

УДК 622.831.32;624.131 543 (575.2) (04)

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ИХ ТЕНЗОРА В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ

*К.Т. Тажобаев* – докт. техн. наук

The non-destructive method of determination of residual stresses and tensor in hard materials is proposed.

Остаточные напряжения достаточно детально изучены в технических материалах: в металлах, стекле, керамике, полимерах, смолах и т.д. [1, 2, 7–13]. В таких природных образованиях, как горные породы, минералы остаточные напряжения остаются малоизученными, хотя они в определенных случаях могут обуславливать такие катастрофические явления, как горные удары и тектонические землетрясения [3, 14]. Для технологов, имеющих дело с проявлениями остаточных напряжений в виде упрочняющего или разупрочняющего фактора, а в ряде случаев в виде непредсказуемого спонтанного взрывного разрушения хрупких искусственных материалов, а иногда даже металлических конструкций [14], в первую очередь необходимы знания о величинах и знаке остаточных напряжений. Механиками твердых деформируемых сред остаточные напряжения трудно воспринимаются, так как по классической теории упругости после снятия нагрузок всякие напряжения исчезают. К тому же по своей природе, как уже установлено, остаточные напряжения весьма неоднородны в пространстве в разных масштабных уровнях, начиная с кристаллических отдельностей и зерен твердых материалов, они изменяются скачкообразно и знакопеременно [3]. Поэтому эти напряжения в настоящее время не поддаются строгому теоретическому описанию. Однако при решении определенных инженерных задач с объективными фактами наличия неоднородных и весьма значительных остаточных напряжений, как бы тру-

ден не был их учет, с ними необходимо считаться и стремиться к их оценке и учету.

Главная проблема в изучении остаточных напряжений – это надежное определение их величин и знака, установление закона их распределения в пространстве. Существующие методы определения остаточных напряжений весьма трудоемки, имеют непреодолимые недостатки. Например, методы частичной и полной разгрузки, несмотря на высокую точность, искажают результаты вследствие необходимости создания отверстий или надрезов, главным образом из-за того, что при этом проявляется и разгружается только часть остаточных напряжений вблизи отверстия или надреза. Голографическим интерференционным методам присущи эти же недостатки. Рентгенографические методы позволяют определять остаточные напряжения только вблизи свободной поверхности, где остаточные напряжения частично разгружены при образовании этой поверхности. Методы фотоупругости применимы только для прозрачных, оптически активных материалов. Все указанные методы позволяют определить остаточные напряжения в определенных точках.

Анализ существующих методов определения остаточных напряжений показал, что наиболее надежным, перспективным и оперативным методом является ультразвуковой метод, основанный на параметрах прохождения поперечных поляризованных волн через твердый материал.

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что разность времени прохождения поперечных поляризованных волн с параллельным и скрещенным (ортогональным) вектором поляризации, отражает величину и знак остаточных напряжений. Для количественного определения величин остаточных напряжений необходимо было установить закономерность изменения указанного ультразвукового параметра от величины и знака остаточных напряжений, обосновать расчетную формулу. Для исследования остаточных напряжений в горных породах с помощью ультразвукового метода необходимо принять следующие постулаты:

Распространение через горные породы ультразвуковых волн необходимо рассматривать как мгновенные упругие знакопеременные микродеформации в микроструктурных элементах среды согласно структурной модели [4].

Процессы упругой продольной и поперечной деформации микроструктурных элементов при одноосном сжатии в пределах упругости и малых промежутках времени, подобны процессам распространения продольных и поперечных ультразвуковых волн.

Время прохождения поляризованной поперечной волны через напряженные участки существенно отличается от времени прохождения через ненапряженные участки при прочих равных условиях.

Известно, что для условия одноосного сжатия

$$\sigma_Z = \varepsilon_{np} E = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} E, \quad (1)$$

где  $\Delta \ell = \ell_i - \ell_0$  – абсолютная продольная деформация;  $\sigma_Z$  – нормальное напряжение по направлению Z; E – модуль упругости;  $\varepsilon_{np}$  – относительная продольная деформация;  $\ell_0$  – первоначальный продольный размер;  $\ell_i$  – продольный размер после нагружения.

Исходя из значения коэффициента Пуассона  $\mu = \frac{\varepsilon_{non}}{\varepsilon_{np}}$  и из уравнения (1) можно записать:

$$\sigma_Z = \frac{\varepsilon_{non}}{\mu} E, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{non}$  – относительная поперечная деформация. Экспериментально установлено,

что  $\frac{\varepsilon_{non}}{\varepsilon_{np}} = \frac{1}{2} \frac{T_S}{T_P}$ , отсюда

$$\varepsilon_{non} = \frac{1}{2} \varepsilon_{np} \frac{T_S}{T_P}, \quad (3)$$

где  $T_S, T_P$  – время прохождения поперечной и продольной волны через определенную базу соответственно.

