

ISSN 0002-3221

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН
УЛУТТУК ИЛИМДЕР
АКАДЕМИЯСЫНЫН

КАБАРЛАРЫ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

2012

3

9

0

Научно-издательский совет:

академик Эркебаев А.Э. (главный редактор);
академик Плоских В.М. (зам. главного редактора);
член-корр. Ашимов И.А. (отв. секретарь);
академик Айдаралиев А.А.
академик Айтмагов И.Т.
академик Алдашев А.А.
академик Борубаев А.А.
академик Жоробекова Ш.Ж.
академик Какеев А.Ч.
академик Койчуев Т.К.
академик Кудаяров Д.К.
академик Теменов Ж.Т.
академик Маматканов Д.М.
академик Шарипалиев Ж.Ш.
член-корр. Омаров Т.Т.

Журнал основан в 1966 г.

Редакторы *Р.Д. Мукамбетова, Е.В. Камарова, Е.И. Полихова*
Компьютерная верстка *А.Ж. Малдыбаева*
Дизайн обложки *А.Ж. Малдыбаева*

Подписано в печать 11.10.12. Формат 60×84 1/4.
Печать офсетная.
Объем 14 п. л., 13,5 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.

Издательство "Илим",
720071, г. Бишкек, проспект Чуй, 265а

УДК 622.831.32; 624.131.543

Метод определения остаточных и действующих напряжений в горных породах, основанный на законе изменения скорости поперечной поляризованной ультразвуковой волны от напряжений в твердых материалах

К.Т. ТАЖИБАЕВ, докт. техн. наук, проф.,

Д.К. ТАЖИБАЕВ, канд. техн. наук, с. н. с.,

М.С. АСМАТАЛИЕВА, и. с.

Института геомеханики и освоения недр НАН КР

The basic methodical positions of definition of residual and effective stresses in rocks based on application of the law of change of speed of the cross-section polarized ultrasonic wave from stresses in solid materials are resulted.

Нами было показано, что зоны высокой концентрации остаточных напряжений в горных породах являются очаговыми зонами тектонических горных ударов и землетрясений [18, 19], то есть при нарушении равновесия тринтерными силами остаточные напряжения приводят к динамическому разрушению горных пород в объемных очагах, обуславливая вышеуказанные катастрофы [21]. Известные факты скачкообразного изменения деформаций горных пород перед горными ударами и землетрясениями [1, 13, 24, 25] были объяснены проявлением остаточных напряжений в деформации горных пород [18, 19]. Следует отметить, что, несмотря на многочисленность разработанных методов, оперативное и надежное определение остаточных и действующих напряжений остается одной из главных проблем механики горных пород.

Недостатками известных и широко распространенных методов определения действующих, в том числе и остаточных, напряжений путем образования новых поверхностей (методы разгруз-

ки) [2, 4, 5, 6, 7, 8] являются их невысокая точность из-за неполной разгрузки существующих остаточных напряжений при образовании поверхностей (надрезов, отверстий), ограниченность их применения из-за частичного разрушения конструкций, низкая информативность из-за искажений первоначальных напряжений.

В последнее время достаточно интенсивно развиваются теоретические и экспериментальные подходы по применению скорости прохождения поперечной поляризованной волны для определения напряжений [3, 10, 11, 12, 26].

Нами был выявлен закон изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой (поперечной) волны от изменения механического напряжения в твердых материалах [9]. Сущность данного закона заключается в том, что изменение механического напряжения в твердых материалах приводит к пропорциональному изменению относительной величины скорости прохождения ульт-

ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны в направлении, перпендикулярном к направлению действия напряжения. Функциональная связь между напряжениями, их направлением, скоростями распространения поляризованных сдвиговых волн, волновым модулем напряжения K выражается по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \left(\frac{V_{xoz}}{V_{xz}} - 1 \right) K_x, \quad \sigma_y = \left(\frac{V_{yoz}}{V_{yz}} - 1 \right) K_y; \\ \sigma_z &= \left(\frac{V_{zoy}}{V_{zy}} - 1 \right) K_z \end{aligned} \quad (1),$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальное напряжение по направлению X, Y, Z соответственно;

