

## СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Г.Р. Дрмеян<sup>1</sup>, А.О. Абоян<sup>2</sup>, С.Г. Агбалян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ширакский государственный университет им. М. Налбандяна*

<sup>2</sup>*Национальный политехнический университет Армении*

Изучены различные физические методы испытаний и исследований физико-механических свойств материалов. Проведен анализ традиционных методов на основе разнообразных физических явлений, в результате чего существующие методы усовершенствованы и разработаны принципиально новые методы испытания материалов с использованием новейших достижений физики и материаловедения. Описаны сущность приведенных методов, структура и принцип работы используемых приборов, в частности, схем стилоскопа и стилометра в методах структурного и спектрального анализа; пирометров с дифференциальными термопарами в методе термического анализа; прибора для радиографического анализа; магнитного дефектоскопа с индукционными действиями в пондеромоторном методе при магнитном анализе для установления наличия внутренних дефектов в деталях; ультразвукового дефектоскопа, а также схемы ультразвукового импульсного отражательного дефектоскопа. Рассмотрены структура и принцип работы индуктивного тензометра для измерения деформаций при тензометрировании. Описаны поляризационно-оптический метод исследования, усовершенствованный метод электрического моделирования, метод рентгеновской дефектоскопии, в частности, рентгеноинтерферометрический метод интерпретации изображения дефектов, метод двукратных трех- и четырехкристальных интерферометров, метод трехкратных трех- и четырехкристальных интерферометров. Показано, что интерферометрические топографические картины зависят от ориентации отражающих плоскостей; однозначная интерпретация изображения дефектов значительно облегчается, когда интерферограммы получены с помощью кратных интерферометров, и кратные интерферометры дают более полное описание деформированного состояния кристаллов. Экспериментально доказано, что интерференционные картины, полученные от одного и того же кристалла с помощью семейств симметрично-эквивалентных плоскостей, будут одинаковыми только в том случае, когда кристаллы интерферометра идеальны. Показано, что в четырехблочном интерферометре попарное наложение дифрагированных пучков приводит к трем различным по контрасту муаровым полосам, а при наложении трех пучков контраст муаровых картин сильно уменьшается.

**Ключевые слова:** пирометр, магнитный дефектоскоп, ультразвуковой дефектоскоп, тензомер, рентгеновский дефектоскоп, интерферометр.

**Введение.** В современной технике используются большие скорости движения, высокие давления и температуры; детали машин и конструкций часто работают в условиях быстроизменяющихся нагрузок; находят применение все более разнообразные материалы. В связи с этим техника испытания материалов приобретает особо важное значение. Применение разнообразных физических явлений для решения сложных задач испытания материалов, деталей и конструкций является составной частью технического прогресса [1]. На современном этапе научно-технического прогресса рентгенографические исследования приобрели большую актуальность для решения глобальной проблемы материаловедения - создания материалов с заранее заданными свойствами. Вопросы дефектообразования и влияния дефектов на физико-химические свойства материалов на протяжении многих лет являются одной из центральных проблем как для материаловедения, так и для физики твердого тела.

Все шире в технику испытаний входят новейшие достижения физики, что приводит к разработке принципиально новых методов. Существуют разные физические методы исследований физико-механических свойств материалов, однако они всегда требуют усовершенствования. Поэтому использование новейших достижений физики для усовершенствования техники испытания и разработки принципиально новых методов исследования физико-механических свойств материалов приобретает особо важное значение и является актуальной задачей материаловедения, чему и посвящена настоящая работа.

**Методы исследования.** Основными материалами для машиностроения являются сплавы металлов. В зависимости от требуемых свойств в эти сплавы вводят разнообразные легирующие присадки, оптимальное содержание которых часто нужно весьма строго выдерживать. Так, если в чугуне содержится хотя бы немного больше, чем 0,07% хрома, то его технологические свойства резко ухудшаются, но достаточно ввести в такой чугун всего 0,001% бора, как эти свойства тотчас восстанавливаются; если же количество бора превышает 0,03%, то это вновь приводит к ухудшению качества чугуна. Важно, чтобы количество примесей определялось с высокой точностью и достаточно быстро (например, в процессе плавки). Методы химического анализа оказываются бессильными перед такой сложной задачей. Поэтому в металлургической и металлообрабатывающей промышленности широкое распространение получил спектральный анализ, отличающийся постоянством относительной ошибки и высокой чувствительностью ( $10^{-5}\%$ ). Измерительные процессы при спектральном анализе можно полностью автоматизировать.

Для спектрального анализа используется дуговой или искровой разряд между двумя электродами, одним из которых является образец исследуемого

сплава, а другим — эталонный стержень из чистого материала (железо, медь, уголь и др.), при этом получают дисперсионный или дифракционный спектр.

Приборы для спектрального анализа делятся на визуальные (стилоскопы и стилометры) и фотографические (спектрографы).

Схема стилоскопа показана на рис. 1. Свет от дуги, горящей между эталоном 1 и образцом 2, проходит через оптическую систему стилоскопа.

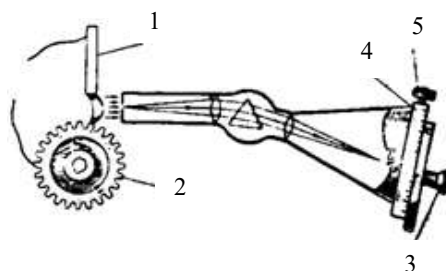


Рис. 1. Схема стилоскопа

Спектральные линии наблюдаются через окуляр 3, который можно перемещать по шкале длин волн 4 при помощи микрометрического винта 5. По длинам волн спектральных линий определяется качественный состав образца, а по интенсивности линии - количественное содержание примесей.

Интенсивность линии определяется методом фотометрирования путем сравнения с интенсивностью возможно более близких по длине волны эталонных линий. На рис. 2 приведена часть спектра стали, содержащей ванадий. Если интенсивность линии ванадия 1 равна интенсивности линий железа 2, 3 или 4, то ванадия в стали содержится соответственно 0,8%, 1,2% и 2%. При фотометрировании пользуются таблицами, составленными экспериментальным путем.

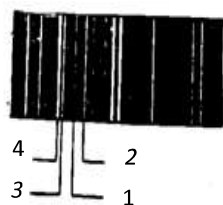


Рис. 2. Часть спектра стали, содержащей ванадий

Визуальный отсчет является субъективным и не может быть точным, однако этим методом все же определяется марка сплава, причем всего за 1...2 мин. Относительная простота прибора и особенности метода позволяют использовать стилоскоп для определения состава материалов непосредственно на машине или сооружении.

Стилومتر, схема которого приведена на рис. 3, отличается от стилоскопа наличием поляризационного фотометра, который состоит из двух дисков - поляроидов. Неподвижный поляроид скреплен с лимбом 1, а поворотный имеет кольцо 2 с риской. Поворотом подвижного поляроида достигается изменение интенсивности восприятия наблюдаемой линии. Шкала диска 1 по эталонным образцам градуируется непосредственно в процентах концентрации в сплаве

различных элементов. Длина волны исследуемой линии определяется по нониусной шкале 3.

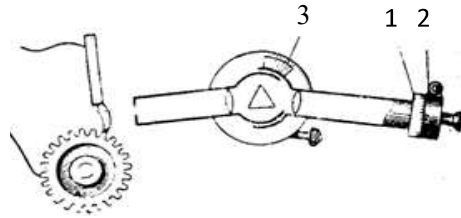


Рис. 3. Схема стилометра

Относительная погрешность этого метода равна 5...6%. Для определения одного элемента затрачивается всего 3...4 мин, что позволяет применять этот прибор для экспресс-анализа по ходу плавки.

В рассмотренных приборах используют лишь видимую часть спектра, что

позволяет применять стеклянную оптику.

В спектрографах производится фотографирование не только видимой, но и ультрафиолетовой области спектра, в связи с чем в них применяется кварцевая оптика. Количество спектральных линий при этом увеличивается, что повышает точность анализа. Положение линий на снимке спектра определяется с очень высокой точностью при помощи специального прибора – спектропроектора. Интенсивность линии определяется методом фотометрирования с помощью весьма точных специальных микрофотометров. Время определения одного элемента спектрографическим методом составляет 10...12 мин, а относительная погрешность снижается до 2%.

