панели с дефектами

снижали на $0.05 \cdot 10^5$ Па и в реальном масштабе времени наблюдалось состояние панели, соответствующее давлению $0.75 \cdot 10^5$ Па. Полученные таким образом интерферограммы определяли поле перемещений (прогибы) внешнего слоя при перепаде давления на $0.05 \cdot 10^5$ Па. По их виду делался вывод о качестве соединения слоев.

В бездефектных областях панели наблюдалась регулярная картина интерференционных полос, отслеживающая структуру сотового заполнителя. В окрестности предполагаемых дефектов наблюдалась локальная концентрация интерференционных полос (рис. 1, б). Опыт использования голограммического контроля показывает, что обнаружение всех дефектов надежно осуществляется при качественном анализе интерферограмм путем визуального выявления аномалий интерференционных полос.

Для сравнения получена интерференционная картина полос, характеризующая бездефектно сваренную панель, которая использовалась как эталонная (рис. 1, а).

Технологический процесс изготовления сварных конструкций для аэрокосмической промышленности неизбежно приводит к образованию полей оста-

точных напряжений. Уровень напряженного состояния влияет на работоспособность элементов конструкций, особенно в зоне возможного концентратора, а значит и на качество сваренной конструкции в целом. В связи с этим актуальными остаются вопросы анализа остаточных напряжений в сварных конструкциях для авиации и космоса.

Существенные трудности возникают при определении остаточных напряжений в элементах конструкций, выполненных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) в связи с высокой степенью локализации остаточных напряжений в узкой зоне сварного шва (3—5 мм).

С помощью созданных портативных голограммических приборов (рис. 2) и методик (Лобанов и др., 1992, 1993) определялись остаточные напряжения в сварной ступени авиационного газотурбинного двигателя из титанового сплава, выполненного ЭЛС. На рис. 3 показаны общий вид элемента газотурбинного двигателя, интерференционные картины полос, характеризующие остаточные напряжения, и величина остаточных напряжений в исследуемых точках конструкции. Несмотря на сложную геометрию исследуемой конструкции, созданные методи-

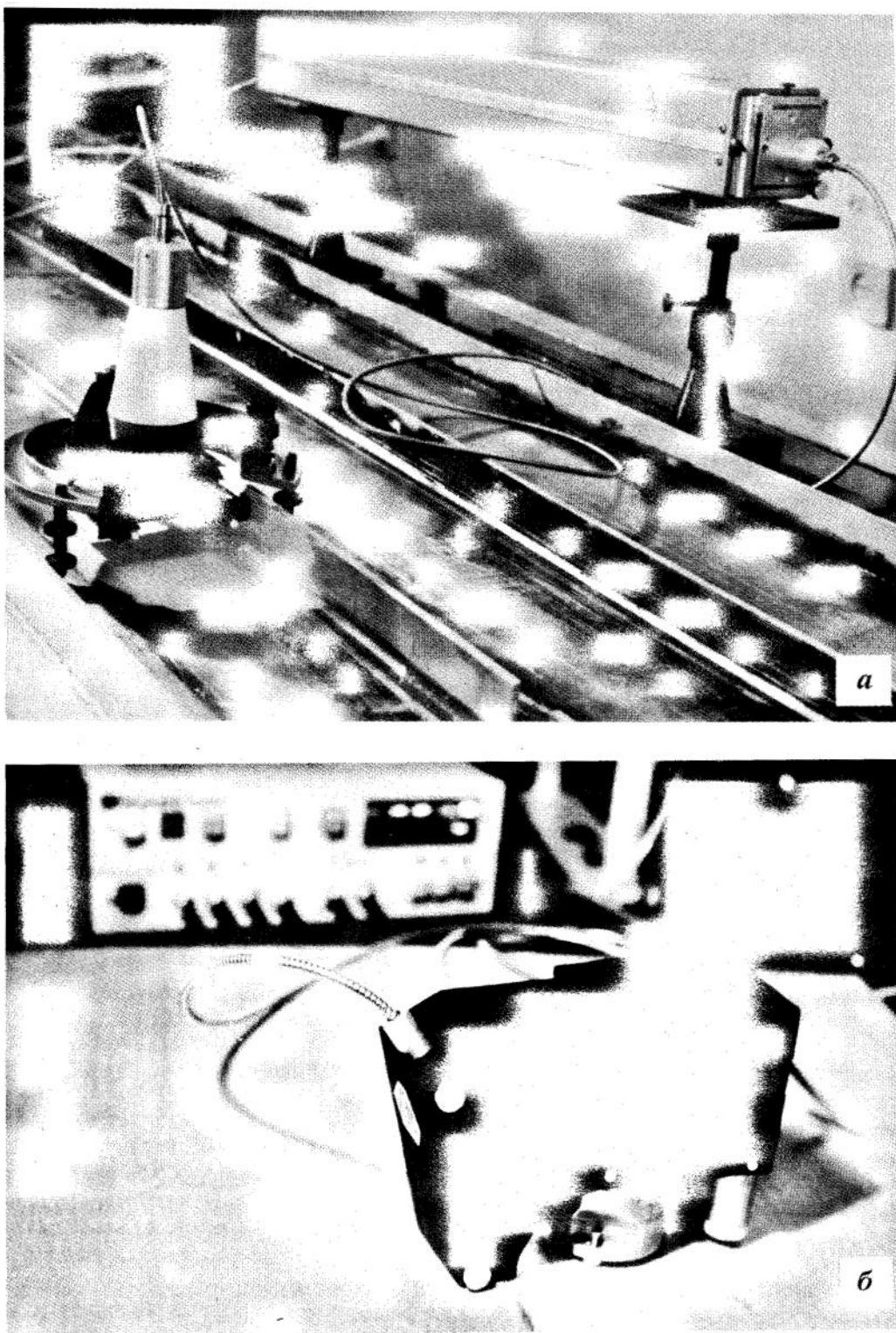


Рис. 2. Общий вид малогабаритных голограмических модулей, предназначенных для определения остаточных сварочных напряжений: а — портативный прибор с записью голограмм на фотопластинке, б — портативный прибор с записью голограмм на термопластический материал