Экспериментальными исследованиями, проведенными нами в разных твердых материалах, установлено, что изменение величины нормального напряжения пропорционально изменению величины  $T_{\Delta S} = T_{BC} - T_{BP}$ ,

где  $T_{\Delta S}$  – разность времени прохождения поперечных поляризованных волн с параллельным и скрещенным (ортогональным) вектором поляризации;  $T_{BC}, T_{BP}$  – время прохождения поляризованной поперечной волны со скрещенным и параллельным вектором поляризации соответственно через заданную базу твердого тела.

Поскольку за основу берется зависимость (1), обоснуем и докажем теорему равенства относительных величин функции и аргумента.

**Теорема:** В функциях типа  $Y_0 = b X_0$  относительная величина функции  $\varepsilon_y = \frac{Y_{\Delta}}{Y_0}$ , при

увеличении или уменьшении i-того значения функции  $Y_i$  относительно начального значения  $Y_0$ , равно относительной величине аргумента

$\varepsilon_x = \frac{X_{\Delta}}{X_0}$  при увеличении или уменьшении

i-того значения аргумента  $X_i$  относительно начального значения  $X_0$ , где  $X_{\Delta} = X_i - X_0$ ;

$$Y_{\Delta} = Y_i - Y_0.$$

Теорему докажем на примере поперечной деформации цилиндрических тел для случая одноосного сжатия. Как известно, при одноосном сжатии цилиндрического тела происходит поперечное расширение, которое может

характеризоваться относительной радиальной

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_0} \text{ и относительной тангенциальной}$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \text{ деформацией, где } \Delta r = r_i - r_0 \text{ – абсо-}$$

лютная радиальная деформация, мм;  $r_0$  – первоначальный радиус цилиндрического образца;  $\Delta \ell = \ell_i - \ell_0$  – абсолютная тангенциальная деформация, мм;  $\ell_0$  – первоначальная длина окружности цилиндра;  $r_i$ ,  $\ell_i$  – радиус и длина окружности после деформации соответственно.

Известно, что  $\ell_0 = 2\pi r_0$ , тогда

$$\frac{\Delta \ell}{\ell_0} = \frac{\ell_i - 2\pi r_0}{2\pi r_0} = \frac{2\pi r_i - 2\pi r_0}{2\pi r_0} = \frac{r_i - r_0}{r_0} = \frac{\Delta r}{r_0},$$

то есть  $\varepsilon_\phi = \varepsilon_r$ .

Теорема доказана.

Исходя из теоремы и по аналогии с уравнением (1) в соответствии с экспериментальными данными и постулатом 2 в первом приближении запишем:

$$\sigma_z = \frac{T_{\Delta S}}{T_{ВП}} K, \quad (4)$$

где  $Z$  – направление распространения продольной волны;  $K$  – коэффициент напряженности.

Подставляя значение  $\varepsilon_{non}$  из уравнения (3) в уравнение (2), получим:

$$\sigma_z = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{np}}{T_p \mu} \frac{T_s E}{\mu}. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) получим:

$$\frac{T_{\Delta S}}{T_{ВП}} K = \frac{\varepsilon_{np}}{2} \frac{T_s E}{T_p \mu}. \quad (6)$$

Подставляя значение  $\varepsilon_{np} = \frac{\sigma_z}{E}$  в уравнение (6), получим:

$$\frac{T_{\Delta S}}{T_{ВП}} K = \frac{\sigma_z}{2} \frac{T_s}{T_p \mu}, \text{ отсюда:}$$

$$\sigma_z = \frac{2}{T_{ВП}} \frac{T_{\Delta S} T_P \mu K}{T_S}. \quad (7)$$

Значение  $K$  определяется из опытов прозвучивания или механических испытаний об-

разцов, так как данный коэффициент зависит от свойств упругости материала. При прозвучивании с использованием поляризованных поперечных волн

$$T_S = \frac{T_{ВП} + T_{ВС}}{2}. \quad (8)$$

На основе экспериментальных исследований остаточных напряжений в эпоксидных смолах ЭД-6 и метасоматитах Кумторского месторождения нами было установлено, что

$$K = \frac{E\mu^2}{2}. \text{ С учетом этого из уравнения (7)}$$

окончательно получим:

$$\sigma_z = \frac{T_{\Delta S} T_P}{T_{ВП} T_S} E \mu^3. \quad (9)$$

Прозвучивая по направлениям  $X$  и  $Y$ , можно определить нормальные напряжения по этим направлениям  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ . После их определения по трем взаимно ортогональным направлениям можно определить касательные напряжения на взаимно ортогональных поверхностях. Для определения касательных напряжений определяются главные нормальные напряжения для каждой взаимно ортогональной поверхности путем поворота излучателя и приемника поляризованных поперечных волн акустополарископа [5]. Измеряется время прохождения поляризованной поперечной волны через базу, определяемую характерным объемом изучаемой среды,  $T_{ВП}$ ,  $T_{ВС}$  через каждые  $10^0$  от нуля до  $360^0$  для параллельного и скрещенного состояния преобразователей.