Существенным преимуществом описанных методов анализа по сравнению с химическим является возможность определения состава материала деталей без их повреждения.

Некоторые детали современных машин, такие как лопатки паровых и газовых турбин, поршни двигателей внутреннего сгорания и др., работают при высоких и колеблющихся температурах. Известно, что при изменении температуры в сплавах могут происходить фазовые превращения (переход из одной аллотропической модификации в другую, кристаллизация избыточного компонента, выпадение одного компонента из твердого раствора в случае его перенасыщенности при данной температуре и др.). В зависимости от скорости протекания таких фазовых превращений происходит закалка, отжиг или нормализация сплава, что может привести к резкому изменению его механических свойств. В связи с этим возникает необходимость предварительного определения возможных изменений свойств сплавов при их работе в данном тепловом режиме. Эта задача разрешается при помощи термического анализа.

При температуре фазового превращения расходуется энергия на изменение структуры. На графике нагрева (рис. 4) этому соответствуют горизонтальный

участок или перелом. При охлаждении обратный фазовый переход обычно совершается при меньшей температуре. Разность между указанными температурами зависит от скорости изменения температуры и определяет возможные изменения механических свойств материала. В некоторых случаях фазовые переходы сопровождаются такими незначительными энергетическими превращениями, что вызванные ими искривления графика изменения температуры становятся сравнимыми с искривлениями от случайных колебаний скорости нагревания.

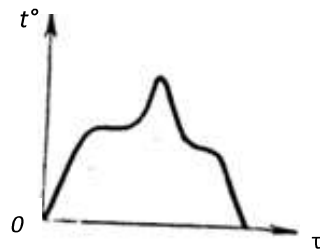


Рис. 4. График нагревания

Возможные по этой причине ошибки при термическом анализе устраняются применением пирометров с дифференциальными термопарами. На рис. 5 приведена схема такого пирометра, предложенного Н.С. Курнаковым. Образец из исследуемого материала 1 и эталон 2 в виде одинаковых полуцилиндров переложены прокладкой из асбеста 3 и “прибинтованы” друг к другу асбестовым шнуром или лентой. Эталон берется из материала, у которого в рассматриваемом интервале температур не происходит фазовых превращений; по удельной теплоемкости он должен быть близок к исследуемому материалу. В одинаковые отверстия, высверленные в эталоне и образце, помещаются одинаковые термопары 4 и 5, включенные навстречу друг другу. Зеркальный гальванометр  $G_1$  регистрирует своим лучом на обернутом светочувствительной бумагой или пленкой вращающемся барабане 6 температуру исследуемого образца. Гальванометр  $G_2$  включен в цепь обеих термопар, поэтому его зеркальце будет отклоняться только в том случае, когда температуры образца 1 и эталона 2 будут разными. При любых одинаковых и синхронных изменениях температуры обоих

термическом анализе устраняются применением пирометров с дифференциальными термопарами. На рис. 5 приведена схема такого пирометра, предложенного Н.С. Курнаковым. Образец из исследуемого материала 1 и эталон 2 в виде одинаковых полуцилиндров переложены прокладкой из асбеста 3 и “прибинтованы” друг к другу асбестовым шнуром или лентой. Эталон берется из материала, у которого в рассматриваемом интервале температур не происходит фазовых превращений; по удельной теплоемкости он должен быть близок к исследуемому материалу. В одинаковые отверстия, высверленные в эталоне и образце, помещаются одинаковые термопары 4 и 5, включенные навстречу друг другу. Зеркальный гальванометр  $G_1$  регистрирует своим лучом на обернутом светочувствительной бумагой или пленкой вращающемся барабане 6 температуру исследуемого образца. Гальванометр  $G_2$  включен в цепь обеих термопар, поэтому его зеркальце будет отклоняться только в том случае, когда температуры образца 1 и эталона 2 будут разными. При любых одинаковых и синхронных изменениях температуры обоих

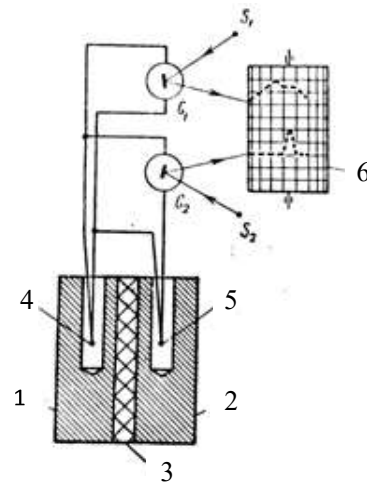


Рис. 5. Схема пирометра с дифференциальными термопарами

При любых одинаковых и синхронных изменениях температуры обоих

тел зеркальце гальванометра  $G_2$  отклоняться не будет (ЭДС обеих термопар при этом компенсируют друг друга).

На рис. 6 приведены графики термического испытания, причем кривая 1 записана гальванометром  $G_1$ , а кривая 2 -  $G_2$ . Пока в образце не происходило фазовых превращений, график 2 шел горизонтально, хотя температура образца повышалась, на что указывает наклон графика 1. В интервале времени, соответствующем промежутку между ординатами  $a$  и  $b$ , происходил фазовый переход в материале образца, на что расходовалась энергия, и поэтому образец имел температуру, меньшую, чем эталон. На кривой 2 этому процессу соответствует всплеск, по которому весьма точно можно определить время начала ( $a$ ) и конца ( $b$ ) фазового превращения, а по кривой 1 - соответствующие температуры. Случайные же колебания скорости нагревания не сопровождаются всплесками на графике 2 (участок  $b - z$ ). Для регистрации быстротекущих процессов (например, при исследовании закалки) в качестве индикаторов применяют малоинерционные струнные гальванометры или шлейфовые осциллографы.

Иногда фазовые переходы в сплавах сопровождаются таким малым тепловым эффектом, что его трудно заметить даже очень чувствительными пирометрами. Тогда применяют дилатометрический анализ, который основан на

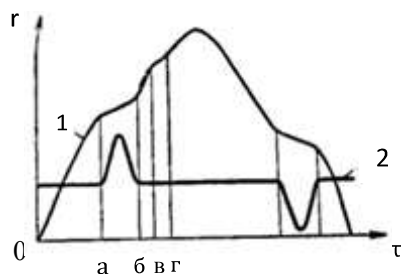


Рис. 6. Графики термического испытания (кривая 1 записана гальванометром  $G_1$ , а кривая 2 -  $G_2$ )

измерении незначительных изменений объема образца при фазовых превращениях. При этом также используют дифференциальный метод: измеряют одновременно изменения объема образца и эталона, изготовленного из специального сплава "пирос".

Дилатометры бывают с оптической и механической записью результатов измерений. Первые более чувствительны, но требуют установки на специальных фундаментах, предохраняющих от вибраций.

На рис. 7 приведен график результатов измерений с помощью дилатометра с механической записью. Обычно эталон из "пироса" в виде стержня помещают внутрь образца в виде трубки. Кривая 1 записана рычагом, соединенным с

эталоном, а кривая 2 - рычагом, соединенным с образцом. Уступы на кривой соответствуют фазовым 2 переходам. Так как температуры фазовых превращений в “пиресе” известны, можно по кривой 1

определить температуры фазовых превращений в исследуемом материале.

В последнее время широкое распространение получил радиографический анализ - просвечивание изделий излучением радиоактивных веществ. Наиболее

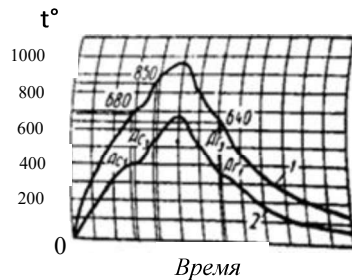


Рис.7. График результатов измерений с помощью дилатометра с механической записью

употребительными препаратами при этом являются эманация радия; торий и, чаще всего, мезаторий в количествах, эквивалентных 18,5 и 35 мг радия; используется их интенсивное  $\gamma$ -излучение. Препарат радия размещают в маленькую серебряную капсулу, которая помещается в алюминиевую колбочку объемом всего 30...50 мм<sup>3</sup>; мезаторий помещают в стеклянную ампулу, которую заключают в латунную трубочку. Препарат и кассету с фотопленкой ставят с разных сторон исследуемого изделия на расстоянии 40...60 см друг от друга, и получают на пленке отпечаток, на котором различимы внутренние неоднородности образца. Экспозиция при просвечивании стального изделия толщиной 150 мм составляет около суток. Для сравнения укажем, что при получении рентгеновского снимка того же изделия экспозиция должна составлять около пяти суток.