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 420 \text{ МПа} \\ \sigma_2 &= 280 \text{ МПа}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 560 \text{ МПа} \\ \sigma_2 &= 340 \text{ МПа}\end{aligned}$$

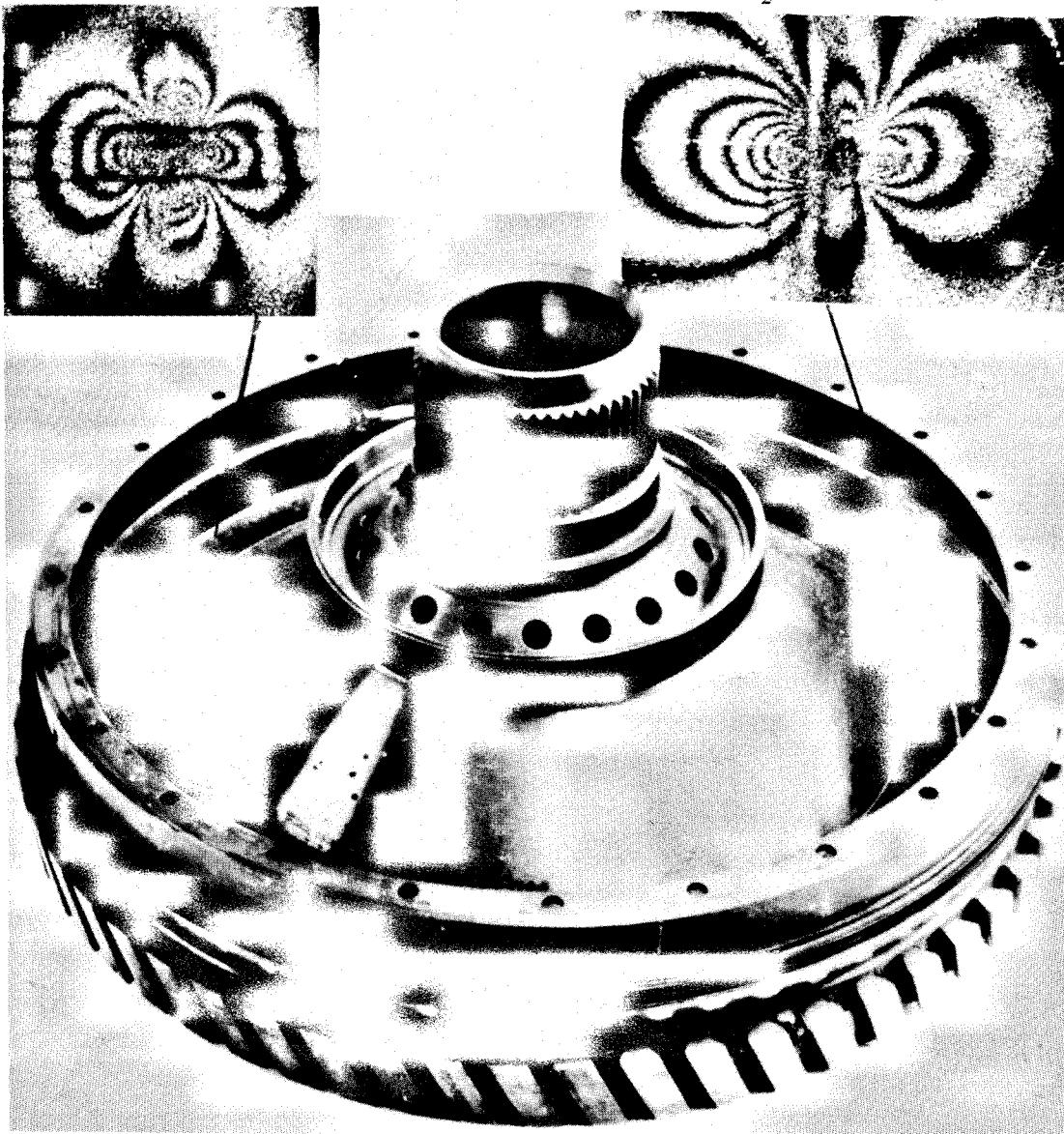


Рис. 3. Общий вид элемента газотурбинного двигателя, интерференционные картины полос и величины остаточных напряжений в исследуемых точках сварного шва

ка и приборы позволили определить величину остаточных напряжений в зоне сварного шва.

Перспективным представляется использование голографической интерферометрии для контроля качества сварных соединений в условиях космоса. Постоянно действующие орбитальные станции, которые будут создаваться в недалеком будущем, и в которых в качестве несущего каркаса заложены

протяженные ферменные конструкции с большой строительной высотой будут являться уникальными дорогостоящими объектами, экономически оправданными лишь при условии гарантированной их эксплуатации в течение нескольких десятков лет.

