

Использование интерферометрического метода измерения величины и скорости перемещений для неразрушающего контроля материала

© В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 28 сентября 2006 г.
В окончательной редакции 4 октября 2006 г.)

Показана принципиальная возможность использования интерферометрического метода измерения величины и скорости малых перемещений для определения внутренних или вызванных внешней нагрузкой напряжений в твердых телах, а также для контроля происходящих в них структурных изменений. Интерферометрический метод, основанный на измерении реакции твердого тела на малое возмущение его напряженного состояния, предлагается использовать для определения напряжений по отклонению реакции на возмущение от стандартного случая, когда искомые напряжения равны нулю. При использовании метода для контроля структуры предлагается исследовать особенности характеристик микропластической деформации, появляющиеся после обработки или эксплуатации материала и проявляющиеся в температурной и силовой зависимостях скорости малой неупругой деформации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 06-08-01204).

PACS: 62.20.-x, 61.46.-w, 62.25.+g, 81.07.-b

1. Введение

Интерес к неразрушающим методам контроля состояния материала не ослабевает на протяжении многих десятилетий. Если на ранней стадии развития исследований такими методами ставилась лишь задача определения внутренних (или остаточных) напряжений (при этом они конкурировали с известными „разрушающими“ методами), то в последнее время наряду с сохранением указанной задачи появляются новые проблемы, обусловленные развитием более сложной техники и позволяющие более полно характеризовать структурное состояние исследуемого объекта и его работоспособность, в том числе непосредственно в процессе его эксплуатации. Современные представления о неразрушающих методах контроля широко обсуждаются в литературе и на регулярных проводимых конференциях (см., например, [1,2]).

Около 30 лет назад в работе [3] была предложена классификация методов определения внутренних напряжений, включающая около 20 различных вариантов, разделенных автором (в некоторых случаях условно) на физические и механические. Последние являются, как правило, разрушающими и поэтому имеют весьма ограниченное применение. Большинство предложенных в то время физических методов также не получило широкого распространения, в основном из-за неоднозначности трактовки результатов измерений. В настоящее время классификация методов неразрушающего контроля постоянно изменяется в связи с появлением новых и совершенствованием известных ранее методов. К указанным в [1] можно добавить методы измерения напряжений, связанные с созданием новых высокочувствительных тензодатчиков на основе моносulfида самария [4], новые магнитные методы, в которых измерителями

магнитного потока служат сверхпроводящие квантовые интерференционные устройства (СКВИДы) [5], а также методы, использующие фотоакустические и фототермические эффекты [6]. Однако они пока еще не получили широкого распространения. Наиболее популярным для определения как внутренних напряжений, так и действующих в реальных работающих конструкциях является в настоящее время рентгеновский метод определения напряжений (упругих деформаций). Метод позволяет измерять в кристаллических телах локальные деформации в приповерхностных слоях и с использованием закона Гука вычислять напряжения. С другой стороны, наиболее распространенными методами неразрушающего контроля структурного состояния материала являются акустические методы, реагирующие на изменение дефектной структуры материала [2]. Развитие лазерной интерферометрии и создание возможностей прецизионных измерений малых перемещений и скоростей перемещений открывает новые пути анализа напряженного состояния материала, в том числе измерения внутренних напряжений и контроля дефектной структуры. Преимуществами интерференционных методов являются бесконтактность, безынерционность, возможность проведения разномасштабных измерений (применительно к задаче определения внутренних напряжений это означает принципиальную возможность определения напряжений разной степени локализации). К недостаткам метода следует отнести требования к качеству отражающей поверхности, что приводит в ряде случаев к установке на исследуемом объекте небольшого зеркала, а также тот факт, что метод не является прямым — измеряется перемещение или его скорость, а напряжения рассчитываются по некоторым моделям, о которых речь пойдет далее.