Широкое распространение в практике испытания материалов и изделий получил магнитный анализ [2], основанный на зависимости магнитных свойств сталей и чугунов от их химического состава и структуры, которая меняется при термической обработке и механическом наклепе. Поэтому магнитными измерениями можно контролировать качество обработки и устанавливать наличие внутренних дефектов в деталях. Важно, что при этом не повреждается даже поверхность детали. Магнитный метод позволяет заметить закалочные и шлифовочные трещины, шлаковые включения, газовые пузыри и поры, как находящиеся на поверхности детали, так и залегающие на небольшой (до 10 мм) глубине.

В так называемом пондеромоторном методе магнитный дефектоскоп движется вдоль намагничиваемого изделия 1 (рис. 8). При этом на участке, имеющем дефект, образуются аномалии в рассеивании магнитного потока. При

движении над ними дефектоскопа якорь 2 заставляет поворачиваться стрелку 3, которая замыкает цепь реле Р, и регистрирующее устройство (например, электрическая лампочка или звонок) отмечает наличие дефекта в изделии. В

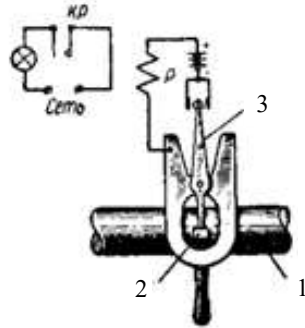


Рис.8. Схема магнитного дефектоскопа

магнитных дефектоскопах индукционного действия (на рис. 9 изображена схема рельсового дефектоскопа) электромагнит 1, питаемый переменным током от генератора 2, намагничивает изделие. Последовательно с электромагнитом 1 соединен электромагнит 3 компенсирующего устройства. Регистрирующая цепь состоит из катушки-датчика 4 и последовательно включенного с ней датчика-компенсатора 5. Эта цепь соединена со входом усилителя 6, к выходу которого присоединяют телефон (или другой индикатор, например, осциллограф-самописец). Электрические данные устройств 1, 3, 4 и 5 подбираются такими, чтобы при отсутствии дефектов в изделии в катушках 4 и 5 индуцировались равные, но противофазные ЭДС. В этом случае в телефоне 7 никакого звука не возникает. Если же электромагнит 1 и катушка-датчик 4 оказываются над участком, имеющим дефект, компенсация нарушается, и в телефоне слышен звук, высота тона которого соответствует частоте переменного тока, вырабатываемого генератором 2. Разновидностью магнитной дефектоскопии является обнаружение

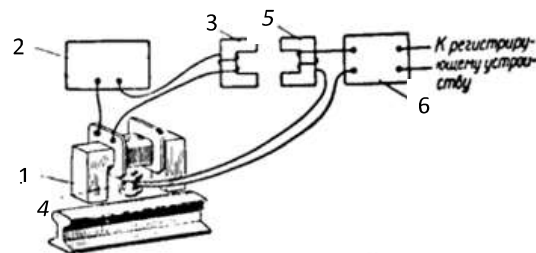


Рис.9. Схема рельсового магнитного дефектоскопа

дефектов в деталях из сталей и чугунов при помощи магнитного порошка. Намагниченную деталь погружают в суспензию, состоящую из жидкости (масло, керосин или водно-мыльный раствор) и магнитного порошка, взвешенного в ней. При этом на участках, имеющих дефекты, вследствие образования магнитной полярности порошок оседает. Таким способом наиболее четко обнаруживаются трещины, проходящие перпендикулярно направлению намагничивания детали.



Поэтому детали испытывают дважды, намагничивая их во взаимно перпендикулярных направлениях.

Магнитными методами [2] можно также определить твердость, толщину немагнитных покрытий, направление прокатки или волочения металлов и др.

Благодаря скорости получения результатов и высокой точности большое распространение получил радиотехнический метод изучения упругих свойств металлов, предложенный ученым Б.А. Остроумовым и основанный на использовании явлений магнито- или электрострикции. В образце из исследуемого материала электромагнитом, питаемым от генератора высокой и регулируемой частоты, возбуждают поперечные, продольные или крутильные колебания, амплитуду которых определяют при помощи индукционных, пьезоэлектрических или емкостных датчиков и соответствующих им усилительных и регистрирующих радиотехнических устройств. Определив резонансную частоту и зная размеры образца и плотность материала, можно вычислить модуль нормальной упругости, модуль сдвига, коэффициент поперечного сжатия, коэффициент внутреннего трения и др. Эти измерения производятся с весьма большой точностью (до 0,001%). Особенно удобны радиотехнические методы при исследовании усталостных явлений в сплавах, так как имеется возможность нагружать образец тысячи и даже десятки тысяч раз в секунду.

Для обнаружения дефектов, залегающих глубоко (до 10 м), применяется ультразвуковая (УЗ) дефектоскопия, основанная на возможности получения узких пучков ультразвука и отражении последнего от границы разнородных сред. Условия отражения ультразвука определяются уравнением

$$\frac{W_r}{W_i} = \left( \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \right)^2,$$

где  $W_r$  и  $W_i$  – соответственно энергии отраженного и падающего лучей;  $\rho_1$  – плотность среды, в которой распространяется ультразвук;  $\rho_2$  – плотность среды, от которой происходит отражение;  $v_1$  и  $v_2$  – соответственно скорость звука в первой и второй средах. Произведение  $\rho v$  называют акустической жесткостью среды. Она равна: для стали –  $4,54 \cdot 10^6$  г/см<sup>2</sup>с, для воды –  $0,145 \cdot 10^6$  г/см<sup>2</sup>с, а для воздуха – всего 4,26 г/см<sup>2</sup>с.

Чем больше различие акустических жесткостей сред, тем больше энергия отраженного луча; чем акустические жесткости смежных сред ближе, тем больше энергия луча, проходящего из одной среды в другую. Для возможно более полной передачи энергии от вибратора (обычно пьезокварцевой пластинки, возбуждаемой переменным высокочастотным напряжением) к

исследуемому телу необходимо пространство между ними заполнить жидкостью, акустическая жесткость которой близка к акустической жесткости этого тела; тончайшая прослойка воздуха явится непреодолимой преградой для ультразвука. Поэтому изделие и кварц часто полностью погружают в ванну с жидкостью (масло, керосин, ртуть и т.д.). Если УЗ луч встретит внутри изделия дефект, то он отразится от него. Расположение, размеры и форму дефекта можно определить методом просвечивания.

На рис. 10 приведена схема соответствующего УЗ дефектоскопа. От кварца 1 УЗ луч проходит в испытуемое изделие 2 и далее через линзу (из алюминия, плексигласа или полистирола) 3 в ванночку 4, освещенную боковым светом и наполненную ксилолом или другой жидкостью, в которой взвешены мельчай-

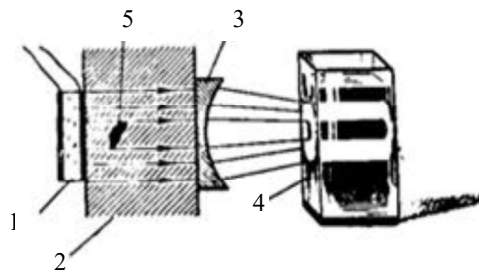


Рис.10. Схема УЗ дефектоскопа

шие алюминиевые чешуйки. Последние под влиянием ультразвука приобретают одинаковую ориентацию, что обеспечивает направленное отражение света от них. За дефектом 5 образуется УЗ тень, из-за чего в соответствующей части ванночки не происходит ориентации алюминиевых чешуек и направленного отражения света. Таким образом, дефект получает на

ванночке отображение в виде световой тени. Полученная картина может быть сфотографирована. Для определения точного местонахождения дефекта надо просветить образец по трем направлениям.