В режиме полета такая конструкция обычно подвергается широкому спектру динамических и тепловых воздействий — автоколебание, удары при

стыковке с пилотируемыми грузовыми кораблями, изгибные и крутящие моменты при маневрировании и др.

Такой комплекс воздействия на конструкцию в ряде случаев может привести к концентрации напряжений в зонах пониженной прочности или возможных дефектов и, как следствие, к разрушению конструкций. Между тем мировой опыт эксплуатации различного рода ответственных объектов, работающих в экстремальных условиях, предполагает наличие современных высокоеффективных и надежных методов контроля качества сварных соединений.

Одним из важных требований при решении данной задачи применительно к выполнению монтажных и ремонтных работ в условиях космоса является компактность и надежность оборудования для неразрушающего контроля качества. Известные го-

лографические стенды и устройства достаточно хорошо зарекомендовали себя в работе, однако они имеют большие габариты и в основном пригодны для использования в стационарных условиях.

В Институте электросварки в течение ряда лет ведутся разработки по созданию малогабаритных голограмических приборов и устройств, позволяющих выполнять диагностику конструкций в монтажных и заводских условиях.

На рис. 4 показан общий вид малогабаритного голограмического модуля, который использовался для диагностики качества трубчатых сварных элементов. В состав разработанного голограмического модуля входят источник когерентного излучения (лазер), голограмический интерферометр, термоэластическая камера мгновенной записи голограммических интерферограмм, световоды, устройства для нагружения исследуемых элементов. Следует

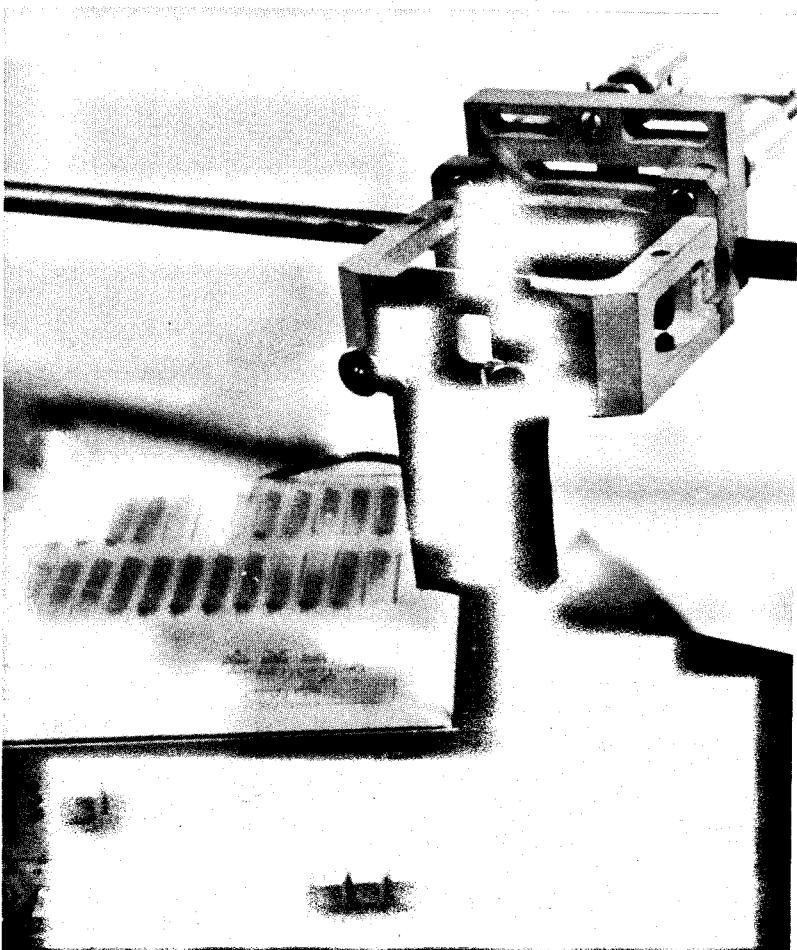


Рис. 4. Общий вид малогабаритного голограмического модуля для контроля качества сварных трубчатых элементов

