

УДК 535.8, 539.3

**А. Ю. Попов*, А. В. Тюрин*, Ю. Б. Шугайло*,
А. Р. Гохман**, В. К. Жуковский****

*НИИ физики Одесского национального университета им. И.И.Мечникова

**Одесский педагогический университет

ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT5-1 МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Рекомендовано до друку науковим семінаром

НДІ фізики при ОНУ 02.02.2000

Описується голографічний метод дослідження механічних параметрів, виявлення механічної напруги й структурних неоднорідностей, а також пов'язаної з ними анізотропії властивостей у пластинах титанового сплаву VT5-1. У якості збуджуючої дії застосовані нагрівання та механічне навантаження. Розроблено оригінальний демпфуючий утримувач зразків і програма аналізу інтерферограм. Показана можливість наявності у наданому матеріалі від'ємної компоненти у коефіцієнті Пуассона.

Описан голографический метод исследования механических параметров, обнаружения механических напряжений и структурных неоднородностей, а так же связанной с ними анизотропии механических свойств, в пластинах титанового сплава VT5-1. В роли возмущающего воздействия использовались нагрев и механическая нагрузка. Разработан оригинальный демпфирующий держатель образцов и программа анализа интерферограмм. Показана возможность наличия в данном материале отрицательных компонентов в коэффициенте Пуассона.

Method for testing of titanium plates mechanical parameters, non-homogeneity and presence of mechanical stresses is described. Two expositions holography interferometrical method with central point heating and mechanical pressure as disturbing influence was used original damping holder of samples was constructed. Algorithm for interferograms analysis was worked out. The possibility of presence of negative components in Poisson factor in an VT5-1 alloy was shown.

Введение. К применяемым и разрабатываемым в настоящее время методам контроля параметров листовых материалов, в частности титановых сплавов (проверка однородности и изотропности материала, наличия механических напряжений, определения механических характеристик и т.д.), предъявляются следующие основные требования: метод должен быть неразрушающим, предпочтительно бесконтактным, обладать достаточной чувствительностью и разрешающей способностью, позволять исследовать образцы значительного размера и допускать автоматизацию процесса измерений. Выполнение этих требований дает возможность организовать поточную проверку всех материалов, идущих в производство. Эта задача актуальна, поскольку наличие неоднородностей и механических напряжений ведет к снижению прочности, короблению материалов и технологическому браку.

Во многих случаях наиболее информативными, а часто и единственно возможными являются интерференционные методы [1] - традиционные и голографические. С их помощью можно контролировать такие параметры как толщина, неплоскостность, прогиб, наличие структурных неоднородностей, механических напряжений и др. Важным преимуществом этих методов является то, что они позволяют исключить сканирование - вся поверхность пластины может контролироваться одновременно. Это в сочетании с телевизионным вводом информации в компьютер позволяет осуществить экспрессный и полностью автоматизированный процесс измерений.

1. Описание экспериментальной установки. Нами был создан прототип установки, позволявшей выполнять целый комплекс интерферометрических и голографических измерений. Размерность изображения интерферограммы образца, передаваемого телекамерой в компьютер, составляла 200×320 точек, число градаций яркости - до 64. После фильтрации от случайных шумов изображения интерферограмм обрабатывались по разработанным нами алгоритмам. Скорость тестирования интерферограмм образцов зависит от мощности используемого компьютера, и может составлять менее секунды. Основная задержка при проведении голографического тестирования связана с процессами химической обработки голограмм, но при использовании фототермопластической камеры она может быть снижена до нескольких секунд, и в этом случае установка может быть использована для диагностики изделий непосредственно в поточном производстве.

Для обнаружения и визуализации наличия внутренних структурных неоднородностей и механических напряжений наилучшим является метод двухэкспозиционной голографической интерферометрии. При применении его для тестирования тонких листовых материалов необходимо решить проблему крепления - образцы должны быть достаточно стабильными для голографирования, но при этом крепление не должно приводить к появлению внешних напряжений в образце, маскирующих картину собственных внутренних напряжений. Разработанное нами специальное демпфирующее крепление [1] удовлетворяло поставленным условиям и позволяло анализировать образцы размерами до $0,5 \times 0,5$ м. Следующей важной проблемой является выбор оптимального межэкспозиционного воздействия.