K_x, K_y, K_z – волновой модуль напряжения (название наше) по направлениям X, Y, Z соответственно;

V_{xz}, V_{yz}, V_{zy} – скорость прохождения через определенную базу нагруженного материала ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны по направлениям X, Y, Z соответственно;

$V_{xoz}, V_{yoz}, V_{zoy}$ – скорость прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны по направлениям X, Y, Z соответственно при отсутствии напряжения (ненагруженное состояние).

Изменение относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны с вектором поляризации, совпадающим с направлением напряжения, обусловлено тем, что изменение напряжения в направлении, перпендикулярном к направлению прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны, вызывает деформацию материала.

Значение K (данной показатель нами был назван волновым модулем напряжения, так как имеет размерность напряжения) для каждого материала определяется экспериментально по следующей формуле:

$$K_x = \frac{\sigma_x}{\omega_x}, \quad K_y = \frac{\sigma_y}{\omega_y}, \quad K_z = \frac{\sigma_z}{\omega_z},$$

$$\text{где } \omega_x = \left(\frac{V_{xoz}}{V_{xz}} - 1 \right); \quad \omega_y = \left(\frac{V_{yoz}}{V_{yz}} - 1 \right); \quad \omega_z = \left(\frac{V_{zoy}}{V_{zy}} - 1 \right) \quad (2),$$

Волновой модуль напряжения K экспериментально определяется при одностороннем сжатии призматического образца размерами $5 \times 5 \times 10$ см или $7 \times 7 \times 14$ см (представительный объем горной породы, материала) для разных уровней напряжения (рис. 1), например для разных значений σ_z (по силовизмерителю пресса и площади поперечного сечения образца). В средней части образца определяется скорость ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны в перпендикулярном к направлению действия напряжения направлении, например V_{xoz} . Величина V_{xoz} представляет начало отсчета, то есть значение скорости ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны для ненагруженного состояния.

Для изотропных материалов $K_x = K_y = K_z = K$. Для анизотропных (слоистых, кристаллических анизотропных) материалов значение волнового модуля напряжения K экспериментально определяется по соответствующим направлениям.

Нами значения волнового модуля напряжения для некоторых горных пород были определены по указанной выше экспериментальной методике. Результаты определения среднего значения K представлены в табл. 1.

При известном значении волнового модуля напряжения, измерения скорости прохождения сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны, можно определять остаточные и действующие напряжения по установленным выше формулам (формула 1 и 2), то есть можно определять знак и величину компонент остаточных и действующих напряжений. Следует отметить, что действующее напряжение может включать в себя и остаточные напряжения (при их наличии, например, в породном массиве). В связи с этим остаточные напряжения при необходимости опре-

Таблица 1. Средние значения волнового модуля напряжения K и деформационных характеристик горных пород

Название (и место отбора) горной породы	Волновой модуль напряжения, $K \cdot 10^4$ МПа	Коэф. Пуассона	Модуль упругости, $E \cdot 10^4$ МПа	Модуль сдвига, $G \cdot 10^4$ МПа
Мрамор (Кемин)	0,0345	0,2089	5,2220	1,5770
Мрамор тонкой (Токтогул)	0,0542	0,2010	6,9787	1,8585
Гранодиорит	0,5974	0,1900	6,6915	1,8066
Мелкокристаллический (Кумтор) RS №5	1,0424	0,2334	8,0797	2,0645
Гнейс (Жеты-Огуз)	0,2113	0,1693	7,7177	2,1368
Мраморизованный известняк	0,4328	0,219	4,31	1,12



Рис. 1. Нагружение (на прессе ИДМ-100) и звуковязание (УК-10 ПМ) призматическом образце

делаются отдельно в свободных от внешней нагрузки представительных кусках горной породы, отобранных из места измерения скорости волны в породном массиве. Обычно оптимальные напряжения определяются в лабораторных условиях.