Если размеры дефекта соизмеримы с длиной волны ультразвука, то дифракционные явления затрудняют дефектоскопию. Чрезмерное же увеличение частоты приводит к тому, что дефектоскоп начинает отмечать не только дефекты, но и структурные неоднородности в металле. В связи с этим возможности дефектоскопа определяются с некоторой предельной частотой.

Наибольшее распространение получили УЗ импульсные отражательные дефектоскопы, принцип работы которых подобен принципу радиолокатора (рис. 11). Импульсы ультразвука кварцем 1 подаются к изделию. После отражения от дефекта и от задней поверхности детали они воспринимаются кварцем 2. С последнего импульсы электрического напряжения поступают на Y-вход электронного осциллографа 3, на экране которого наблюдаются всплески. Образование одного всплеска свидетельствует об отсутствии, а двух – о наличии

дефекта. По расстоянию между всплесками можно определить глубину залегания дефекта от задней грани детали.

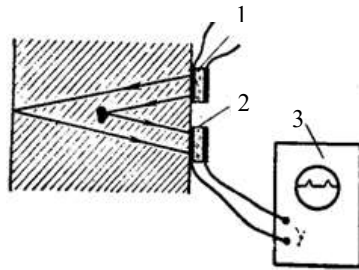


Рис.11. Схема УЗ импульсного отражательного дефектоскопа

при деформации последней рычаги перемещаются и меняется индуктивность катушки, что регистрируется специальным электронным устройством. Такие тензометры очень чувствительны (они отмечают деформации в несколько микронов на длине в 1 м).

Применяются также тензометры, в которых изменение расстояния между ножками приводит к изменению электрической емкости, сопротивления и др. По величине деформации и модулям нормальной упругости и сдвига можно вычислить напряжения.

Одновременное наблюдение распределения напряжений по всей детали обеспечивается применением поляризационно-оптического метода исследования [3]. Схема установки для поляризационного анализа приведена на рис. 12. Монохроматический свет источника 1 проходит через поляризатор 2 и падает на изготовленную из прозрачной пластмассы деформированную модель 3 исследуемой детали. В модели волна поляризованного света расщепляется на две, имеющие различные скорости; плоскости колебаний этих волн совпадают с плоскостями главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . При прохождении через модель за счет разности скоростей между волнами возникает линейная разность ходов. После прохождения через анализатор 4 (второй

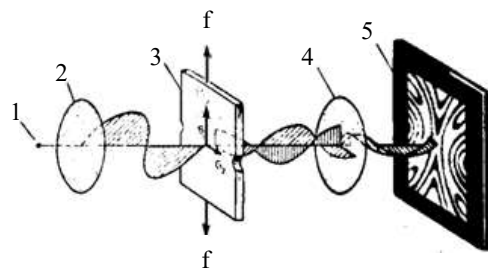


Рис.12. Схема установки для поляризационного анализа

при прохождении через модель за счет разности скоростей между волнами возникает линейная разность ходов. После прохождения через анализатор 4 (второй

Для определения механических напряжений в работающих деталях машин и сооружений применяется тензометрирование – измерение деформаций при помощи специальных приборов, называемых тензометрами. Широко применяются индуктивные тензометры [2]. В них концы двух рычагов (ножек) скрепляются с двумя точками детали;

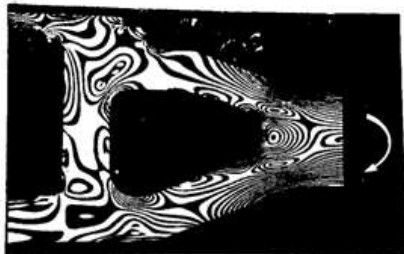
дetailed description of the optical setup. The diagram shows a light source (1) emitting a beam through a polarizer (2). The light then passes through a deformed plastic model (3) which acts as a waveplate. The light is split into two components with different velocities. It then passes through an analyzer (4) and is projected onto a screen (5) showing an interference pattern. Focal lengths 'f' are indicated for the lenses used in the setup.

поляроид) обе волны интерферируют. По густоте интерференционных полос на экране 5 можно установить относительное распределение напряжений, а также вычислить величину напряжения в любой точке.

При исследовании объемных моделей картины поляризации в плоскостях, параллельных экрану, накладываются одна на другую, и в результате становится невозможным однозначное определение распределения напряжений в каждой из этих плоскостей. Для преодоления указанной трудности используют так называемый метод “замораживания”. Он основан на применении фенолформальдегидных пластмасс, имеющих двухфазную структуру. Объемную модель из такой пластмассы нагревают до  $80...120^{\circ}\text{C}$ . При этом одна (большая по количеству) составляющая пластмассы сильно размягчается, а другая остается упругой. В таком состоянии модель нагружают, а затем (под нагрузкой) охлаждают; размягченная часть пластмассы становится упругой и удерживает в состоянии напряжения другую фазу. Далее модель разрезают на тонкие пластинки и исследуют каждую из них.

В последнее время созданы пластмассы, в которых даже очень малые напряжения вызывают заметные изменения оптических свойств. Их применение позволяет выяснить распределение напряжений, возникающих не только от действия внешних сил, но и за счет веса самой детали или сооружения.

На рис. 13 приведен снимок распределения поляризационных полос на участке модели рамы электровоза, изгибаемой моментом, показанным стрелкой.



*Рис. 13. Распределение поляризационных полос на участке модели рамы электровоза*

жины с податливостью  $\ell$ . Система снабжена демпфером  $K$ , вызывающим затухание колебаний.

На рис. 14б показана электрическая модель описанной механической системы. Здесь массе  $m$  соответствует индуктивность  $L$ , силе  $Q$  - напряжение  $U$ , податливости  $\epsilon$  - емкость  $C$ , а демпферу  $K$  - сопротивлению  $R$ .

Напряжения в деталях машин и сооружений могут быть определены и без применения механических моделей. Большие возможности в этом отношении представляет метод электрического моделирования.

На рис. 14 приведен пример механической конструкции; тело массой  $m$  оттягивается силой  $Q$  и затем начинает колебаться под действием пружины с податливостью  $\ell$ . Система снабжена демпфером  $K$ , вызывающим затухание колебаний.

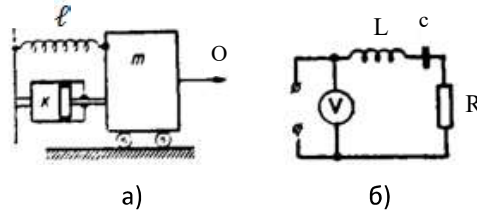


Рис. 14. Пример механической конструкции (а) и ее электрическая модель (б)

Электрические величины элементов модели рассматриваются между собой, как параметры моделируемой механической системы. На электрическую модель подают импульс напряжения, соответствующий в определенном масштабе прилагаемой к телу силе. Измеряя электрические напряжения и их изменения

во времени на различных участках модели, можно по аналогии вынести суждение о соответствующих усилиях и деформациях в деталях механической системы.

При контроле литья, вкладышей подшипников и сварных швов ряда конструкций широко применяют рентгеновскую дефектоскопию. С помощью рентгеновских лучей можно обнаружить трещины, раковины, газовые поры, рыхлость, непровары, шлаковые включения и другие дефекты (в медных изделиях толщиной до 60 мм, в изделиях из сплавов железа толщиной до 100 мм, а из алюминиевых сплавов – до 400 мм).

Большое распространение получил рентгеноструктурный анализ. Он основан на способности атомных плоскостей кристаллов отражать рентгеновские лучи. При этом

$$2d \sin \theta = k\lambda,$$

где  $\lambda$  - длина волны;  $d$  - расстояние между однородными плоскостями кристалла;  $\theta$  - угол отражения лучей данной плоскостью кристалла;  $k$  - целое число.