В литературе известно много методов выявления внутренних механических напряжений материала - методы отверстий, канавки, снятия слоев, например в [2] изложена методика определения остаточных сварочных напряжений на основе голографической регистрации полей перемещений, вызванных вдавливанием шарика в исследуемую металлическую поверхность. Недостатком этих методов является то, что они не являются неразрушающими. Кроме того, использование этих методов связано с дополнительными трудностями. Необходимо обеспечить возможность изъятия объекта из голографической схемы для механического воздействия на него между экспозициями и затем возвращения его в исходное положение с микронной точностью. Необходимо отметить также большую трудоемкость и длительность экспериментов.

2. Описание методики экспериментов и полученных результатов. Нами же используется метод, лишенный указанных недостатков, в котором в качестве тестирующего возмущения используется центральный точечный нагрев образцов [1,3]. В этом случае в образце возникает градиент температур, что вызывает коробление всего образца, характер которого, вообще говоря, зависит от всего комплекса механических и термических свойств исследуемого материала, а также его геометрии. Если образец центрально симметричен, достаточно однороден и изотропен по своим механическим и тепловым свойствам и в нем отсутствуют внутренние напряжения, то и возникающая в результате нагрева деформация образца также будет центрально-симметричной, например, для круглого образца интерференционная картина будет представлять собой систему концентрических колец (Рис. 1а). На Рис. 1б показан профиль (ΔZ) деформации образца, восстановленный из интерферограммы по разработанным нами алгоритмам.

Любые нарушения такой центрально - симметричной картины свидетельствуют о дефектности образца, наличии в нем структурных неоднородностей, механических напряжений и др. На Рис.2 показана интерферограмма образца, содержащего такие дефекты.

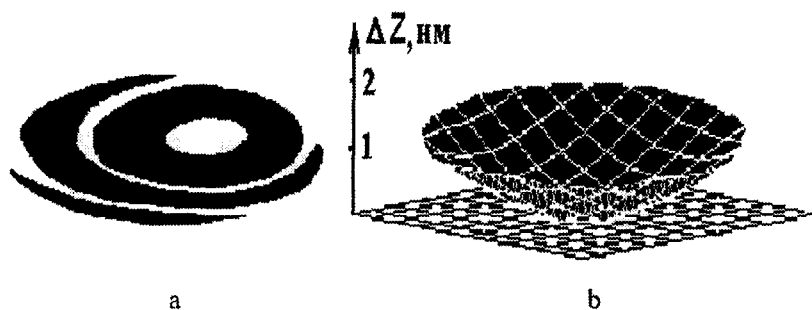


Рис.1. Отфильтрованная интерферограмма (а) и восстановленный по ней профиль коробления (b) однородного образца титанового сплава BT5-1 круглой формы

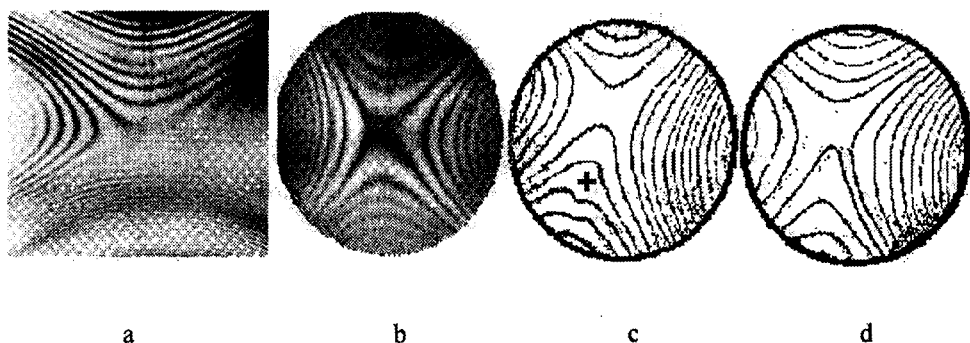


Рис.2. Интерферограммы образца титанового сплава BT5-1, (а) и (b) – исходные, (с) и (d) – после цифровой фильтрации.

