

Измерение вязкости твердых тел голографическим методом реального времени / К.Д. Мгалоблишвили, К.И. Оцхели, Г.Г. Дадунашвили, Г.Л. Джишкарини, Т.Г. Аришвили // Научное приборостроение. -1992. -Т. 2. -№ 3: Лазеры и современное приборостроение. - С. 86-94.

Предложено и реализовано оригинальное голографическое измерительное устройство, основой принципа действия которого является использование дополнительного отражателя на контролируемом образце.

Представленное решение позволяет осуществить измерения вязкости материалов голографическим методом реального масштаба времени, исключив многократную запись голограмм исследуемых объектов и ограничившись единственной голограммой дополнительного отражателя. В результате ускоряется процедура измерений, снижаются затраты на их проведение. Библ. 10 назв. Ил. 3.

К. Д. Мгалоблишвили, К. И. Оцхели, Г. Г. Дадунашвили,
Г. Л. Джишқариани, Т. Г. Аришвили
(Политехнический институт, Кутаиси)

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ*

Повышение требований к качеству изделий электронной техники и продукции других отраслей народного хозяйства, где находят широкое применение аморфные материалы, неразрывно связано с необходимостью совершенствования методов и средств контроля физико-механических свойств этих материалов [1—4].

В таких отраслях народного хозяйства, как строительство, машиностроение, авиастроение, в современных конструкциях наряду с традиционными материалами (сталь, дерево, бетон и т. д.) широкое применение получают новые материалы, в частности, композиты, обладающие рядом специфических свойств. Так, армирование полимеров волокнами из высокопрочных материалов позволяет получить новый легкий конструкционный материал, имеющий высокую прочность.

Анализируя методы измерения высоких вязкостей твердых сред и их ошибки [2, 5, 6], следует отметить три основных недостатка, влияющие на точность измерения вязкости: искажение процесса деформации; трудность изготовления образцов; сложность измерения скорости деформации. Так, например, для метода растяжения (сжатия) стержня искажение процесса деформации заключается в уменьшении (увеличении) площади поперечного сечения стержня, а неточности в изготовлении образцов приводят к ошибке в 4—6 %. Кроме того, имеются сложности с точным измерением малых деформаций.

Метод закручивания стержня избавлен от третьего недостатка, но появляются деформация и высокие требования к точности изготовления образцов.

Сложность изготовления образцов и высокие требования к точности их изготовления характеризуют метод двойной консоли и метод пружины.

Главным недостатком метода прогиба стержня является трудность точного измерения стрелы прогиба и наличие деформации.

Вязкость — это такое свойство материала, которое проявляется при сдвиге слоев материала относительно друг друга. Во время чистого однородного сдвига площадь поперечного сечения образца кубической формы остается постоянной. Кроме того, образцы кубической формы легко изготовить.

Наиболее трудным для метода измерения вязкости посредством сдвига является точное измерение скорости деформации. Однако появившиеся в последнее время высокомонокроматичные и высокостабильные лазеры создают предпосылки для преодоления этой трудности.

Оптические приборы, основанные на использовании явления интерференции электромагнитных колебаний видимого диапазона, известны как обеспечивающие наиболее высокую чувствительность (десятые доли микрона) при измерении линейных размеров и перемещений, а уникальные свойства лазерного излучения значительно расширили возможности интерферометрии. Ограниченное использование интерферометров связано с качеством имеющихся источников света, не обладающих достаточной яркостью и когерентностью, что не позволяло получать четкую интерференционную картину. Современные же

*Статья публикуется в порядке дискуссии.

лазерные интерферометры с одночастотным лазером обеспечивают высокую точность измерений при максимальной скорости перемещения до 10 м/мин. Большим преимуществом лазерной интерферометрии перед классической является и то, что на результаты измерений значительно меньше влияют внешнее освещение, вибрации, запыленность, а это очень важно в производственных условиях.

Однако результаты измерения искажаются из-за деформаций измерительной аппаратуры и вспомогательных средств измерений [6], так как в интерферометрах с лазерными источниками излучения обе сравниваемые волны формируются одновременно, но распространяются по разным путям.