Действующее в породном массиве напряжение определяется по следующей методике:

1. Создается в породном массиве глыбке параллельные к заданной оси, например к оси Z (вертикальное направление), две поверхности, установкой гидравлической (пескоструйной) резы породы с расстоянием между ними 7 сантиметров (ближе прозвучивания) путем образования щелей (для размещения преобразователей единичных волн).

2. Очищаются, высушиваются поверхности, и наносится тонкий слой контактной среды (полиэтилена, искусственный мед) на глыбке поверхности породы, а также и преобразователей, после чего преобразователи с векторами поляризации, направленными по заданной оси (Z), слегка прижимаются (постоянной силой) к гладкой поверхности породы.

3. Преобразователи подсоединяются к ультразвуковому прибору (УК-10 ПМ), и после прогрева прибора в течение 20 минут не менее 10 раз снимается отчет времени прохождения единичной волны через заданную базу (7 см) в автоматическом режиме в при точности измерения

времени $\pm 0,1$ мкс, до средней истинной времени определяется скорость поляризованной единичной ультразвуковой волны.

4. При проведении контроля напряжения (в случае существенного изменения напряжения вследствие быстрого продвижения очагового дробя, влияющего на напряженное состояние) прибор и преобразователи остаются на период времени контроля, и периодически проводятся измерения времени прохождения единичных волн по пункту 3.

5. В случае определения действующего напряжения после измерения времени прохождения единичных волн по пункту 3 преобразователи снимаются, вырезается глыбка породного массива (кусок) с размерами $7 \times 7 \times 15$ см в том же месте, где проводилось измерение времени прохождения единичной волны, сохраняя базу прозвучивания (7 см).

6. Из отобранного куска изготавливается призма с размерами $7 \times 7 \times 14$ см.

Для двуплой призмы определяется волновой модуль напряжения K по указанной выше последовательности, прозвучивая поляризованной единичной волной при разных уровнях нагрузки сжатия по заданной, то есть именно по той базе (7 см), по которой проводилось прозвучивание в породном массиве.

7. На основе скорости поляризованной единичной волны, измеренной в породном массиве, и

значения волнового модуля напряжения K , а также скорости поляризованной сдвиговой волны для ненагруженного состояния определяется, например, вертикальная составляющая нормального напряжения породного массива σ_z по формуле 1. Также определяются и другие составляющие напряжения и по другим направлениям.

Применение для образования гладких поверхностей и щелей в горных породах установки гидроабразивной (пескоструйной) резки обеспечивает неизменность механических свойств и остаточных напряжений горных пород в массиве и вырезанных кусках, так как при такой резке температура, приводящая к изменению свойств и остаточных напряжений породы, отсутствует. Для образования глубоких щелей необходимо создавать полые установки гидроабразивной резки горных пород.

Для определения остаточных напряжений, измерения скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны в кубическом образце с размерами 7x7x7 см, свободном от внешней нагрузки, необходимо проводить в следующей последовательности:

1. Путем прозвучивания по направлениям через каждый 1° или 10° от нуля до 180° , поворачивая излучатель и приемник акустополарископа, определяется значение скорости прохождения по-

ляризованной сдвиговой волны V_{sp} для параллельного и перпендикулярного (к рассматриваемому направлению) вектора поляризации для каждого направления по трем ортогональным плоскостям.

2. По признаку равенства времени или скорости прохождения параллельных V_{sp} и перпендикулярных V_{sp} сдвиговых поляризованных волн для заданной базы прозвучивания определяется скорость прохождения сдвиговой волны для случая отсутствия остаточных напряжений – V_{sp0} (один из признаков отсутствия остаточных напряжений $V_{sp} = V_{sp0}$).

3. В случае обнаружения направления или участка без остаточных напряжений фиксируются все значения скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны по всем вышеуказанным направлениям и по трем ортогональным плоскостям, а затем полностью выводятся (снимаются) из образца остаточные напряжения известным методом отжига.