В [7–11] было показано, что с помощью лазерной интерферометрии можно решать различные задачи, связанные с деформацией твердых тел; при этом в ряде случаев было продемонстрировано преимущество интерферометрических методов по сравнению с акустическими. В настоящей работе рассмотрено несколько вариантов использования лазерного интерферометра для определения напряжений и анализа дефектной структуры материала. Заметим, что в отличие от рентгеновских методов в нашем случае материал не обязательно должен быть кристаллическим, возможно исследование любых материалов.

2. Вычисление остаточных напряжений по отклонению упругого прогиба от стандартного решения

Идея метода заключается в измерении отклонения упругой деформации под действием известной силы от некоторой величины, принятой за эталон. Эталоном может быть либо решение задачи теории упругости для данного вида нагружения, либо измерения, проведенные на образце (модели) с заведомо низким уровнем внутренних напряжений, а в остальном не отличающемся от исследуемого объекта.

В качестве примера рассмотрим элемент стержня длиной l , в котором внутренние напряжения создают осевую деформацию (растяжение или сжатие), а внешняя нагрузка P приводит к малому прогибу. Если нагрузка приложена в середине пролета балки и x — координата вдоль ее оси (см. вставку на рис. 1), то изгибающий момент (в области $0 \leq x \leq l/2$) $M = Px/2 - fU$, где $U(x)$ — прогиб, а $f = \sigma S$; σ — внутренние напряжения, S — площадь поперечного сечения балки в зоне действия внутренних напряжений ($f > 0$ для растягивающих и $f < 0$ для сжимающих напряжений).

Уравнение изгиба такой балки имеет

$$EJ \frac{d^2U}{dx^2} - fU + \frac{Px}{2} = 0, \quad (1)$$

где E — модуль упругости, J — момент инерции сечения. Граничные условия для уравнения (1): $U(0) = 0$ и $U'(l/2) = 0$.

Решение уравнения (1) для $x = l/2$ будет иметь вид

$$U\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{Pl}{4f} \left(1 - \frac{\tanh\left(\frac{l}{2}\sqrt{\frac{f}{EJ}}\right)}{\frac{l}{2}\sqrt{\frac{f}{EJ}}} \right) \quad (2a)$$

для $f > 0$,

$$U\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{Pl}{4f} \left(\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{l}{2}\sqrt{\frac{|f|}{EJ}}\right)}{\frac{l}{2}\sqrt{\frac{|f|}{EJ}}} - 1 \right) \quad (2b)$$

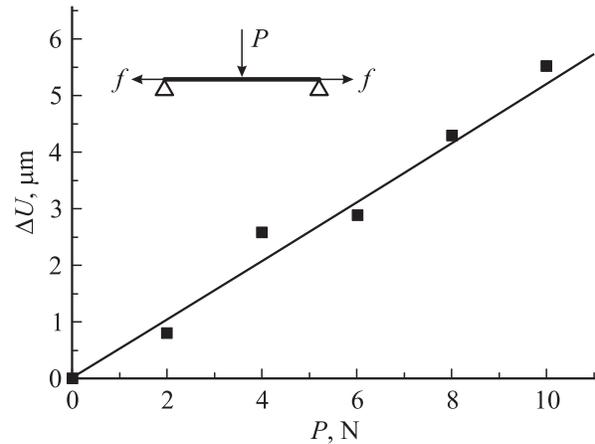


Рис. 1. Изменение прогиба в центральном сечении пластины при трехточечном изгибе в зависимости от нагрузки в момент изменения знака осевой силы $f = 10$ Н (прямая — расчет, точки — эксперимент). На вставке показана схема нагружения образца при трехточечном изгибе с осевой силой, имитирующей внутренние напряжения.