От этого недостатка избавлены голографические интерферометры. В них интерферирующие волны проходят по одному и тому же пути, но в разные моменты времени. Вид интерференционной картины обусловлен лишь изменениями, происходящими с объектом за время между экспонированием голограммы и моментом наблюдения (либо за время между первой и второй экспозициями).

Измерение вязкости твердых тел посредством сдвига можно осуществить двумя методами голографической интерферометрии: двойной экспозиции и реального времени.

Впервые метод двойной экспозиции для измерения высоких вязкостей был описан в работе [7]. Описание этого метода измерения высоких вязкостей дается на примере измерений, проводимых с аморфным селеном. Эти измерения сравниваются с такими же, проведенными при помощи обычной техники. Сравнение показывает, что новый метод дает более правильные результаты, чем подтверждается полезность и возможность его широкого использования.

Однако метод двойной экспозиции обладает рядом недостатков, которыми нельзя пренебрегать.

Источником серьезных ошибок может стать время экспонирования голограммы, которое при использовании He-Ne газового лазера, работающего в непрерывном режиме, может достигать двух минут [8]. Обойти эту трудность можно, используя в качестве источника излучения импульсный лазер. Однако в этом случае прибор будет дорогостоящим, а его конструкция значительно усложнится, так как для восстановления изображения с проэкспонированной голограммы потребуется лазер, работающий в непрерывном режиме. Надо отметить, что различие длин волн импульсного и непрерывного лазеров также может стать источником ошибок.

Точность измерения зависит от числа интерференционных полос, появившихся на интерферограмме за время между двумя экспозициями, которое нельзя предугадать в методе двойной экспозиции.

Избавиться от всех этих недостатков позволяет метод реального времени, хотя в силу ряда причин, которые показаны далее, он не мог быть применен для измерения вязкости твердых тел посредством сдвига.

Авторы впервые применили этот метод для измерения вязкости твердых тел [9].

При вязком течении аморфного материала связь между постоянным касательным напряжением $\sigma_t = G/S$, скоростью деформации сдвига dy/dt и динамической вязкостью η для пробы, имеющей вид прямоугольного параллелепипеда (рис. 1), описывается уравнением Максвелла

$$\frac{dy}{dt} = \frac{G}{S} \frac{1}{\eta}, \quad (1)$$

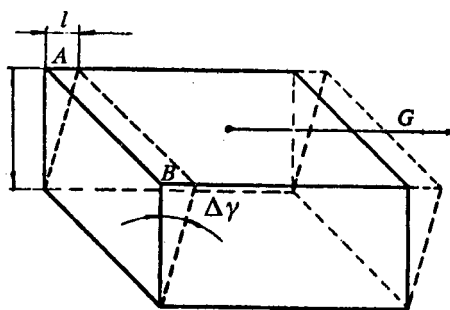


Рис. 1. Схема деформации образца под действием заданной нагрузки G .

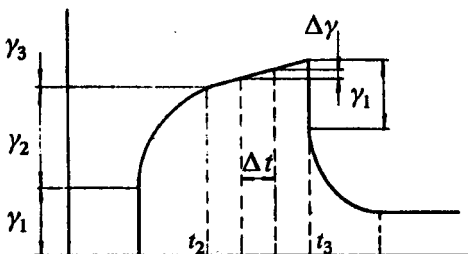


Рис. 2. Зависимость полной деформации от времени приложения постоянной нагрузки для аморфных твердых тел [6]. γ_1 — упругая деформация, γ_2 — замедленно-упругая деформация, γ_3 — пластическая деформация (вязкость).

где dy/dt — скорость деформации сдвига; G — сила, действующая на верхнюю грань пробы площадью S в плоскости этой грани, перпендикулярно ребру AB ; η — динамическая вязкость.

Как известно, измерение вязкости должно начинаться с момента времени t_2 (рис. 2), когда выполняется условие

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad (2)$$

С учетом (2) уравнение (1) принимает вид

$$\eta = \frac{G \Delta t}{S \Delta \gamma}. \quad (3)$$

Здесь $\Delta \gamma$ — угол сдвига, прошедшего за промежуток времени Δt .