Рентгенограммы исследуются при помощи микрофотометра и позволяют определить тип и параметры кристаллической решетки. По ним можно установить наличие различных структурных составляющих, не различимых в отдельности при исследовании сплава другими методами; направление преимущественной ориентации кристаллов, возникшей при литье или механической обработке сплава, а также величину внутренних напряжений в металлах, возникающих в процессе их механической и термической обработки.

Наряду с рентгеноструктурным применяется также рентгеноспектральный анализ, основанный на том, что с возрастанием атомного номера исследуемого элемента смещаются с определенной закономерностью спектральные линии, хотя структура спектра не меняется. Этот вид анализа применим только к твердым телам. Для анализа по спектрам испускания исследуемый материал в

виде порошка наносится на антикатод рентгеновской трубки, и излучение исследуется с помощью спектрографа. Для проведения же анализа по спектрам поглощения излучение трубки, материал антикатада которой известен, пропускают через тонкую пластинку исследуемого сплава и далее – через оптическую систему спектрографа.

Важнейшим достижением в рентгеновских исследованиях следует считать создание рентгеновских интерферометров, служащих для изучения структурных несовершенств кристаллов неразрушающими рентгеноинтерферометрическими методами. Для изучения дефектной структуры кристаллов большое значение имеет высокая чувствительность муаровых полос к искажениям атомных плоскостей [4]. Интерференционные картины, полученные интерферометрами, называются муаровыми узорами или муарами.

Известно, что метод рентгенодифракционного муара является довольно тонким и точным методом определения количественных характеристик структурных нарушений совершенных кристаллов, обусловленных различными внешними воздействиями (нагрев, ионная имплантация, пластическая деформация и т.д.) на кристалл. Казалось бы, этот сверхчувствительный метод с большим успехом может быть применен для исследования малых структурных несовершенств (нарушений) почти идеальных кристаллов. Однако применение рентгеновских дифракционных муаровых картин для исследования структурных нарушений кристаллов сильно ограничивается из-за трудностей однозначной расшифровки этих картин, т.е. однозначного определения наличия и месторасположения деформированного участка. Поэтому более детальное исследование механизма возникновения рентгеновских дифракционных муаровых картин вообще и их исследование в зависимости от числа и характера волн, участвующих в интерференции, в частности, с целью их применения в исследованиях совершенств кристаллов, является актуальной задачей рентгеновской интерферометрии.

Применение рентгеноинтерферометрического метода в исследовании структурных дефектов в монокристаллах является важным достижением в области рентгеноструктурного анализа [5-9]. Известны различные рентгеноинтерферометрические методы исследования несовершенств кристаллов [10-15]. Интерферометрическое изображение несовершенств кристаллов в основном исследуется с помощью муаровых картин, возникающих в результате как относительных различий в ориентациях и межплоскостных расстояниях атомных плоскостей, так и под внешними воздействиями на частях кристаллов, через которые проходят интерферируемые волны [16-21]. Поэтому муаровые картины существенно зависят от ориентации отражающих плоскостей, т.е. картины, полученные от одного и того же интерферометра, при использовании

различных семейств отражающих плоскостей, имеющих разные ориентации, в общем случае должны отличаться друг от друга. Очевидно, что интерферограммы, полученные от одного семейства отражающих плоскостей, не дают полной картины несовершенств исследуемого кристалла. Следовательно, для более полного описания деформированного состояния кристаллов необходимо получить дефектограмму от одного и того же кристалла с помощью хотя бы двух или трех семейств атомных плоскостей, отличающихся ориентациями.

Так как муаровые картины представляют собой интерференционные узоры, вызванные полем деформации нарушений кристаллической решетки, то они дают возможность судить о них. Действительно, как известно, дифракционные изображения фактически являются картинами таких дефектов (или их частей), которые приводят к смещениям в направлении нормалей отражающих плоскостей. Другими словами, рентгеновские рефлексы реагируют на структурные дефекты только в том случае, когда деформационные сдвиги атомов, вызванные этими дефектами, перпендикулярны к атомным плоскостям, отражением от которых образуется данный рефлекс.

В интерферометрических исследованиях важными условиями являются расшифровка муаровых картин, полученных от одинарных интерферометров (одно семейство отражающих плоскостей), подбор и упрощение выражения для вычисления их периодов. Следовательно, основная задача рентгеноинтерферометрических методов исследования несовершенств кристаллов сводится к получению интерферометрических дифракционных изображений несовершенств кристаллов с большим разрешением и их однозначной интерпретации.

Ясно, что однозначная интерпретация изображения дефектов значительно облегчается, когда рентгенограммы получены симметричным отражением от семейств, имеющих одинаковые межплоскостные расстояния, т.е. принадлежащих одной и той же совокупности плоскостей - комплексу симметрично-эквивалентных плоскостей. Следовательно, для повышения эффективности интерферометрических исследований несовершенств кристаллов необходимо разработать новые методы, облегчающие расшифровку дифракционных картин. Итак, возникает острая необходимость разработки рентгеновской дифракционной полной стереометрической интерферометрии несовершенств монокристаллов, что и является целью этой части работы. Цель достигается с помощью кратных интерферометров.

Известны кратные интерферометры [22,23], где исследованы только двукратные двухкристальные интерференционные системы. Нами предложены новый рентгеноинтерферометрический метод и новые рентгеноинтерференционные системы, дающие более полное описание дефектной структуры.

Кратко представим экспериментальные методы стереометрического исследования несовершенств кристаллов с применением двух- и трехкратных, трех- и четырехкратных интерферометров.

**Экспериментальная часть.** С целью экспериментального исследования зависимости периодов муаровых картин (изображения несовершенств) от ориентации отражающих плоскостей были изготовлены специальные интерферометры (рис. 15-19), с помощью которых получены муаровые картины от отражающих плоскостей  $(1\bar{1}0)$ ,  $(\bar{1}01)$  и  $(0\bar{1}1)$ . Для получения муаровой топограммы от трехкратного интерферометра рентгеновские лучи направляем под углом Брегга на одно из трех семейств отражающих плоскостей интерферометра, регистрируя дифрагированное излучение, затем поворотом интерферометра на  $60^\circ$  получаем интерференционную картину от второго и третьего семейств.

**Метод двукратных трехкристальных интерферометров.** Так как все наши экспериментальные исследования были проведены на кремниевых образцах, имеющих кубическую сингонию, то угол между симметрично-эквивалентными плоскостями  $(110)$  и  $(1\bar{1}0)$  равен  $90^\circ$  (удобное сочетание для двукратного интерферометра). Нами были изготовлены трехкристальные двукратные интерферометры из кристалла кремния с такими отражающими плоскостями (рис. 15).

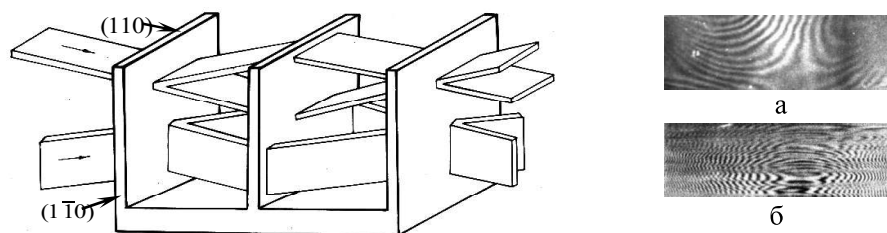


Рис. 15. Схема двукратного трехкристального интерферометра и ход лучей в нем: а - муаровая топограмма при отражении  $2\bar{2}0$ , б - муаровая топограмма при отражении  $220$

Для экспериментального исследования зависимости периода муаровых картин (изображения несовершенств) от ориентации отражающих плоскостей были изготовлены специальные интерферометры, с помощью которых получены муаровые картины от отражающих плоскостей  $(110)$  и  $(1\bar{1}0)$ . Один из этих



интерферометров показан на рис. 15. Как видно из этого рисунка, плоскости (110) перпендикулярны к большим поверхностям интерферометра и параллельны основанию интерферометра, а плоскости  $(1\bar{1}0)$  перпендикулярны как к большим поверхностям, так и к основанию интерферометра. Муаровые топограммы, полученные с помощью этого интерферометра от плоскостей (110) и  $(1\bar{1}0)$  с использованием вторых порядков отражений, приведены на рис. 15а и б соответственно. Как видно из этих рисунков, муаровые топограммы, полученные от одного и того же интерферометра, но с разными семействами отражающих плоскостей, совершенно не похожи друг на друга, что и можно было ожидать.