для $f < 0$ и

$$U\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{Pl^3}{48EJ} \quad (2c)$$

для $f = 0$. Используя три первых члена разложения $\tanh(l\sqrt{|f|/EJ})/2$ и $\operatorname{tg}(l\sqrt{|f|/EJ})/2$ в ряд, получим

$$U \approx U_0(1 - f^2/10EJ), \quad (3)$$

где $U_0 = Pl^3/48EJ$. Как следует из (2), (3), внутренние растягивающие напряжения уменьшают прогиб, а сжимающие — увеличивают его. Приближенное решение (3) справедливо при $f^2/10EJ < 1$, т.е. при не слишком больших f . Для больших f следует воспользоваться точным решением (2a)–(2c). Однако слишком большим f быть не может, так как растягивающие напряжения в балке не должны превышать предела текучести материала.

Экспериментальная проверка выражения (3) проводилась с использованием лазерного интерферометра [7–11] на основе миниатюрного полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$. Определялось изменение прогиба ΔU в центре стальной полосы размерами $20 \times 8 \times 0.5 \text{ mm}$ в момент изменения f от 10 до -10 Н при различных P в диапазоне от 2 до 10 Н. Рис. 1 демонстрирует хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными.

В реальных конструкциях использование расчетных методов может быть затруднено из-за сложной формы исследуемого объекта и сложного характера распределения внутренних напряжений. В этом случае в приближении, основанном на аддитивности действия поразному направленных нагрузок (внутренних напряжений), коэффициент пропорциональности между U и f можно вычислять, используя нагружение аналогичной

конструкции с заведомо низким уровнем внутренних напряжений. В рассмотренном выше случае выражение (3) удобно переписать в следующем виде:

$$U \approx U_0(1 - 24fU_0/5Pl), \quad (4)$$

или для балки прямоугольного сечения шириной b и высотой h

$$\Delta U/2U_0 \approx \sigma b h^2/10EJ, \quad (5)$$

где σ — искомое (внутреннее) напряжение, а $\Delta U/2$ — разница в прогибе для балок с напряжениями σ и без них.

Для того чтобы использовать этот метод в качестве неразрушающего, т.е. применить его к элементам конструкции, а не к образцу, нужно либо знать расчетный деформационный отклик на приложенную в заданной точке известную нагрузку, либо при проектировании определить предельно возможное отклонение, вызванное внутренними напряжениями, либо провести тарировку интерференционного метода, например, по рентгеновскому методу, а затем использовать более простой интерференционный метод в качестве основного при анализе напряжений в процессе эксплуатации.

Таким образом, по отклонению упругого прогиба, вызванного сравнительно небольшой нагрузкой, от стандартного значения можно судить о напряжениях, которые для образца или выделенного элемента конструкции являются внешними. Ими могут быть крупномасштабные остаточные напряжения (первого рода по классификации Н.Н. Давиденкова [3]) или напряжения, вызванные приложенной нагрузкой.

3. Контроль структуры и остаточных напряжений по скорости микропластической деформации

В [12] было показано, что на начальной стадии пластической деформации при напряжениях, значительно меньших предела текучести, можно измерять скорости кратковременной ползучести и наблюдать иногда немонотонное изменение скорости с ростом напряжений, т.е. определять напряжения, при которых происходят первые локализованные сдвиги. Прецизионное измерение скорости деформации на начальном участке деформационной кривой позволяет использовать его для анализа структуры, а в некоторых случаях и для оценки величины внутренних напряжений. Измеряемая локальная деформация обусловлена наиболее высокими локальными сдвиговыми напряжениями.

Будем считать, что в отожженном образце остаточные напряжения равны нулю (или много меньше, чем в исследуемом образце). Тогда смещение напряжений начала неупругой деформации для неотожженного образца можно трактовать как результат действия внутренних напряжений, локализованных вблизи источников деформации.