При малом угле сдвига $\Delta \gamma$ линейное перемещение l верхнего ребра пробы (см. рис. 1) с большой точностью можно принять за дугу окружности радиуса H

$$\Delta \gamma = l / H,$$

где H — высота пробы.

Тогда уравнение (3) можно записать так

$$\eta = G \Delta t H / S l. \quad (4)$$

Таким образом, для расчета вязкости необходимо знать перемещение l за промежуток времени Δt .

Особым преимуществом метода реального масштаба времени является то, что с его помощью можно изучать различные виды движения объектов, получив только одну голограмму неподвижного объекта при одной единственной экспозиции.

Основной проблемой метода, а также и голографической интерферометрии вообще является правильная и точная интерпретация полученной интерференционной картины. Однако в простом случае статического смещения теорию образования интерференционных полос в реальном масштабе времени можно вывести, если известно мгновенное распределение интенсивности, усредненное затем в соответствии с постоянной времени человеческого глаза.

Из теории интерференции известна формула определения перемещения l (см. рис. 1) верхнего ребра пробы перпендикулярно его наблюдаемой поверхности за промежуток времени Δt [10]:

$$l = (n - n_0) \lambda / (\cos \alpha + \cos \beta). \quad (5)$$

Здесь n_0 — число интерференционных полос в момент времени $t = 0$ начала наблюдения; n — число имеющихся интерференционных полос через промежуток времени Δt ; λ — длина волны источника излучения; α — угол между падающим пучком и нормалью к ребру AB ; β — угол наблюдения, измеренный от нормали к ребру AB .

Используя (5), формула (4) для расчета вязкости примет вид

$$\eta = \frac{GH \Delta t (\cos \alpha + \cos \beta)}{S \lambda \Delta n}, \quad (6)$$

где $\Delta n = n - n_0$ — число появившихся за время Δt интерференционных полос.

Контраст интерференционных полос максимален, когда амплитуда восстановленного изображения равна амплитуде на освещенном изображении, пропущенном через голограмму. На практике в голографической интерферометрии в реальном времени максимальный контраст полос поддерживается фильтрацией объектного и восстанавливающего пучков так, чтобы восстановленное изображение и объект имели одинаковую яркость. Поскольку для большинства голограмм дифракционная эффективность не превышает 10 %, эта операция состоит в уменьшении освещенности объекта и увеличении интенсивности восстанавливающего пучка во время работы. Очевидно, что высокая эффективность восстановления весьма полезна для исследования в реальном времени.

При неразрушающих испытаниях могут появляться интерференционные полосы в результате нежелательного перемещения объекта как твердого тела при его нагружении или неточности, с которой голограмма возвращена на место, что может замаскировать деформационные смещения объекта. Для удаления нежелательных полос в голографической интерферометрии реально-го времени представляется возможным использовать так называемый способ управления интерференционными полосами [10].

Этот чисто оптический способ дает возможность компенсировать простые физические движения объекта, например, такие, как наклон или поворот. Одним из путей реализации этого способа в голографической интерферометрии является использование специального зеркала в оптическом канале предметного пучка. Зеркало имеет две оси вращения, и его помещают за последним

оптическим элементом перед объектом. Если объект под действием нагрузки незначительно повернется, то в отраженном объектом излучении, направленном к голограмме реального масштаба времени, появится линейное изменение фазы. Оптическая интерференция между этим излучением и восстановленным изображением первоначально недеформированного объекта приведет к возникновению интерференционных полос, которые будут видны, если наблюдать объект сквозь его голограмму в реальном времени. Изменяя соответствующим образом наклон предметного пучка с помощью зеркала, можно скомпенсировать изменения фазы излучения, вызванные поворотом объекта, и тем самым устранить нежелательные интерференционные полосы.

Использование поворотного зеркала в голографической системе обычно достаточно для устранения большинства нежелательных полос. Для усовершенствования способа управления полосами необходимо изменить кривизну предметного пучка, что осуществляется также оптическим путем с помощью линз. Поместив линзу на пути предметного пучка и обеспечив ее перемещение вдоль оптической оси, получим возможность компенсировать общее движение объекта по линии наблюдения от голограммы до поверхности объекта.