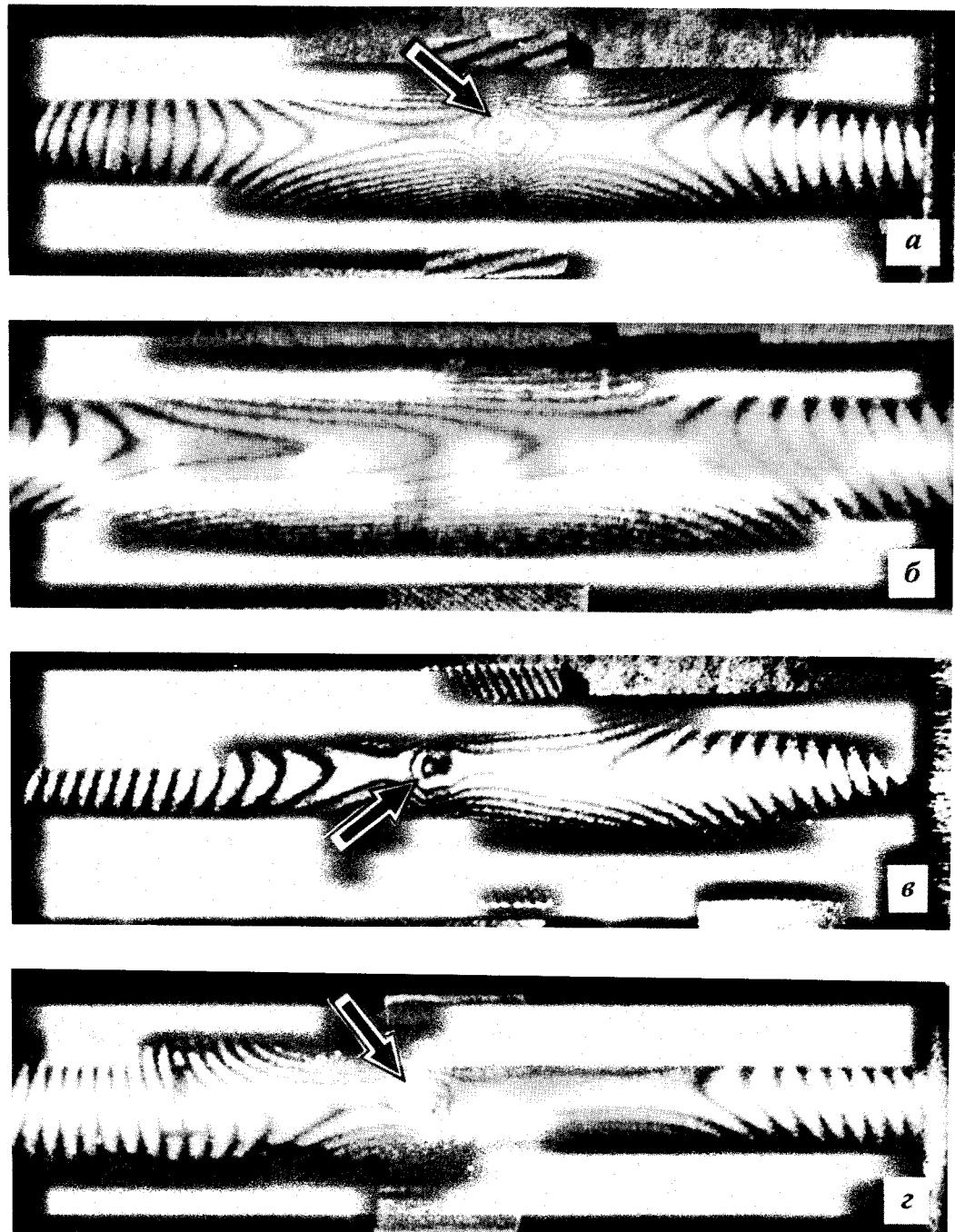


Рис. 5. Интерференционные картины полос в сварном шве трубчатых элементов из нержавеющей стали: а — картина полос в зоне дефекта типа «непровар», б — эталонная картина полос, в — локальная концентрация полос, вызванная изменением механических характеристик зоны сварки, г — картина полос в зоне дефекта типа «прожег» (окончание см. на следующей странице)