При этом необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства: вначале снимались муаровые топограммы для отражения  $(2\bar{2}0)$  (рис. 15а), а для отражения (220) (рис. 15б) интерферометр поворачивался относительно оси [001] на  $90^\circ$ . Причем рентгенодифракционная камера поворачивалась на  $90^\circ$ , а интерферометр поворачивался в противоположном направлении на тот же угол.

На рис. 15а показана интерференционная муаровая картина поля деформации дислокации, а на рис. 15б - картина, полученная в результате когерентного наложения линий сегрегации и муара дислокации. Детальное изучение этих топограмм показывает, что распределения деформаций, вызванных линией дислокации, расположенной в кристалле двукратного трехкристального интерферометра, отличаются друг от друга - они зависят от ориентации семейств симметрично-эквивалентных плоскостей относительно линии дислокации.

**Метод двукратных четырехкристальных интерферометров.** Известно, что многоблочные (четырёх- и пятиблочные) интерферометры более чувствительны к структурным нарушениям, так как в этих интерферометрах интерференционная картина получается путем наложения более двух волн, поступающих по различным каналам. Увеличение числа налагающихся волн обогащает информацию получаемых картин, но их трудно однозначно расшифровать. С целью более полного описания искажений кристаллических решеток и однозначной расшифровки их изображений нами был сконструирован и изготовлен из бездислокационного монокристалла кремния двукратный четырехблочный интерферометр с одинаковыми межблочными расстояниями (рис. 16). Как видно из рис. 16а, в этой системе действуют три интерферометра: интерферометр  $AB_1B_2C_2$ , для которого анализатором служит третий блок (точка

$C_2$ ), интерферометры  $AB_1V_2C_1C_2D_2$  и  $AB_1V_2C_2C_3D_3$ , для которых анализатором служит четвертый блок (точки  $D_2$  и  $D_3$ ). Первый из них ( $AB_1V_2C_2$ ) – элементарный, а два остальных – составные. Интерферометр  $AB_1V_2C_1C_2D_2$  состоит из интерферометров  $AB_1V_2C_2$  и  $V_1C_1C_2D_2$ , а интерферометр  $AB_1V_2C_2C_3D_3$  –  $AB_1V_2C_2$  и  $V_2C_2C_3D_3$ . Таким образом, фактически этот четырехблочный интерферометр состоит из пяти связанных друг с другом интерферометров. Такая система дает возможность исследовать муаровые

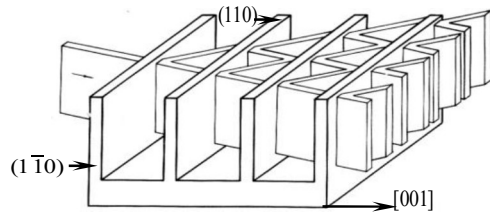


Рис. 16. Двукратный четырехблочный интерферометр и ход лучей в нем

картины, полученные при наложении двух и трех пучков. Действительно, точка  $D_2$  получает информацию по каналам:  $C_1D_2$  (волна, отраженная от точки  $C_1$ ),  $V_2D_2$  (волна, отраженная от точки  $V_2$  и участвующая в интерференции в точке  $C_2$ ),  $V_1C_2D_2$  (волна, отраженная от точки  $V_1$  и участвующая в интерференции в точке  $C_2$ ).

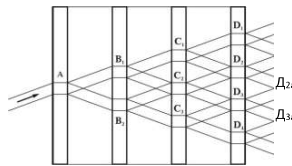


Рис. 16а. Интерферометры, действующие в системе, приведенной на рис. 16

Вначале получены интерференционные картины от указанного интерферометра для отражения  $2\bar{2}0$  (рис. 16б), а затем для отражения  $220$  (рис. 16в). Для исследования были выбраны в отражающих пучках линии  $D_{2a}$  и  $D_{3a}$  (рис. 16а), содержащие муаровые картины, полученные из составных интерферометров  $AB_1V_2C_1C_2D_2$  и  $AB_1V_2C_2C_3D_3$  соответственно. Фотоснимок линий  $D_{2a}$  и  $D_{3a}$  от отражения  $2\bar{2}0$  приведен на рис. 16б.

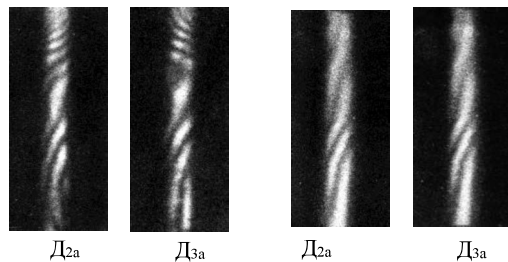


Рис. 16б. Фотоснимок линий  $D_{2a}$  и  $D_{3a}$  от отражения  $2\bar{2}0$

Рис. 16в. Фотоснимок линий  $D_{2a}$  и  $D_{3a}$  от отражения  $220$

Для получения муаровых картин от отражения  $220$  (рис. 16в) интерферометр поворачивался относительно оси  $[001]$  на  $90^\circ$ .

Как видно из рис. 16б и в, муаровые картины, полученные от одного и того же интерферометра, но с разными семействами отражающих плос-

костей, совершенно не похожи друг на друга, что и можно было ожидать.

**Метод трехкратных трехкристальных интерферометров.** Для более полного описания дефектной структуры необходимо увеличить кратность интерферометра, т.е. увеличить число семейств отражающих плоскостей, принадлежащих одному и тому же комплексу симметрично-эквивалентных плоскостей.

Известно, что угол между симметрично-эквивалентными плоскостями  $(1\bar{1}0)$  и  $(0\bar{1}1)$ , а также  $(0\bar{1}1)$  и  $(\bar{1}01)$  равен  $60^\circ$  (удобное сочетание для трехкратного интерферометра).

С целью экспериментального исследования зависимости периодов муаровых картин (изображения несовершенств) от ориентации отражающих плоскостей был изготовлен специальный трехкратный трехкристальный интерферометр (рис. 17), с помощью которого получены муаровые картины от отражающих плоскостей  $(1\bar{1}0)$ ,  $(\bar{1}01)$  и  $(0\bar{1}1)$ .

Для получения муаровой топограммы от трехкратного интерферометра рентгеновские лучи направляем под углом Брегга на одно из трех семейств отражающих плоскостей интерферометра, регистрируя дифрагированное излучение, затем поворотом интерферометра на  $60^\circ$  получаем интерференционную картину от второго и третьего семейств. На рис. 18а-в показаны топографические интерферограммы, полученные от трехкратного трехкристального интерферометра соответственно отражениями  $\bar{2}\bar{2}0$ ,  $\bar{2}0\bar{2}$  и  $0\bar{2}\bar{2}$  (излучение  $MoK_\alpha$ ).

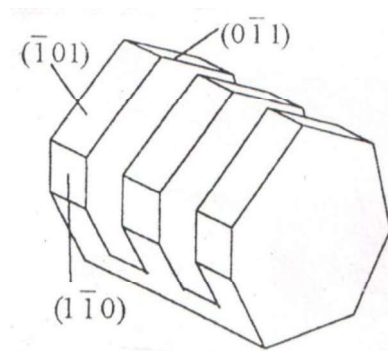


Рис. 17. Трехкратный трехкристальный интерферометр

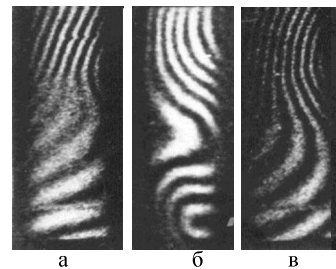


Рис. 18. Топограммы от трехкратного трехкристального интерферометра при отражении: а -  $\bar{2}\bar{2}0$ ; б -  $\bar{2}0\bar{2}$ ; в -  $0\bar{2}\bar{2}$

Сопоставлением полученных топограмм судим о несовершенстве структуры. Так, детальное исследование этих топограмм показывает, что распределения деформаций, вызванных линией дислокации, расположенной в одном из кристаллов интерферометра, отличаются друг от друга – они зависят от ориентации семейств симметрично-эквивалентных плоскостей относительно линии дислокации.