С помощью поворотного зеркала в реальном масштабе времени можно избавиться от ограниченности, присущей методу двойной экспозиции. Для этого измерения можно провести в несколько этапов. После появления максимально различного числа интерференционных полос с помощью поворотного зеркала их число опять можно свести к минимуму и т. д. до тех пор, пока не установится постоянная скорость деформации $dy/dt = \Delta y / \Delta t$, необходимая для отделения вязкости от вязкостно-эластического эффекта. Тогда результат измерения будет зависеть только от вязкости.

При работе с поворотным зеркалом (очевидно, что размеры зеркала должны быть больше размеров голографической стороны объекта) объектный луч, в зависимости от положения зеркала, попадает на различные участки его поверхности, что приведет к появлению нежелательных интерференционных полос вследствие неидентичности оптических каналов, по которым проходят интерферирующие пучки.

Указанные недостатки вынудили авторов использовать в работе следующий способ управления интерференционными полосами. Исследуемый объект помещается на юстировочный столик, который имеет три оси вращения. Правильную установку объекта для управления интерференционными полосами лучше осуществлять при наблюдении в реальном времени, одновременно слегка поворачивая объект вокруг каждой из осей. Заметив направление вращения, при котором расстояние между полосами увеличивается, можно найти нужное направление поворота. На практике придется выполнить несколько таких регулировок по каждой из осей для устранения максимального количества нежелательных полос, после чего между оставшимися интерференционными полосами обеспечивается максимальное расстояние. Желательно, чтобы все три оси вращения пересекались на середине нижнего ребра голографируемой стороны объекта.

Методы голографической интерферометрии характеризуются одним общим недостатком, который заключается в том, что процесс химической обработки фотопластинки является трудоемким и долговременным, причем для каждого измерения нужно обрабатывать новую фотопластинку. При решении задачи измерения вязкости твердых сред методом реального масштаба времени этот недостаток может быть устранен. Для этого надо подобрать отражатель (зеркало), имеющий форму параллелепипеда, и слегка закрепить на гологра-