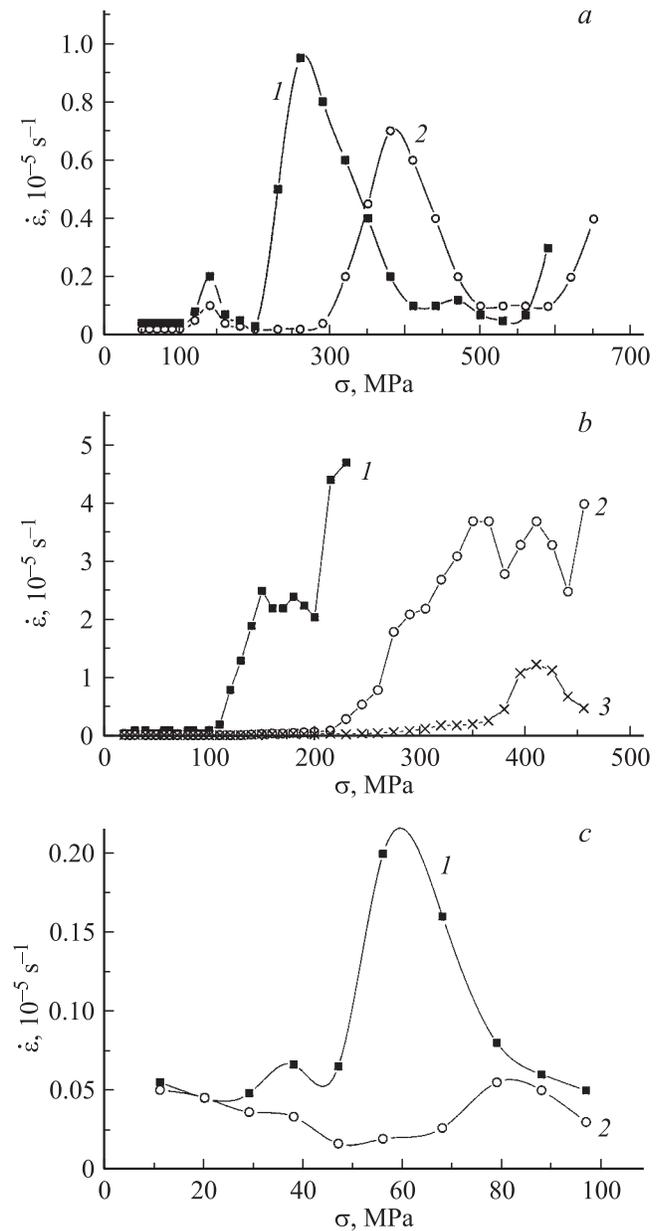


Рис. 2. Зависимость скорости неупругой деформации от напряжений и ее изменение при термическом и механическом воздействиях для случая ступенчатого нагружения. *a* — хромо-молибденованадиевая сталь после закалки через воду в масло с 850°C и последующего отпуска при 650°C в течение 1 h (1) и после такой же закалки без отпуска (2); *b* — армо-железо после отжига (1), прокатки (2) и РКУП (3); *c* — медь после отжига (1) и РКУП (2).

На рис. 2 приведено несколько примеров зависимости скорости неупругой деформации от напряжений для разных материалов и ее изменение при термическом и механическом воздействиях для ступенчатого нагружения (выдержка на ступеньке составляла 10–20 с), которое позволяет исследовать микропластическую стадию деформации (до предела текучести) в условиях, близких к режиму постоянной скорости увеличения

нагрузки [12]. Испытывались цилиндрические образцы диаметром 2–3 mm и высотой 6 mm при сжатии и длинной рабочей части 10 mm при растяжении. На рис. 2, *a* показаны данные для хромомолибденованадиевой стали (3.5% С, 1.2% Cr, 0.3% Mo, 0.2% V) в двух структурных состояниях; после закалки через воду в масло с 850°С и последующего отпуска при 650°С в течение 1 h (кривая 1) и после такой же закалки, но без отпуска (кривая 2). Отпуск приводит к уменьшению локальных напряжений, что вызывает увеличение средней скорости и величины накопленной за данное время деформации, а также к сдвигу пика микропластичности в сторону меньших напряжений.