**Метод трехкратных четырехкристальных интерферометров.** Для однозначной расшифровки изображений деформированного участка в кристалле (блоке) интерферометра необходимо увеличить не только кратность, но и число кристаллов (блоков) интерферометра. Действительно, четырехкристальные интерферометры более чувствительны к структурным нарушениям, так как в этих интерферометрах интерференционная картина формируется путем наложения более двух волн, поступающих по различным каналам.

Такие интерферометры дают возможность исследовать зависимость видимости интерференционных картин от ориентации дефектов относительно отражающих плоскостей, а следовательно, позволяют иметь представление об ориентации линейных дислокаций и распределении точечных дефектов в кристалле. С этой целью нами был предложен специальный трехкратный четырехкристальный интерферометр (рис.19).

Сначала получаем муаровую секционную топограмму от отражающих атомных плоскостей  $(1\bar{1}0)$ , затем поворотом интерферометра на  $60^\circ$  вокруг оси, перпендикулярной к поверхности входа, получаем интерференционную секционную топограмму от плоскостей  $(\bar{1}01)$ . Далее поворотом еще на  $60^\circ$  получаем топограмму от плоскостей  $(0\bar{1}1)$  (рис. 20а-в).

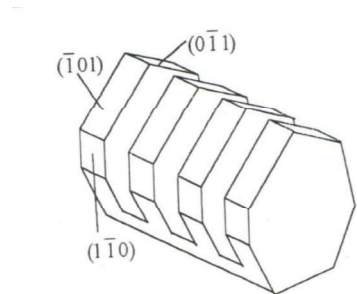


Рис. 19. Трехкратный четырехкристальный интерферометр

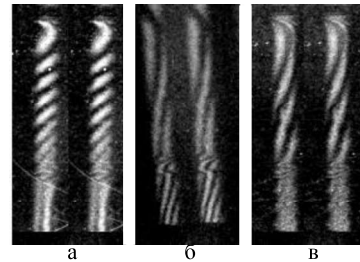


Рис. 20. Секционные интерферограммы от трехкратного четырехкристального интерферометра при отражениях: а -  $\bar{2}20$ ; б -  $\bar{2}02$ ; в -  $0\bar{2}2$

Для исследования были выбраны в отражающих пучках линии 3 и 6 (рис. 21), содержащие муаровые картины, полученные из составных интерферометров ЕНКJE и CGJFC соответственно.

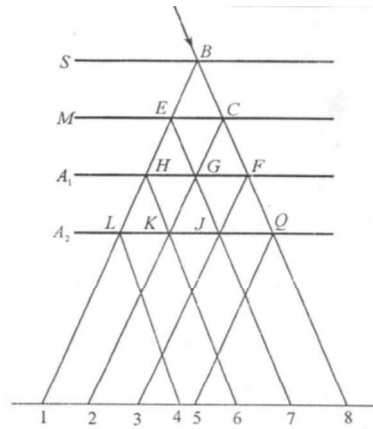


Рис. 21. Ход лучей в четырехкристальном интерферометре

Особого внимания заслуживает тот факт, что интерферометр, показанный на рис. 21, одновременно является и кратным интерферометром, и полиинтерферометром. Действительно, как видно из рис. 21, одновременно действуют несколько интерферометров: три трехкристальных (BCGEB), (CFJGC), (EGKHE) и два четырехкристальных (BEGJFCB), (BENKGCB). Это дает возможность, во-первых, исследовать тот же дефект (без изменения его ориентировки) с помощью разных интерферометров, в которых отражающие плоскости принадлежат одному и тому же семейству; во-вторых, закрытием путей разных дифракционных пучков исследовать зависимость видимости интерференционных картин от разницы амплитуд интерферирующих волн. Такие интерферометры дают возможность исследовать влияние числа волн, участвующих в интерференции, и зависимость этих картин от предыстории волн, участвующих в интерференции. Об этом будет подробно изложено в следующем сообщении.

#### **Выводы**

1. Проведен анализ традиционных методов на основе разнообразных физических явлений, в результате чего существующие методы усовершенствованы и разработаны принципиально новые методы испытания материалов с использованием новейших достижений физики и материаловедения. Описаны сущность приведенных методов, структура и принцип работы используемых приборов.

2. Интерферометрические топографические картины зависят от ориентации отражающих плоскостей.

3. Экспериментально доказано, что интерференционные картины, полученные от одного и того же кристалла с помощью семейств симметрично-эквивалентных плоскостей, будут одинаковыми только в том случае, когда кристаллы интерферометра идеальны. Действительно, при получении топограмм от отдельных кристаллов (блоков) двукратного трехкристального интерферометра в первом кристалле (блоке) выявлена дислокация.

4. Однозначная интерпретация изображения дефектов значительно облегчается, когда интерферограммы получены с помощью кратных интерферометров, что, в принципе, дает возможность судить о пространственной ориентации дефектов и распределении деформаций, вызванных этими дефектами.

5. Кратные интерферометры дают более полное описание деформированного состояния кристаллов. Одним и тем же двукратным интерферометром можно обнаружить и линии сегрегации, и полосы смещения, и муаровые картины различных несовершенств.

6. Кратные интерферометры позволяют выявить механизм образования контраста разных интерференционных картин. Показано, что в четырехблочном интерферометре попарное наложение дифрагированных пучков приводит к трем различным по контрасту муаровым полосам, а при наложении трех пучков контраст муаровых картин сильно уменьшается.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта №15 SH - 008.*

#### Литература

1. **Одинг И.А.** Современные методы испытания металлов.- М.: Металлургиздат, 1944.
2. **Гутенмахер Л.И.** Электрические модели.- М.: Изд. АН СССР, 1949.
3. **Фрохт М.** Поляризационно-оптический метод исследования напряжений.- Ч. 1 – 1948; ч. 2.– 1950.
4. **Lang A.R. and Miuscov V.F.**  $A^0$  Scale Displacements Revealed by X-Ray Moire Topographs // Appl. Phys. Let.- 1965.-V. 7, № 8.- P. 214-216.
5. **Bonse U., Hart M.** Moire Patterns of Atomic Planes Obtained by X-Ray Interferometry // Z. Phys.- 1966.– V. 1990.– P. 455-467.
6. **Hart M.** An Angstrom Ruler // Brit. J. Appl. Phys.– 1968.- V. 1.- P. 1405 – 1408.
7. **Creagh D.C., Hart M.** X-Ray Interferometric Measurements of the Forward Scattering Amplitude of Lithium Fluoride // Phys. Status Solidi.- 1970.-V. 37.- P. 753-758.
8. **Hart M.** A Complete Determination of Dislocation Burgers Vectors by X-Ray Interferometry //Phyl. Mag.- 1972.– V. 26.– P. 821-831.
9. **Bonse U., Graeff W. and Materlik G.** X-Ray Interferometry and Lattice Parameter Investigation // Revue de Physique Appliquee.– 1976.– V. 11.– P. 83-87.