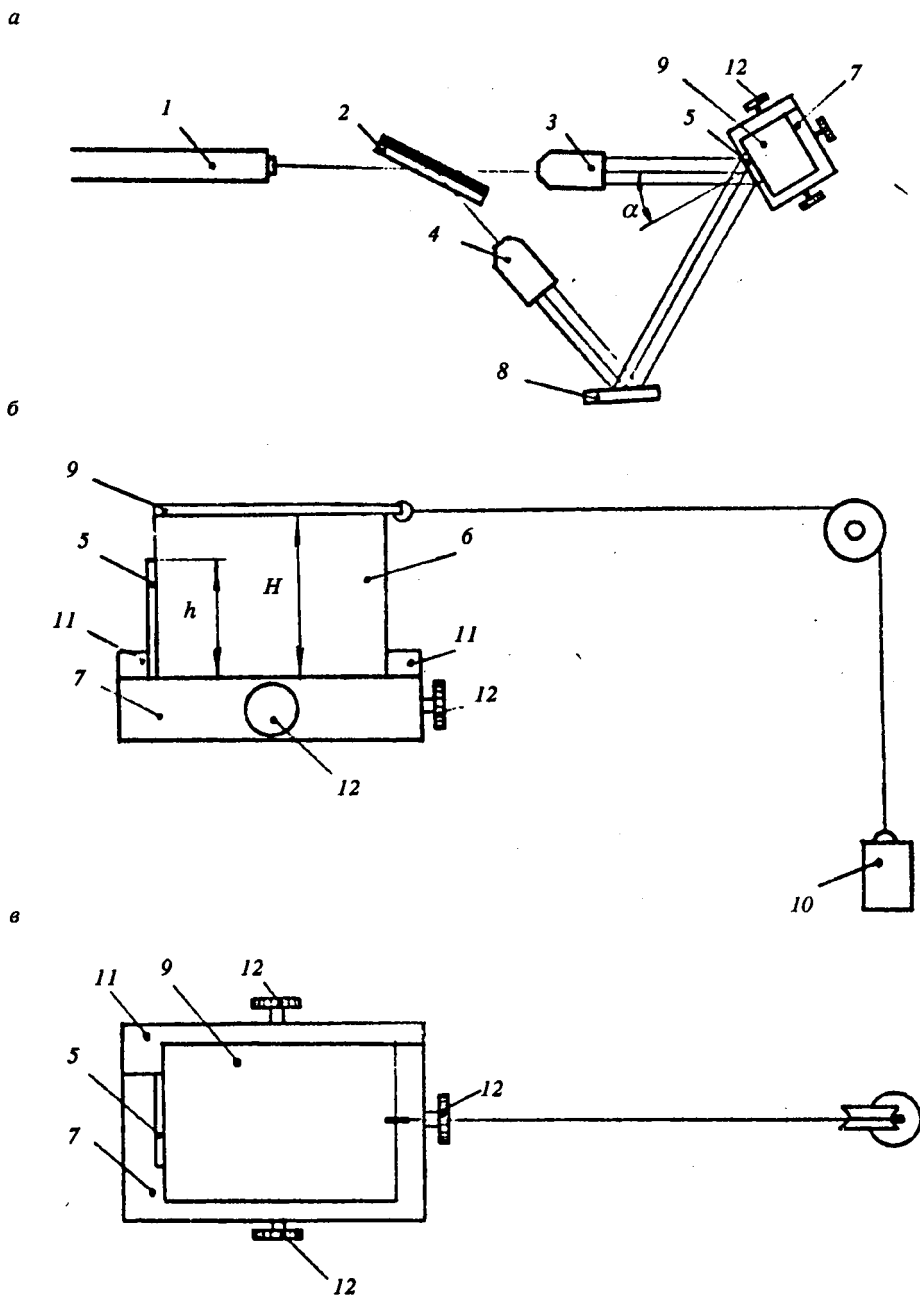


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения высоких вязкостей голографическим методом реального времени.

а — общий вид установки, б — схема крепления образца с эталонным отражателем, в — схема нагружения образца с эталонным отражателем.

Объяснение в тексте.

фируемой стороне исследуемого объекта (рис. 3). Голограмма с записанным на ней изображением отражателя дает возможность измерить скорости сдвига любого количества образцов, если этот отражатель поочередно закреплять на каждый из них. Применяя элементарные технические приемы для точной установки объекта с закрепленным на нем зеркалом в исходное состояние и используя способ управления интерференционными полосами с помощью юстировочного столика, можно устранить максимальное число нежелательных полос, после чего можно начинать измерения.

Обозначая высоту отражателя через h и учитывая, что для зеркально отражающего объекта $\alpha = \beta$, расчетную формулу (6) для измерения вязкости можно переписать следующим образом:

$$\eta = \frac{2 G h \Delta t \cos \alpha}{S \lambda \Delta n} \quad (7)$$

Формула (7) является основной для расчета вязкости. Из нее, в частности, видно, что, варьируя значения G и Δn , которые зависят от экспериментатора, можно с требуемой точностью определить вязкость в широких пределах от 10^6 до 10^{16} Пуаз и выше.

Экспериментальная установка для измерения вязкости твердых тел создана на базе установки измерительной голографической УИГ-2М.

Устройство включает гелий-неоновый газовый лазер 1, светоделитель 2, расположенный по ходу излучения и образующий объектный и опорный лучи, объективы 3 и 4 для расширения полученных лучей, отражатель 5, расположенный по ходу объектного луча и закрепленный на наблюдаемой стороне исследуемого объекта 6, который, в свою очередь, расположен на юстировочном столике 7, и фотопластинку 8 с проявленным голографическим изображением отражателя. К верхней грани исследуемого образца прикреплен пластина 9 с грузом 10, передающим на образец деформирующее напряжение.