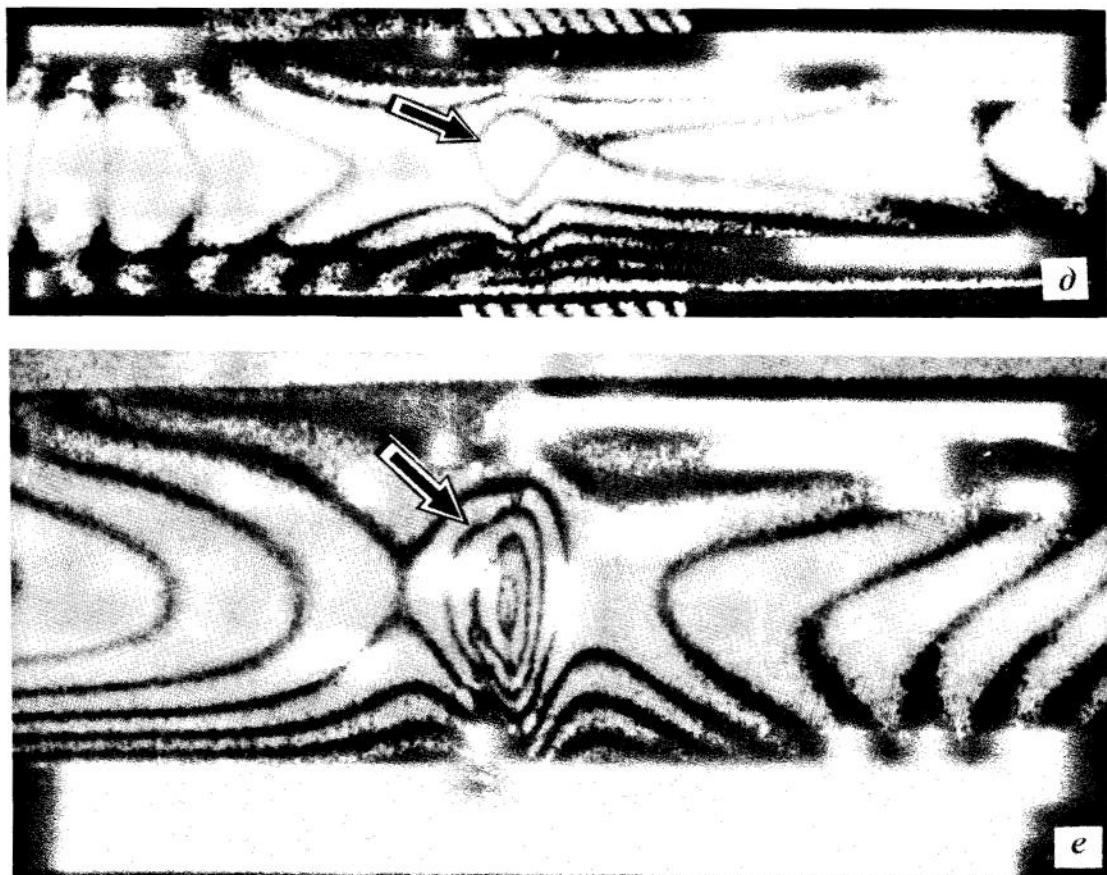


Рис. 5 (окончание). Интерференционные картины полос в сварном шве трубчатых элементов из нержавеющей стали: *д* — типичная картина полос в сварном шве по его длине, *е* — картина полос в сварном трубчатом элементе диаметром 24 мм

отметить, что использование термопластической камеры мгновенной регистрации голограмм позволяет оперативно выполнять контроль качества исследуемых сварных элементов. В качестве регистрирующей среды используются созданные пленки аморфных молекулярных полупроводников.

Диагностика качества сварных элементов выполняется в следующей последовательности: на исследуемый элемент с помощью зажимов устанавливается голографический модуль. Контролируемая зона образца нагружается изгибающей силой. Величина нагружающего усилия контролируется по показаниям индикатора. Регистрация исходного состояния исследуемой поверхности выполняется при нулевом уровне нагружения. Включается лазерный источник излучения, и с помощью термопластической камеры регистрируется голограмма состояния поверхности объекта до его нагружения. С помощью телекамеры изображение исследуемой поверхности выводится на монитор. После этого исследуемый объект нагружается, и в реальном масштабе

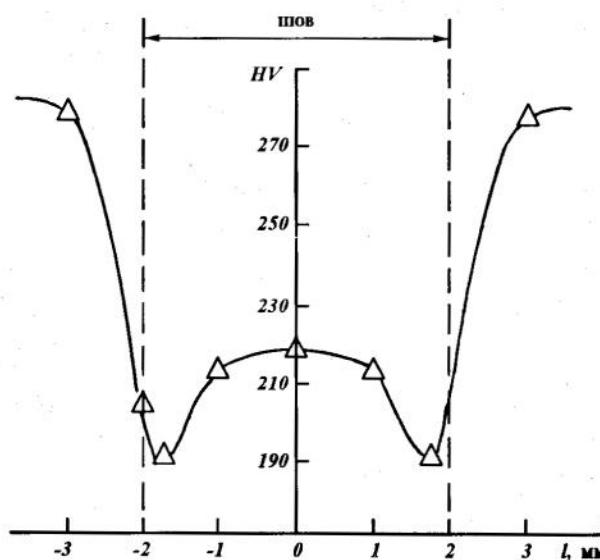


Рис. 6. Кривая изменения твердости в сварном трубчатом элементе из нержавеющей стали