10. **Bonse U., Hart M.** An X-Ray Interferometer with Bragg – Case Beam Splitter and Beam Recombination // *Z. Physik.*– 1966.– V. 194.– P. 1-17.
11. **Bonse U., Hart M.** Combined Laue and Bragg – Case X-Ray Interferometers // *Acta Cryst.*- 1968.- A24.- P. 240-245.
12. **Bonse U., Kaat E.** A Two – Crystal X-Ray Interferometer // *Z. Physik.*– 1968.– V. 214.– P. 16-21.
13. **Christiansen G., Gerward L., Lindegaard Andersen A.** A Study of the Strain Field of Growing Dislocation in a Silicon X-Ray Interferometer // *J. Appl. Cryst.*- 1971.– V. 11.– P. 370-375.
14. Operation of a Separated – type X-Ray Interferometer for Phase – Contrast X-Ray Imaging / **A. Yoneyama, A. Momose, E. Seya, et al** // *Rav. Sci. Instrum.*- 1999.– V. 70, №12.– P. 4582-4586.
15. Phase-contrast X-Ray Imaging with a Large Monolithic X-Ray Interferometer / **T. Takeda, A. Momose, Q. Yu, et al** // *J. Synchrotron Rad.*- 2000.- V. 7.- P. 280-282.
16. **Багдасарян Р.И., Балян М.К., Эйрамджян Ф.О.** Применение рентгеновского муара для исследования механических напряжений вокруг дефектов в монокристаллах // *Известия вузов. Физика.*– 1984.- № 4.- С. 8- 12.
17. **Дрмеян Г.Р.** Исследование полей деформаций в зависимости от температурного градиента, создаваемого в зеркальном блоке интерферометра // *Кристаллография.* - 2005.– Т. 50, №3.– С. 407-410.
18. **Эйрамджян Т.О., Алумян К.В., Белубекян Э.В.** Применение рентгеноинтерферометрических методов для исследования полей напряжений в монокристаллах, содержащих дислокации // *Известия ЕГУАС.*- 2007.- №1.- С. 65-66.
19. **Дрмеян Г.Р., Абоян А.О.** Рентгеноинтерферометрическое исследование структурных искажений, возникающих в полупроводниковых кристаллах под действием постоянных электрических полей // *Вестник Инженерной академии Армении.*– 2009.- Т. 6, №2.- С. 269-277.
20. **Дрмеян Г.Р., Абоян А.О., Эйрамджян Ф.О.** Рентгеноинтерферометрическое исследование полей деформаций в ионноимплантированных кристаллах кремния // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.*– 2011.- №2.- С. 57-60.
21. **Дрмеян Г.Р., Абоян А.О., Мовсисян А.А.** Рентгеноинтерферометрическое исследование полей деформаций в кристаллах кремния, возникающих под действием постоянного магнитного поля // *Поверхность.*– 2013.- №11.- С. 43-46.
22. **Абоян А.О., Хзарджян А.А.** Способ исследования пространственного распределения поля деформации кристаллов кратными интерферометрами // *Изв. АН АрмССР. Физика.*– 1990.– Т. 25.- С. 222 – 227.
23. **Aboyan A.H., Bezirganyan P.H., Khzardzhyan A.A.** Study of X – Ray Diffraction Pictures of Crystal Imperfections by Means of a Triple Interferometer // *Phys. Stat. Sol. (a).*– 1990.- V. 118.- P. 21- 27.

*Поступила в редакцию 18.05.2018.  
Принята к опубликованию 26.12. 2018.*

## ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

### Հ.Ռ. Դրմեյան, Ա.Հ. Աբոյան, Ա.Գ. Աղբալյան

Ներկայացված են նյութերի փորձարկման և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների հետազոտման ֆիզիկական տարբեր մեթոդները: Կատարվել է ավանդական մեթոդների վերլուծություն՝ հիմնված տարբեր ֆիզիկական երևույթների վրա, կատարելագործվել են գոյություն ունեցող մեթոդները՝ օգտագործելով ֆիզիկայի ժամանակակից նվաճումները, մշակվել են նյութի փորձարկման սկզբունքներն նոր մեթոդներ, նկարագրվել են բերված մեթոդների էությունը, օգտագործվող սարքերի կառուցվածքն ու աշխատանքի սկզբունքը, մասնավորապես, ստիլացուցի և ստիլաչափի սխեմաները՝ կառուցվածքային և սպեկտրային վերլուծության մեթոդներում, դիֆերենցիալ թերմոզուցեթրոլ հրաչափները՝ ջերմային վերլուծության մեթոդում, ռադիոգրաֆիկական վերլուծության համար օգտագործվող սարքը, ինդուկտիվային տվիչով մագնիսական արատացուցը՝ պանդերոմոտորային մեթոդում՝ մագնիսական վերլուծության ժամանակ դետայի մեջ ներքին արատների առկայության հայտնաբերման համար, ուլտրաձայնային, ինչպես նաև ուլտրաձայնային-իմպուլսային անդրադարձումային արատաչափների սխեմաները, ինդուկտիվային թենզաչափի կառուցվածքն ու աշխատանքի սկզբունքը թենզաչափական չափումների ժամանակ: Ներկայացված են բևեռային-օպտիկական հետազոտման մեթոդի, էլեկտրական մոդելավորման կատարելագործված մեթոդի, ռենտգենյան արատորոշման, մասնավորապես, արատի պատկերի մեկնաբանման ռենտգենային տերաչափական մեթոդի, երկպատիկ, եռա- և քառաբյուրեղ ինտերֆերաչափային մեթոդների էությունը: Ցույց է տրված, որ ինտերֆերաչափական տեղագրական պատկերը կախված է անդրադարձնող հարթությունների կողմնորոշումից: Արատների պատկերների միարժեքորեն վերծանումը զգալիորեն հեշտանում է, երբ ինտերֆերենցային պատկերները ստացվում են պատիկ ինտերֆերաչափների միջոցով, և պատիկ ինտերֆերաչափական պատկերները տալիս են բյուրեղի դեֆորմացված վիճակի ավելի ամբողջական նկարագիրը: Փորձով ապացուցված է, որ միևնույն բյուրեղից նրա համաչափ-համարժեք հարթությունների ընտանիքների միջոցով ստացված ինտերֆերաչափական պատկերները կլինեն միատեսակ միայն այն դեպքում, երբ ինտերֆերաչափի բյուրեղները (բլոկները) իդեալական են: Ցույց է տրված, որ քառաբլոկ ինտերֆերաչափներում դիֆրակցված փնջերի զույգ առ զույգ վերադրումը հանգեցնում է ըստ կոնտրաստի երեք տարբեր մուարի շերտերի, իսկ երեք փնջերի վերադրման դեպքում մուարի պատկերի կոնտրաստը խիստ նվազում է:

**Առանցքային բառեր.** հրաչափ, մագնիսական արատացուց, ուլտրաձայնային արատացուց, թենզաչափ, ռենտգենյան արատացուց, ինտերֆերաչափ:



## MODERN PHYSICAL METHODS FOR INVESTIGATING MATERIALS

H.R. Drmeyan, A.H. Aboyan, S.G. Aghbalyan

Different physical methods of testing and investigating the physical and mechanical properties of materials are studied. The analysis of traditional methods based on a variety of physical phenomena is carried out. As a result, the existing methods are improved, and new methods for testing materials by using the latest achievements in physics and material science are developed. The essence of the above-mentioned methods, the structure and operating principle of the used instruments, in particular, the styloscope and stylometer schemes in the methods of structural and spectral analyses are described. The essence of pyrometers with differential thermocouples in the thermal analysis method; the device for radiographic analysis; the magnetic flow detector with induction actions in the ponderomotive method with magnetic analysis for establishing the presence of internal defects in details; the ultrasonic flow detector, as well as the scheme of ultrasonic pulse reflective flow detector; the structure and principle of operation of an inductive tensometer for measuring deformations in tensometry are also considered. The essence of the polarization-optical method of investigation, the advanced method of electrical modeling, the method of X-ray flow detection, in particular the X-ray interferometric method of image interpretation of defects, the method of double three- and four-crystal interferometers, triple three- and four-crystal interferometers are described. It is shown that interferometric topographic patterns depend on the orientation of the reflecting planes, the unambiguous interpretation of the image of the defects is greatly facilitated when interferograms are obtained with the help of multiple interferometers, and multiple interferometers give a more complete description of the deformed state of the crystals. It has been experimentally proved that interferometric patterns obtained from the same crystal with the help of families of symmetrically equivalent planes will be the same only in the case when the crystals of the interferometer are ideal. It is shown that in a four-block interferometer pairwise imposition of diffracted beams leads to three different moiré bands in contrast, and when three beams are imposed, the contrast of moiré patterns is greatly reduced.

**Keywords:** pyrometer, magnetic flow detector, ultrasonic flow detector, tensometer, X-ray flow detection, interferometer.