4. Определяется скорость ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны для образца без остаточных напряжений (после снятия остаточных напряжений) – V_{sp0} и среднее значение волнового модуля напряжения K по вышеуказанной последовательности.

5. На основе значений скоростей прохождения волн для разных направлений и плоскостей,

График остаточных напряжений для разных направлений, метасамодит (р. Кумтор, RS №5, обр. 3-4)



Рис. 2. Значения остаточных напряжений образца метасамодита (по одной плоскости, рудник Кумтор, проба RS № 5, обр. 3-4)

а также значения скорости для нагруженного состояния V_{50} , и среднего значения волнового модуля напряжения определяются по формуле 1 значения остаточных напряжений.

Прозвучивая по направлениям Z, Y, X с помощью ультразвуковых поляризованных свинговой волны, можно определить, по ортогональным взаимным направлениям нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и главные нормальные напряжения по соответствующим плоскостям путем поворота излучателя и приемника поляризованной свинговой волны через каждый 1° или 10° от нуля до 180° , синхронно поворачивая излучатель и приемник акустополарископа. После определения главных нормальных (максимальных и минимальных) напряжений можно определять и касательные напряжения.

Следует отметить, что величины напряжений, определяемых на основе формулы 1, представляют собой средние (результатирующие) значения напряжения для заданных баз прозвучивания.

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты определения остаточных напряжений в образце (размер $11,2 \times 7,27 \times 3,43$ см, база прозвучивания $7,27$ см) метасамонита месторождения Кумтор.

Литература

1. Авракин С.Г. Горные удары. – М.: Углетехиздат, 1959. – 234 с.
2. Биргер Н.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – С. 232.
3. Гуца О.Н., Лебедев В.К. Измерение остаточных напряжений в сварных соединениях без разрушения // Автоматическая сварка. – Киев: Изд. КДНТИ, 1969. – №1 – С. 42–44.
4. Давыдов Н.Н. Об измерении остаточных напряжений // Заводская лаборатория, 1950. – №2. – С. 188–192.
5. Витман Ф.Ф. Остаточные напряжения. – М.: Л.: Гостехиздат, 1933. – 87 с.
6. Лобанов Д.Н. Определения остаточных напряжений методом голографической интерферометрии с использованием одной голограммы // ДАН СССР. – 1983. – 271. – №3 – С. 557–561.
7. Чернышова Г.И., Антонюк Л.А., Мироня В.К. Способ определения внутренних остаточных напряжений / А. с СССР №807038. – 1981.
8. Антонюк Л.А. Лазерная интерферометрия в задачах об остаточных напряжениях // Тр. Всесоюз. по остат. напряжениям и методам регул. – М., 1982. – С. 18–30.
9. Тажибаев К.Т. Закон изменения времени прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений в твердых средах // Известия НАН КР – №3–2010 г. – С. 36–44.
10. Гуца О.Н., Мазорин Ф.Г., Гуца О.Н., Лебедев В.К. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. – Киев: Наукова думка, 1974. – 108 с.
11. Гуца О.Н., Мазорин Ф.Г., Гуца О.Н. Введение в акустополарископию. – Киев: Наукова думка, 1977. – 152 с.
12. Гуца О.Н. Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений: Составила и перевела // Экспер. методы исследования деформаций и напряжений. – Киев, 1983. – С. 77–81.
13. Шретт В.В., Касюк В.А., Борзин В.И. и др. Исследование закономерностей динамических явлений в зоне влияния зонтичных работ Таштановского рудника // Приток и предотвращение горных ударов при разработке рудных месторождений / Матер. 5-го координац. совещ. по пробл. горных ударов на рудных месторождениях – Фрунзе, 1986. – С. 67–68.
14. Горбачев Ф.Ф. Акустополаризационные измерения характеристики анизотропии горных пород. – Алматы: Кольский научный центр РАН, 1985. – 30 с.
15. Тажибаев К.Т., Ахматалиева М.С., Тажибаев Д.К. Способ определения остаточных напряжений в твердых материалах // Патент № 1245 КР от 26 февраля 2010 года.
16. Тажибаев К.Т. Деформация и разрушение горных пород. Фрунзе, Илим, 1986. – 106 с.
17. Тажибаев К.Т., Ташибаева Л.С. Способ определения остаточных напряжений в горных породах // Патент № 658 Кыргызской Республики. – Бишкек, 2004.
18. Тажибаев К.Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. – Фрунзе, Илим, 1989. – 179 с.
19. Тажибаев К.Т. О причинах и механизме горных ударов и землетрясений // Исследования, приток и предотвращение горных ударов: Материалы IX Всесоюзной конференции по механике горных пород. – Бишкек, 1991. – С. 139–167.
20. Тажибаев К.Т., Ташибаев Д.К. Технологические меры предупреждения тектонических горных ударов и землетрясений // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2007. – Т. 7. – №1. – С. 24–28.