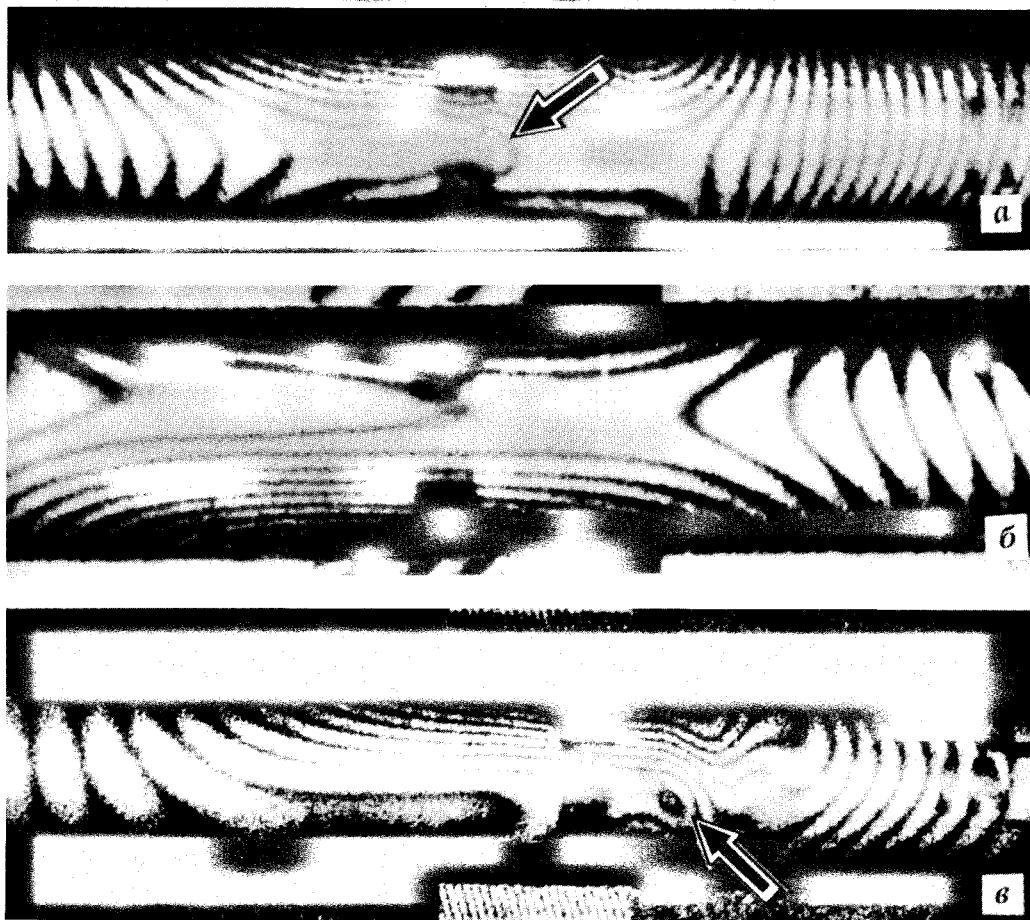


Рис. 7. Интерференционные картины полос в сварном трубчатом элементе из титана: а — локальная концентрация полос по линии сплавления; б — эталонная картина полос; в — локализация полос на расстоянии 7 мм от оси шва

табе времени можно наблюдать на мониторе картину интерференционных полос в процессе нагружения образца.

В зоне возможного дефекта, связанного с непроваром, отклонением от прямолинейности сварного шва, кратера и др. наблюдается локальная картина интерференционных полос (на фоне регулярной картины полос наблюдаются искривления в зоне дефекта).

Трубчатые и плоские сварные элементы, выполненные из нержавеющей стали и титана, контролировались по вышеприведенной методике.

Сварной кольцевой шов в трубчатом элементе диаметром 12 мм выполнялся в средней части.

Интерференционная картина полос трубчатого элемента диаметром 12 мм с дефектом типа «непровар» показана на рис. 5, а. Дефекты такого типа

выявляются при весьма незначительных нагрузках. В случае качественного шва эталонная картина полос имеет вид, приведенный на рис. 5, б.

Дальнейшее возрастание приложенной нагрузки позволяет визуализировать зоны с резким изменением механических свойств в исследуемом образце. Так, например, в исследуемом трубчатом образце из нержавеющей стали, кроме выявленного дефекта, наблюдается по длине шва локальная концентрация полос (рис. 5, в). При этом кривая изменения твердости в сварном шве и околошовной зоне показана на рис. 6, что свидетельствует о резком изменении свойств шва.

Изменяя уровень нагружения на исследуемые трубчатые образцы, можно выявлять различные типы дефектов, включая и зоны разупрочнения и подкалки.