На юстировочном столике предусмотрен выступ 11 с внутренним прямым углом для фиксации образца с отражателем в одном постоянном положении. Юстировочный столик, имеющий три взаимно перпендикулярные оси вращения, поворачивается с помощью юстировочных винтов 12. Устройство работает следующим образом. Исследуемый образец в ненагруженном состоянии закрепляют на юстировочном столике, а на его наблюдаемой стороне закрепляют отражатель. После этого включают гелий-неоновый лазер, излучение которого проходит через светоделитель, образующий объектный и опорный лучи, расширяемые соответствующими объективами. Опорный луч после расширения попадает на фотопластинку и восстанавливает записанное заранее на ней голографическое изображение отражателя. Объективный луч, отражаясь от отражателя, также попадает на фотопластинку и интерферирует с восстановленным изображением отражателя. На голограмме после этого можно различить интерференционные полосы, которые появляются в результате того, что положение отражателя не совпадает точно с тем положением, которое он занимал при экспонировании голограммы.

Нежелательные интерференционные полосы устраняются следующим образом. Юстировочный столик, на котором расположен исследуемый образец, слегка поворачивается при помощи юстировочных винтов вокруг каждой из трех взаимноперпендикулярных осей. Заметив направление вращения, при котором расстояние между полосами увеличивается, можно найти нужное направление поворота для каждой оси. Для устранения нежелательных интер-

ференционных полос выполняется несколько таких регулировок по каждой оси. Затем производится нагружение образца. Сразу же после нагружения возникает упругая деформация, подчиняющаяся закону Гука. Поэтому на интерферограмме появляется большое число параллельных горизонтальных интерференционных полос, которые устраняются при помощи юстировочных винтов.

Далее появляется замедленно-упругая деформация и скорость появления полос уменьшается. После того, как скорость появления полос становится постоянной, можно начинать измерение вязкости. Расчет вязкости производится по формуле (7).

Эксперименты, проведенные на образцах из смолы и парафина при комнатной температуре, показали высокую сходимость результатов измерений [6].

Таким образом, предложен и испытан новый способ измерения вязкости твердых сред методом голографической интерферометрии в реальном масштабе времени. Способ устранения нежелательных интерференционных полос и использование эталонной поверхности, примененные в данной работе, значительно расширяют диапазон измерения перемещений и исключают процесс химической обработки голограмм. Кроме того, предложенный способ измерения вязкости имеет следующие достоинства:

- исключено влияние деформации аппаратуры на результаты измерений вязкости;
- имеется возможность измерения модуля сдвига и замедленно-упругой деформации;
- достигается максимум контраста интерференционной структуры;
- обеспечивается автоматическое измерение скорости деформации;
- проектируется на экран информация о скорости сдвига, вследствие чего деформация пробы становится видимой;
- увеличена точность измерения вязкости твердых тел по сравнению с другими методами.

Описанный метод и работы по обеспечению стабилизации температуры образца с помощью воздушного термостата с точностью $\pm 0,05$ °C, а также использование частотно-стабилизированного лазера дают возможность рекомендовать названный способ измерения как образцовый и создать на его основе образцовую установку для измерения вязкости твердых сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mackenzie J. D. // Modern Aspects of the Vitreous state. London, 1960. P. 1-9.
2. Безбородов М. А. Вязкость силикатных стекол. Минск, 1975. 352 с.
3. Prad'homme M. // Phys. Chem. Glasses. 1968. V. 9, № 3. P. 101-105.
4. Александров А. В., Потанов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. М., 1990. 400 с.
5. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела: Пер. с нем. М., 1986. 558 с.
6. Джишкарариани Г. Л., Оцхели К. И. Отчет о НИР "Исследование возможности измерения высоких вязкостей (твердых сред) методом голографической интерферометрии". Кутаиси, 1986. 127 с.

7. *Carini G. J., Cutroni M., Wanderlingh F.* // *Optica and laser Tecnology.* 1978. V. 10, № 5. P. 241-242.

8. *Гинзбург В. Н., Степанов Б. М.* Голографические измерения. М., 1981. 296 с.

9. *Оцхели К. И., Джишкарцани Г. Л.* Способ измерения вязкости и устройство для его осуществления. А. С. СССР № 1659777, кл. GOI N 11/00. 1991.

10. *Голографические неразрушающие исследования* // Под ред. Роберта К. Эрфа: Пер. с англ. Карасева В. А. М., 1979. 448 с.

Рукопись поступила 28.02.92