- (а) Исходный образец - лист размером 200 x 300 мм;
- (b) он же, после вырезания из него диска диаметром 200 мм;
- (с) после создания точечного дефекта (вдавливании стального шарика диаметром 5мм на глубину 0,5 мм);
- (d) состояние (с) через 2 недели

Величина нагрева, необходимого для визуализации дефектов, зависит от многих параметров - толщины и размеров образца, теплопроводности, коэффициента теплового расширения материала и т.д. Для фольгированного гетинакса и текстолита она составляла 1,5-3⁰С [1], для кремниевых шайб 80-100⁰ [3]. В исследованных нами образцах титанового сплава BT5-1 необходимый нагрев составил 5-20⁰. Такой нагрев, конечно, не приводил к изменению свойств образцов, и данный метод можно считать в полной мере неразрушающим.

Как показали наши исследования, интерферограммы дефектных образцов практически не менялись на протяжении нескольких месяцев, что свидетельствует об устойчивом характере отклонений в однородности свойств образцов. В пользу этого свидетельствует также следующее. Путем вдавливания стального шарика диаметром 5 мм на глубину 0,5 мм в образцах титанового сплава BT5-1 создавались точечные дефекты, связанные с деформацией образца. На интерферограмме (Рис.2с) видно, что в месте создания дефекта (отмечено крестом), несколько интерференционных полос деформируется, но общая их картина остается неизменной. Это свидетельствует о локальном характере возникающих напряжений. При повторном измерении через 2 недели (Рис.2d) интерференционная картина вернулась к своему первоначальному виду, локальные напряжения, вызванные внешним воздействием, исчезли. Эти данные позволяют судить также и о пластичности и упругости исследуемого материала.

Для однозначной интерпретации полученных интерферограмм неоднородных образцов, т.е. для определения того, чем вызвана анизотропия образца - внутренними

механическими напряжениями или другими причинами, например наличием структурных неоднородностей, необходимо привлекать дополнительную информацию, проводить комплексное исследование материала, включая исследование тепловых и механических характеристик, рентгено-структурный анализ и т.д. Такое полное исследование трудоемко и дорого, но часто необходимо, (в настоящее время нами ведется разработка методики такого полного анализа). Одной из трудностей является необходимость учитывать геометрию образца. Впрочем, как показали наши исследования, при данной методике снятия интерферограмм форма листовых образцов оказывает слабое (по сравнению с другими возмущающими факторами) влияние на характер интерференционной картины, по крайней мере, на достаточном удалении от краев однородного образца интерференционная картина имеет такой же центрально-симметричный вид (Рис.3), как и в случае однородного образца круглой формы (Рис.1а). Следовательно, при достаточно больших размерах образца (сравнительно с его толщиной) форма, вероятно, оказывает слабое влияние и на процессы коробления неоднородных образцов, и они обусловлены внутренними параметрами. Это подтверждается также и экспериментами, описанными ниже.

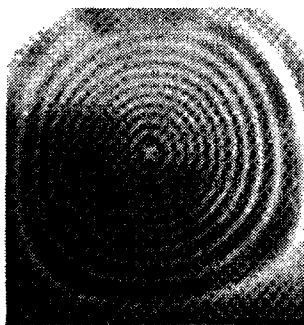


Рис.3. Интерферограмма однородного образца квадратной формы размерами 20х20 см

Даже не прибегая к полной методике анализа, часто удается сделать конкретные заключения, базируясь на достаточно простых соображениях. Продемонстрируем это на основе анализа образца, показанного на Рис.2а.

Интерферограмма этого образца демонстрирует явную анизотропность, деформация при центральном точечном нагреве имеет седлообразную форму, ее причинами могут быть:

- 1) прямоугольная форма образца;
- 2) наличие внутренних напряжений, связанных с деформацией образца;
- 3) анизотропия механических и тепловых характеристик, связанная со структурной неоднородностью образца.

Для проверки первого предположения из исходного образца был вырезан диск диаметром 200 мм с центром в точке нагрева, однако интерференционная картина при этом существенно не поменялась (Рис.2б).

Что касается второго предположения (наличия внутренних напряжений), то оно маловероятно в данном образце в силу следующих причин. Во первых, наблюдаемая несимметричная интерференционная картина стабильна во времени, хотя локальные тестовые напряжения, создаваемые в образце (Рис.2с), рассасываются достаточно быстро (Рис.2д). Во вторых, отжиг (проведенный на образцах меньшего размера, для обеспечения однородности температуры образца в процессе отжига), при $T=800^{\circ}\text{C}$ в течение 4 часов не привел к существенному изменению интерференционной картины, хотя заметно некоторое снижение частоты интерференционных полос после отжига, что свидетельствует об увеличении однородности образца.