21. *Тажиббаев К.Т., Тажиббаев Д.К.* Механизм тектонических горных ударов, землетрясений и теоретическая модель их очагов // Сб. докл. международн. совещ. 14–16 апреля 2004 г. «Техногенная сейсмичность при горных работах: Модели очагов, прогноз и профилактика». – Ч. 1. – Апатиты, 2004. – С. 185–196.
22. *Тажиббаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажиббаев Д.* Перезаружающий метод определения остаточных и действующих напряжений в горных породах / Тезисы докладов 2-й Международной научно-практической конференции «Перспективы развития научно-инновационной деятельности». – Бишкек, 2010. – С. 10–11.
23. *Тажиббаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажиббаев Д.К.* Перезаружающий метод определения остаточных и действующих напряжений твердых материалов // Сб. трудов Международной конференции 15–17 июня 2011 г. «Проблемы геомеханики и освоения недр». – Вып. 13. – Бишкек, 2011. – С. 164–175.
24. *Асида Т., Исикава К., Матсуда Т. и др.* Методы прогноза землетрясений, их применение в Японии (Пер. с англ.). – М.: Недра, 1984. – С. 312.
25. *Рихтбакер Т.* Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1979. – 335 с.
26. *Баждин В.Н., Панасенко Г.Д.* О возможной связи скорости ортогонально поляризованных поперечных волн с напряженным состоянием пород в массиве // Физ. свойства пород в массиве. – Новосибирск: СО АН СССР, 1982. – С. 29–33.
27. *Опарин В.Н.* Волны маятникового типа и геомеханические волноводы // Сб. трудов Междуна-
- родной конференции 15–17 июня 2011 г. «Проблемы геомеханики и освоения недр» – Вып. 13. – Бишкек, 2011. – С. 74–81.
28. *Тажиббаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажиббаев Д.К.* Результаты исследования остаточных напряжений в твердых материалах поляризованными ультразвуковыми волнами // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2008. – Т. 8. – №10. – С. 71–80.
29. *Чернышев Г.Н., Попов А.А., Козинцев В.М., Пономарев И.М.* Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. – М., 1996.
30. *Чернышев Г.Н., Попов А.А., Козинцев В.М.* Полезные и опасные остаточные напряжения // Ежемесячный естественнонаучный журнал РАН. Природа. – № 10. – 2002. – С. 17–24.
31. *Горбачев Ф. Ф.* Акустотомография породообразующих минералов и кристаллических пород. – Апатиты: Изд. Колыского научного центра РАН, 2002. – 140 с.
32. *Тажиббаев К.Т., Тажиббаев Д.К.* Рекомендации по предупреждению тектонических горных ударов и землетрясений / Национальный информационный центр Кыргызской Республики. Информационный листок № 3 (Т210). – Серия 52.13.35. – Бишкек, 1996.
33. *Тажиббаев К.Т.* Закон изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011. – Т. 11. – №11. – С. 151–156.