Аналогичный вывод можно сделать, сравнивая поведение армо-железа после отжига, прокатки и равнонального углового прессования (РКУП) [13], рис. 2, *b*. Чем интенсивнее механическая обработка, тем длиннее становится участок с почти нулевой скоростью деформации, и подъем кривой скорости деформации сдвигается в сторону больших напряжений.

Для отожженной меди в области малых напряжений наблюдается заметный пик скорости микропластической деформации, который почти полностью исчезает после РКУП (рис. 2, *c*).

Приведенные данные свидетельствуют о возможности характеризовать структуру материала, сравнивая участки микропластичности диаграммы деформирования исследуемого образца с отожженным. В первом приближении можно говорить об оценке величины внутренних напряжений по сдвигу характерных точек на кривой деформации (по положению пика или началу подъема кривой). Однако следует учесть, что если уровень скорости микропластической деформации достаточно высок, то напряжения могут релаксировать и не представлять серьезной опасности для работы конструкции. С другой стороны, перегрузки, ударные или циклические нагрузки могут привести к локальным изменениям структуры и возрастанию напряжений. Анализ возможных неблагоприятных последствий может быть сделан при сравнении кривых микропластической деформации исходных образцов и претерпевших то или иное воздействие. Особенно опасным может оказаться охрупчивание материала в процессе эксплуатации в результате старения, взаимодействия с внешней средой или исчерпания возможностей локальной микродеформации. В [14] было предложено оценивать склонность материалов к хрупкому разрушению по температурной зависимости скорости микропластической деформации (спектру скоростей малых неупругих деформаций). Чем ниже температура, при которой наблюдался пик скорости микродеформации, тем менее склонен материал к хрупкому разрушению. В комбинации температурная и силовая зависимости скорости микропластической деформации могут дать достаточно подробную информацию о структуре, уровне локальных напряжений и о тенденциях изменения структуры в процессе работы материала в конструкции. Если же окажется возможным

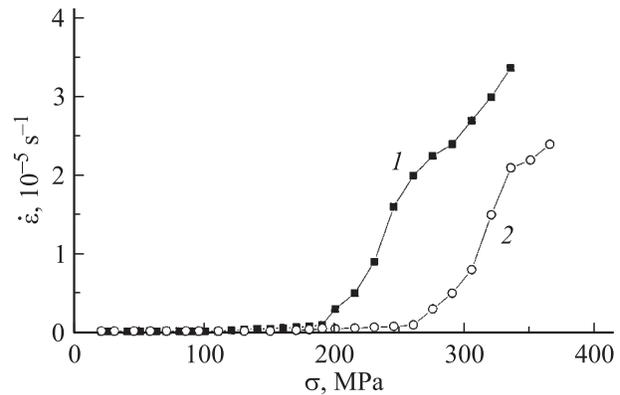


Рис. 3. Зависимость скорости микродеформации при сжатии (1) и растяжении (2) закаленного образца из армо-железа.

производить такие измерения на работающей конструкции, то, как отмечалось в разделе 2, метод скоростей микродеформаций может быть использован в качестве неразрушающего. Заметим, что в отличие от случая, рассмотренного в разделе 2, здесь речь идет либо о мелкомасштабных остаточных напряжениях (второго рода по классификации Н.Н. Давиденкова [3]), либо о высоких локальных напряжениях, вызванных приложенной нагрузкой.

Еще один интересный аспект рассматриваемой проблемы может быть связан с определением знака опасных локализованных напряжений. Поскольку остаточные напряжения всегда взаимно уравновешены, то и при растяжении, и при сжатии образца с остаточными напряжениями пик локальной пластичности должен смещаться в сторону больших напряжений по отношению к такому же пику, измеренному на отожженном образце. При этом возможно разделить влияние напряжений разного знака. Если, например, образец из исследуемого материала испытывается на сжатие, то величину смещения определяют остаточные сжимающие напряжения. При растяжении, наоборот, смещение связано с растягивающими остаточными напряжениями. На рис. 3 приведены результаты измерений скорости микродеформации при растяжении и сжатии закаленного образца из армо-железа. Как видно, подъем скорости при сжатии (кривая 1) начинается при меньших напряжениях, чем при растяжении (кривая 2). Это может свидетельствовать о том, что остаточные напряжения сжатия (наружные слои образца) несколько выше остаточных растягивающих напряжений (внутренние слои образца).