Например, после определения главных нормальных напряжений по величине определения напряжений для различных направлений путем измерения ультразвуковых параметров через каждые  $10^0$  от нуля до  $360^0$  для параллельного и скрещенного состояния преобразователей касательное напряжение определяется по формуле:

$$\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \cdot \sin 2\alpha, \quad (10)$$

где  $\tau_{xy}$  – касательное напряжение на плоскости  $XY$ ;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – главные (максимальные и минимальные) нормальные напряжения;  $\alpha$  – угол между направлением  $\sigma_1$  и положительным направлением оси  $X$ , отсчитываемый

Данные сравнения величин остаточных напряжений, установленных методами фотоупругости и ультразвукового прозвучивания в плоской модели 2-1 с наведенными остаточными напряжениями вдоль и поперек ширины и по модельному образцу 1-06 (II)

Среднее нормальное напряжение по ультразвуковому методу, МПа	4,3	-11,2	14,1	13,3	-3,3	-2,5
Главное нормальное напряжение по методу фотоупругости, МПа	6,8	-10,0	13,0	10,0	-2,5	-2,3
Отклонения в %	37	10,7	7,8	24,8	24,0	8,0

Примечание: данные последней колонки относятся к образцу 1-06(II).



а



б

Рис. 1. Среднее остаточное напряжение в модели 2-1 с наведенными остаточными напряжениями: а – вдоль ширины модели; б – поперек ширины модели, ЭД-6.

против часовой стрелки. Положение главных нормальных напряжений определяется по круговой диаграмме после прозвучивания через каждые  $10^0$  от нуля до  $360^0$  для параллельного и скрещенного состояния преобразователей.

Таким образом, прозвучивая в трех взаимно ортогональных направлениях, определяя время прохождения продольной и поперечных поляризованных волн, определяются все девять компонентов остаточных напряжений, то есть тензор остаточных напряжений для характерного объема (элементарного куба). Характерный объем среды определяется с учетом размеров составляющих ее структурных элементов и представительности объема. Следует отметить, что величины всех определяемых данным методом компонент напряжений представляют средние значения для средней линии базы прозвучивания.

Сравнение результатов определения остаточных напряжений, полученных на основе предложенной формулы (9), и методом фотоупругости, показали достаточно хорошее соответствие данных и для случаев изменения знака этих напряжений (см. таблицу).

На рис. 1а и б в качестве примера приведены результаты определения остаточных напряжений на моделях из эпоксидной смолы.

На рисунке видно, что в пределах модели остаточные напряжения изменяются скачкообразно и знакопеременно, имеют периодический характер, что согласуется с результатами определения остаточных напряжений методом фотоупругости [12], а также методом полной разгрузки, основанной на тензометрии [3].

#### Литература

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. Гуша О.Н. Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений. Состояния и перспективы // Экспер. методы исследования деформаций и напряжений. – Киев, 1983. – С. 77–81.
3. Тажиббаев К.Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. – Фрунзе: Илим, 1989. – 180 с.
4. Тажиббаев К.Т. Деформация и разрушение горных пород. – Фрунзе: Илим, 1986. – 106 с.
5. Горбачевич Ф.Ф. Акустополаризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1985. – 30 с.
6. Гуца О.И., Лебедев В.К. Измерение остаточных напряжений в сварных соединениях без разрушения // Автоматическая сварка. – Киев: Изд-во КДНТИ, 1969. – №1. – С. 42–44.
7. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений // Заводск. лаб. – 1950. – №2. – С. 188–192.
8. Витман Ф.Ф. Остаточные напряжения. – М.; Л.: ГТТИ, 1993. – 67 с.
9. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустопругость. – Киев: Наукова думка, 1977. – 152 с.
10. Лобанов Л.Н. Определения остаточных напряжений методом голографической интерферометрии с использованием одной голограммы // ДАН СССР. – 1983. – 271. - №3. – С. 557–561.
11. Чернышев Г.Н., Антонов А.А., Морозов В.К. Способ определения внутренних остаточных напряжений. А.с. СССР №807038, 1981.
12. Антонов А.А. Лазерная интерферометрия в задачах об остаточных напряжениях // Тр. всес. семин. по остат. напряжениям и методам регул. – М., 1982. – С. 18–30.
13. Тажиббаев К.Т. О причинах и механизме горных ударов и землетрясений. Исследование, прогноз и предотвращение горных ударов: Матер. IX всес. конф. по механике горных пород. – Бишкек, 1991. – С. 139–167.
14. Камтю Ф. Влияние остаточных напряжений на работу конструкций // Остаточные напряжения в металлах и конструкциях. – М., 1957. – С 9–33.