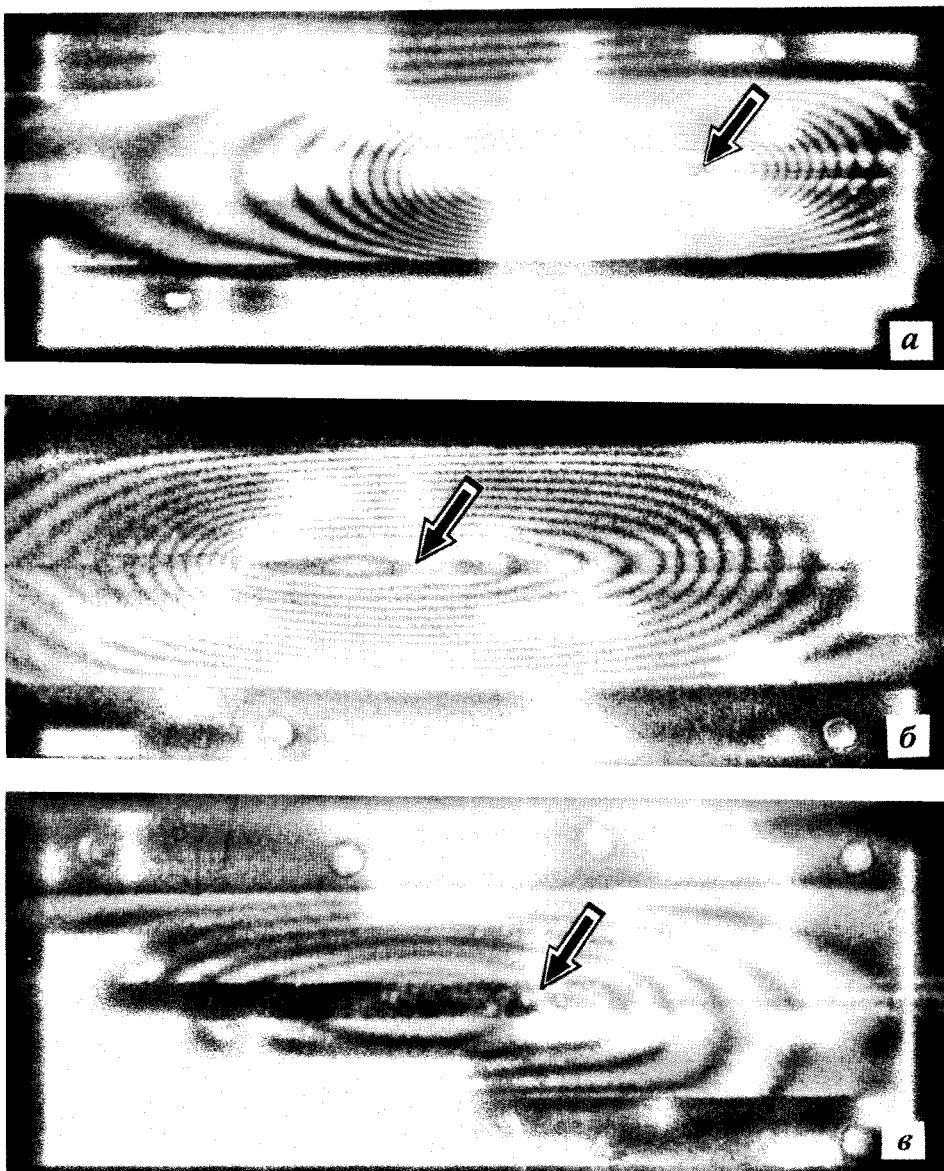


Рис. 8. Типичные интерференционные картины полос в плоских сварных элементах: а — дефекты типа «непровар» по толщине; б — картина полос на участке нарушения прямолинейности шва; в — картина полос на участке остановки сварочного источника

Интерференционная картина полос участка шва с дефектом типа «прожег» (образец диаметром 12 мм) показана на рис. 5, г. По всей длине сварного шва при другом уровне нагружения наблюдается локальная концентрация интерференционных полос (рис. 5, д), что может быть связано, по нашему мнению, с разупрочнением сварного шва.

Исследование серии трубчатых образцов диаметром 24 мм показало в ряде случаев локальную

концентрацию интерференционных полос в сварном шве по всей его длине. Типичная картина полос в сварном шве показана на рис. 5, е.

Анализ выполненных экспериментов показал, что голограммическая интерферометрия позволяет зарегистрировать различные дефекты в сварном шве в образцах из нержавеющей стали. При этом открывается возможность (в случае необходимости) выявления участков с резким изменением механических свойств.

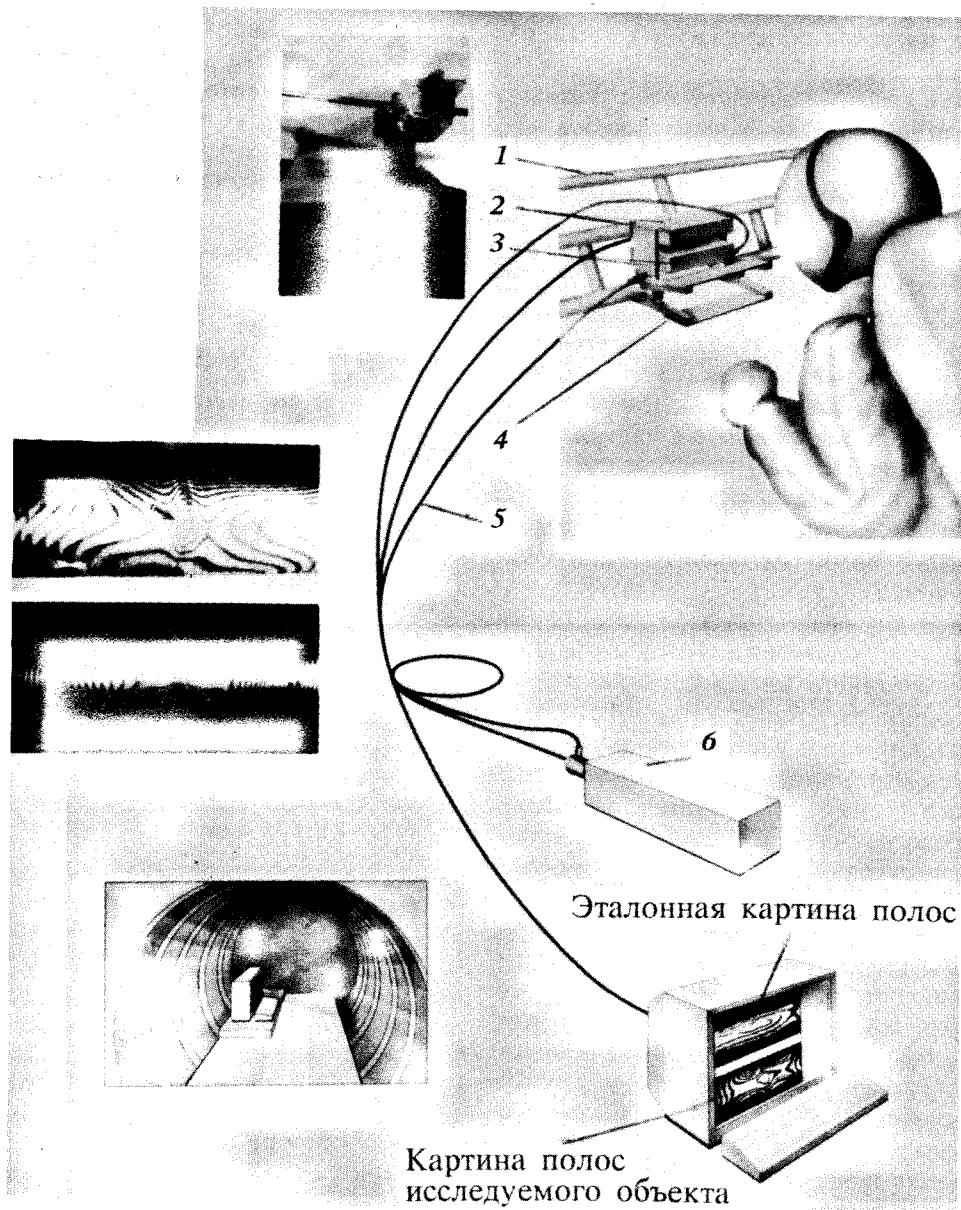


Рис. 9. Схема голограммического контроля качества сварных элементов в условиях космоса: 1 — исследуемый объект; 2 — телекамера; 3 — термопластичная камера для записи интерферограмм; 4 — нагруженное устройство; 5 — лазер; 6 — световоды

Исследования сварных швов в титановых трубчатых элементах показали следующее. В образце диаметром 12 мм на одном из участков по длине сварного шва на линии сплавления выявлена локальная концентрация полос (рис. 7, а). В остальной части сварной шов (рис. 7, б) качественный.