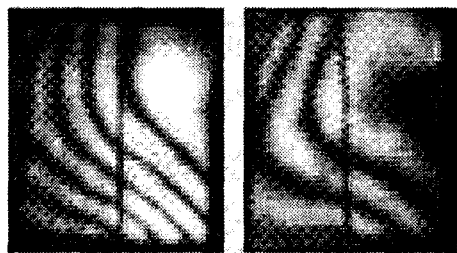


Рис.4. Интерферограмма образца квадратной формы размерами $40 \times 40 \times 3,2$ мм до и после отжига при $T=800^\circ\text{C}$ в течение 4 час

Поэтому наиболее вероятным оказывается третье предположение – наличие структурных неоднородностей в материале, что и вызывает анизотропию механических и тепловых характеристик. Для его проверки были проведены измерения распределения поля температур по поверхности образца (Рис.5), и была обнаружена явная вытянутость в направлении прокатки (ось X, совпадающая с горизонтальным направлением на Рис.2), что, очевидно, объясняется вытянутостью микrokристаллов, и, следовательно, большей их теплопроводностью в этом направлении.

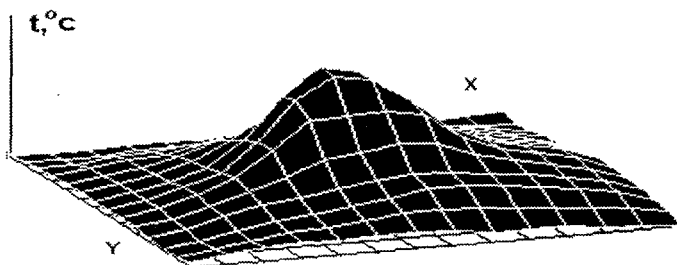
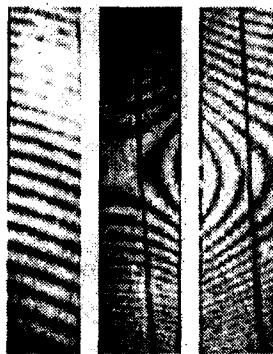


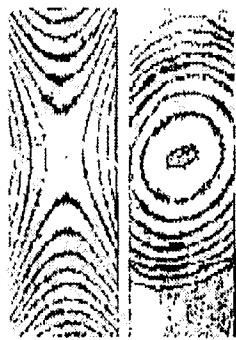
Рис.5. Распределение поля температур по поверхности образца титанового сплава BT5-1 размером 200×300 мм при центральном точечном нагреве, максимальная величина которого составила 6°C . Интерферограммы данного образца показаны на Рис.2, а и б

Предполагаемая анизотропия механических свойств выражалась также и в том, что значения модуля Юнга, измеренные вдоль и поперек направления прокатки образца, отличались друг от друга.

Определение численных значений механических параметров является отдельной проблемой при расшифровке интерферограмм, поскольку их необходимо указать с достаточной точностью для данного конкретного образца, следовательно, справочные данные для этой цели заведомо не пригодны. Для определения этих параметров существуют стандартные способы, однако в данном случае предпочтительным является также использование методов голографической интерферометрии, как в силу их точности, так и в силу того, что измерения проводятся при деформациях, величина которых сравнима с возникающими в опытных условиях. Поэтому модуль Юнга в данной работе определялся следующим образом: прямоугольная пластинка материала жестко закреплялась одним концом, а другой подвергался действию механической нагрузки. Интерференционная картина, возникающая при такой деформации, и по анализу которой определялся модуль Юнга, показана на Рис.6а. Значения модуля Юнга, как было указано выше, оказались различными в зависимости от ориентации к направлению прокатки ($E_0 = [1,11 \pm 0,01] \times 10^{11}$ Па; $E_{45} = [1,13 \pm 0,01] \times 10^{11}$ Па; $E_{90} = [1,15 \pm 0,01] \times 10^{11}$ Па).



а б с
Рис.6



а б
Рис.7

Еще более полезными методы голографической интерферометрии оказываются при определении более сложных механических характеристик анизотропного материала, например коэффициента Пуассона, процесс определения которого, как известно, отличается большой сложностью.