Следует, однако, иметь в виду, что в результате внешних воздействий (термических или термомеханических) или внутренних процессов, приводящих к появлению или перераспределению остаточных напряжений, изменяется также структура материала. Поэтому при сравнении образцов с различающейся структурой возможно не только смещение пика локальной пластичности, но и изменение формы начального участка кривой дефор-

мации. В этом случае характеристикой структуры для косвенной оценки уровня остаточных напряжений может служить деформация, накопленная при данной скорости нагружения в момент достижения некоторого уровня внешней нагрузки, т. е. величина пропорциональная площади под кривыми, изображенными на рис. 2 и 3, ограниченная одинаковыми значениями напряжений.

4. Заключение

Как было показано выше, интерферометрический метод измерения величины и скорости малых перемещений может использоваться для контроля структурного состояния материала в различных вариантах. Во-первых, на стадии выбора материала можно сравнить уровень микропластической деформации и наличие релаксационных (фазовых) переходов в области температур эксплуатации конструкции. Во-вторых, в процессе эксплуатации конструкции можно пытаться определить, как меняется структура материала, используя упомянутые выше характеристики микропластичности, связанные с мелкомасштабными внутренними напряжениями. Действующие в отдельных частях конструкции средние рабочие напряжения или крупномасштабные внутренние напряжения могут быть рассчитаны путем измерения реакции (перемещения выбранных точек на поверхности конструкции) на малое возмущение, вызванное воздействием слабой нагрузки.

Для кристаллических тел интерферометрический метод может быть успешно применен в комбинации с рентгеновским, в котором измеряется упругая деформация поверхностных слоев, в то время как интерферометрический метод дает интегральную характеристику напряженно-деформированного и структурного состояния некоторого выделенного фрагмента конструкции.

Список литературы

- [1] В.Н. Венгринович. В мире неразрушающего контроля. Ежекварт. журн. обозрение 1, 4 (2005).
- [2] Nondestructive Characterization of Materials VIII. Proc. of Eight Int. Symp. Boulder, USA (1997) / Ed. R.E. Green, jr. Plenum Press, N.Y.–London (1998). 835 p.
- [3] Я.Б. Фридман. Механические свойства металлов. Машиностроение, М. (1974). Ч. 1. 472 с.
- [4] Л.В. Васильев, В.В. Каминский. ФТТ 32, 1173 (1994).
- [5] Л.В. Матвеев. Бюл. магнит. общ-ва 4, 1 (2003).
- [6] К.Л. Муратиков, А.Л. Глазов, В.И. Николаев, Д.Н. Роуз, Д.Е. Думар. Письма в ЖТФ 27, 33 (2001).
- [7] Н.Н. Песчанская, Г.С. Пугачев, П.Н. Якушев. Механика полимеров 2, 357 (1977).
- [8] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, Ю. Христова, А. Топлийска. Высокомолекуляр. соединения А 35, 1493 (1993).
- [9] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, В.Ю. Суrowова. ФТТ 37, 2602 (1995).
- [10] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская. В кн.: Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов. ФТИ, Л. (1987). 166 с.
- [11] Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, Ю.П. Степанов, В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев. ФТТ 31, 271 (1989).
- [12] Н.Н. Песчанская, В.А. Степанов, В.В. Шпейзман. ФТТ 26, 2387 (1984).
- [13] В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев. Процессы пластического структурообразования металлов. Наука і тэхніка, Минск (1994). 232 с.
- [14] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, А.К. Андреев, Г.Е. Коджаспиров, Ю.П. Солнцев, П.Н. Якушев. Проблемы прочности 7, 115 (1987).