Следует также отметить, что на образцах из титана диаметром 12 мм в околосшовной зоне на расстоянии примерно 7 мм от оси шва наблюдается локальная концентрация интерференционных полос, отличающаяся от картины полос в бездефектной зоне (рис. 7, в). Можно предположить, что

околошовная зона была деформирована (возможно, зажимами при сварке).

Аналогичные эксперименты по контролю качества выполнялись на сварных плоских образцах из нержавеющей стали.

По приведенной выше методике образец устанавливался в устройство крепления и нагружался небольшим усилием с целью устранения возможных перемещений образца. В таком положении регистрировалась голограмма исходного состояния исследуемого элемента. Изменяя уровень нагружения в реальном масштабе времени, регистрировались картины интерференционных полос, характеризующие качество сварного образца. Типичные интерференционные картины полос исследуемых плоских элементов приведены на рис. 8. На рис. 8, а показана локализация и искривления картины полос на участке непровара по толщине, на рис. 8, б представлена картина полос на участке отклонения от прямолинейности сварного шва и на рис. 8, в приведена картина полос на участке остановки сварочного источника.

Выполненные эксперименты показали принципиальную возможность использования hologрафического метода, основанного на применении портативных hologрафических устройств для неразрушающего контроля качества сварных соединений в условиях космоса. Например, в случае ремонтной сварки технологических трубопроводов орбитальной станции. Голографический контроль качества выполняется в следующей последовательности. Астронавт после выполнения сварки труб для контроля качества использует малогабаритный hologрафический прибор, который он с помощью держателя-зажима устанавливает на трубе в контролируемой зоне сварного шва. При этом малогабаритный лазерный источник находится на борту космической станции. С помощью световодов лазерный свет передается в контролируемую зону сварного шва. Регистрируется интерферограмма сварного шва и изображение передается на монитор бортового компьютера, в памяти которого записан эталон интерференционной картины полос трубчатого образца (рис. 9). Компьютер сравнивает эталон с интерференционной картиной контролируемого сварного шва. В случае наличия дефекта компьютер дает команду о том, что шов некачественный, либо подтверждает его качество. При этом полученную информацию можно также передать на Землю. Возможен также вариант визуального сравнения оператором на мониторе эталона с интерферограммой исследуемого шва. Это можно выполнить без использования компьютера.

Эффективность, надежность полученной инфор-

мации, экологическая чистота и безопасность эксплуатации открывают реальные возможности создания в ближайшем будущем портативного hologрафического инструмента для неразрушающего контроля качества и определения напряженного состояния элементов конструкций орбитальных станций в условиях космоса.

- Вест Ч. Голографическая интерферометрия. — М.: Мир, 1982.—504 с.
- Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. — М.: Мир, 1986.—327 с.
- Касаткин Б. С. (ред.) Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие. — Киев.: Наук. думка, 1981.—583 с.
- Кольбер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голограмма. — М.: Мир, 1973.—686 с.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Онищенко Ю. И., Нехотящий В. А. Неразрушающий hologрафический контроль качества сварных сосудов высокого давления // Автомат. сварка.—1993.—№ 10.—С. 27—30.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Ткачук Г. И., Томашевский Р. В. Применение hologрафической интерферометрии для неразрушающего контроля качества сварных элементов. // Автомат. сварка.—1989.—№ 1.—С. 38—42.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Ткачук Г. И., Черкашин Г. В. Голографический контроль качества сварных соединений полимерных материалов // Автомат. сварка.—1986.—№ 1.—С. 29—32.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Черкашин Г. В. и др. Остаточные напряжения в сварных соединениях материала типа АБМ // Автомат. сварка.—1992.—№ 7—8.—С. 3—5.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Шаталова Л. П., Ткачук Г. И. Напряженное состояние сварных соединений стали 20Х3МВФ с никелевыми сплавами // Автомат. сварка.—1993.—№ 4.—С. 8—10.
- Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия. — М.: Наука, 1977.—339 с.
- Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. — М.: Наука, 1988.—248 с.
- Самойлов Г. С. (ред.) Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник. — М.: Машиностроение, 1976.—456 с.
- Эрф К. (ред.) Голографические неразрушающие исследования. — М.: Машиностроение, 1979.—448 с.

SOME EXPERIENCE GAINED BY THE E. O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE IN THE APPLICATION OF HOLOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF QUALITY OF WELDED STRUCTURE ELEMENTS EMPLOYED UNDER THE OUTER SPACE CONDITIONS

B. Ye. Paton, L. M. Lobanov, and V. A. Pivtorak

We describe the application of the holographic interferometry to the quality control and determination of residual stresses in the welded structure elements which are used in aerospace engineering. The feasibility of application of the optical holography method to the quality control of welded tubular elements under the outer space conditions is discussed.