Коэффициент Пуассона анизотропного тела есть [4]

$$\nu_{xy} = -\varepsilon_{yy}/\varepsilon_{xx} = -S_{yyxx}/S_{xxxx}$$

Где x и y - произвольные взаимоперпендикулярные направления, ε_{yy} , ε_{xx} - продольная и поперечная упругие деформации в условиях одноосного напряженного состояния, S_{yyxx} , S_{xxxx} - компоненты тензора упругих податливостей в системе координат $хуz$. В работе [5] показано, что значения ν_{xy} могут меняться в зависимости от ориентации оси x . Они обладают наибольшей анизотропией, когда x совпадает с $\langle 011 \rangle$ и, например, для анизотропных ГКЦ- кристаллов никелевого сплава изменяется от 0,65 до -0,06 [5]. Наличие отрицательных компонентов является нетривиальным, поскольку тогда при одноосном растяжении вместо сокращения поперечных размеров мы должны наблюдать их расширение. До сих пор это явление наблюдалось только в монокристаллах, обладающим большим фактором анизотропии, однако нет оснований считать, что оно не может наблюдаться в ориентированных поликристаллических средах. Трудность заключается в его регистрации, поскольку данный эффект находится за гранью чувствительности обычных тензометрических датчиков.

Однако, как показано в работе [6], наличие отрицательных моментов можно установить интерферометрическим методом, подвергая между экспозициями исследуемую пластину действию изгибающего момента. Тогда, при $\nu_{xy} > 0$ интерференционная картина должна иметь вид семейства гипербол (как показано на Рис.7а), а при $\nu_{xy} < 0$ - семейство вложенных друг в друга эллипсов (Рис.7б), при этом среднее значение ν_{xy} определяется как $-a^2/b^2$, где a и b - полуоси эллипсов в направлениях x и y соответственно.

В наших экспериментах при тестовом воздействии изгибающего момента мы получили картины как первого (Рис.6б), так и второго вида (Рис.6с), в зависимости от ориентации образца. Это может свидетельствовать о наличии отрицательных моментов коэффициента Пуассона ν_{xy} в данных поликристаллических образцах. Однако такой вывод нуждается в дальнейшей проверке на большом количестве бездефектных образцов. В первую очередь необходимо иметь твердую уверенность в отсутствии внутренних напряжений в образце и в однородности механических параметров по поперечному сечению образца, т.к. их наличие может исказить (деформировать) интерференционную картину, что, по-видимому, и наблюдается на Рис.6, б и с.

Закключение. Полученные результаты дают основание считать, что предлагаемый голографический метод может быть успешно использован для определения механических параметров, а так же для диагностики однородности структурных, механических и термических свойств листовых материалов, в частности проката титанового сплава BT5-1. Метод является неразрушающим и позволяет обнаруживать структурные неоднородности, анизотропию механических и тепловых свойств по всей поверхности образца. Важным является также то, что этот метод позволяет достаточно просто и с высокой точностью определять коэффициент Пуассона данного материала. Достигаемая точность достаточна даже для регистрации наличия отрицательных компонент в коэффициенте Пуассона.

1. Ганин Ю.Г., Жеру И.И., Мандель В.Е., Неклюдов В.А., Попов А.Ю., Ротару В.К., Тюрин А.В.. Голографическая интерферометрия поверхности композиционных диэлектриков при нагреве // Известия Российской АН, сер. физическая.- 1992.- Т. 56, №4.- С. 206-209.
2. Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Игнатьев А. Г., Зарезин А. А. Исследование остаточных сварочных напряжений методом голографической интерферометрии // Сварочное производство.- 1998.- №5.-С. 105-109.
3. Мандель В.Е., Попов А.Ю., Попова Е.В., Тюрин А.В., Шугайло Ю.Б. Определение параметров и дефектности кремниевых пластин интерферометрическим методом // Оптический журнал.- 1995.- № 1.- С. 71-74.
4. Li Y., Chung D.Y.. // Phys.Stat.Sol.-1978.-vol 46.- P. 603-610.
5. Светлов И.Л., Епишин А.И., Кривко А.И., Самойлов А.И., Одинцев И.Н., Андреев А.П.. Анизотропия коэффициента Пуассона монокристаллов никелевого сплава" // Заводская лаборатория.- 1987.- С. 1372-1375.
6. Yamaguchi I., Sato H. // Japan J.Appl.Phys.- 1969.- vol.8.- P.678-771.