

МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ВОЛНОВОГО МОДУЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Тажибаев К. Т.¹, Акматалиева М. С.², Тажибаев Д. К.³

¹Тажибаев Кушбакали Тажибаевич - доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией,
лаборатория «Механика горных пород»;

²Акматалиева Минажат Сабыровна - научный сотрудник,
подразделение: лаборатория «Механика горных пород»;

³Тажибаев Данияр Кушбакалиевич / Tazhibaev Daniyar - кандидат технических наук, заведующий лабораторией,
лаборатория «Технология разработки месторождений»,
Институт геомеханики и освоения недр,

Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Аннотация: рассмотрены причины формирования остаточных напряжений в технических материалах и горных породах, формы проявления этих напряжений при нарушении их равновесного состояния. Проанализированы результаты существующих методов определения механического напряжения в твердых материалах, особенности остаточных напряжений и неточности при их измерении существующими методами. Предложен метод определения акустического параметра остаточных напряжений и волнового модуля напряжения горных пород. Представлены результаты определения указанных параметров механического напряжения.

Ключевые слова: горная порода, остаточное напряжение, волновой модуль напряжения, поляризованная волна, горный удар, удароопасность.

В ряде случаев возникает необходимость проверки наличия или отсутствия остаточных напряжений в технических твердых сооружениях, изделиях, конструкциях, деталях машин и механизмов, а также и в горных породах. Технологические остаточные напряжения могут формироваться при прокатке, ковке, волочении, сварке металлов, термической обработке, плавке и изготовлении из расплавов керамических, строительных, композитных, стекольных изделий. Обычно эти остаточные напряжения контролируются и снимаются путем длительного отжига или другими методами, так как при наличии локальных очагов высокой концентрации остаточных напряжений, впоследствии, при нарушении их равновесного состояния, они могут привести к внезапным динамическим, взрывоподобным разрушениям твердых конструкций, деталей механизмов и машин и т.д. В горных породах - в шахтах, горных выработках локальные остаточные напряжения, которые формировались и сохранились при неравномерном остывании расплавленной магмы (магматические и метаморфические горные породы) и в условиях неоднородной упруго-пластической деформации (предистория деформирования), могут привести к интенсивным стреляниям горных пород, сильным горным ударам. Эти динамические и катастрофические явления происходят в процессах выемки полезных ископаемых и при проходке горных выработок вследствие перераспределения напряжений [1, 2].

В случаях, когда удастся точно определить удароопасные высоко напряженные участки, катастрофические горные удары обычно предотвращают путем разгрузки опасных напряжений в этих участках сотрясательными маломощными взрывами [3]. Однако экспериментальное определение напряжений в подземных шахных и полевых условиях существующими методами является довольно трудоемкой и технически труднорешаемой задачей. Имеются также определенные трудности точного определения остаточных напряжений в твердых материалах из-за неоднородности и структурной связанности этих напряжений. Например, при применении известных методов (методы разгрузки или голографической интерферометрии) определения остаточных напряжений требуется образование новой поверхности путем сверления, резки, шлифовки, что искажает первоначальное напряженное состояние, а главное, остаточные напряжения, из-за их внутренней структурной связанности на уровне кристаллической решетки, разгружаются только частично, только в непосредственной близости к новой поверхности. Несмотря на высокую точность метод рентгеноструктурного анализа позволяет определять напряжения только вблизи свободной поверхности из-за не глубокого проникновения рентгеновских лучей через плотные материалы. В связи с этим в настоящее время интенсивно проводятся экспериментальные исследования с целью разработки более экспрессивных и точных методов определения механических напряжений, (в том числе остаточных) в твердых материалах. Из всех существующих методов наиболее перспективным является метод определения напряжений основанный на применении поперечной (сдвиговой) поляризованной ультразвуковой волны.

На основе исследований влияния механического напряжения на скорость распространения поляризованной поперечной ультразвуковой волны по заданным направлениям, в условиях совпадения направлений вектора поляризации ультразвуковой волны и главного нормального напряжения, нами разработан способ определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах [4]. На основе данного метода решаются задачи по повышению точности, расширению области применения и снижению

трудоемкости определения знака и величины остаточных и действующих напряжений в твердых материалах. При этом определение напряжений производят путем измерения скорости распространения ультразвуковых поляризованных поперечных волн в представительном объеме, через заданную базу. Сущность метода состоит в том, что определение механического напряжения в твердых материалах осуществляется по относительной величине скорости распространения ультразвуковой поперечной (сдвиговой) поляризованной волны

$\frac{V_{SO}}{V_S}$ в направлении, перпендикулярном к направлению действия напряжения в зависимости от

величины волнового модуля напряжения имеющего размерность напряжения $-K_i$ (название модуля наше). По данному методу вначале определяют изменение относительной величины скорости ультразвуковой поляризованной поперечной волны от напряжения твердого материала и среднее значение величины волнового модуля напряжения. Затем по соответствующим направлениям определяют остаточное или действующее напряжение по следующим формулам (закон Кушбакали) [5, 6]:

$$\sigma_X = \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right) K_Z ; \quad \sigma_Y = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right) K_X ; \quad \sigma_Z = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right) K_Y \quad (1),$$

где $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ - компоненты нормального напряжения по направлению X, Y, Z соответственно; K_X, K_Y, K_Z - волновой модуль напряжения по соответствующим направлениям; V_{SX}, V_{SY}, V_{SZ} - скорости распространения через представительную базу напряженного (нагруженного или с остаточными напряжениями) материала ультразвуковой поперечной поляризованной волны по соответствующим направлениям; $V_{SOX}, V_{SOY}, V_{SOZ}$ - скорости распространения ультразвуковой поперечной поляризованной волны по направлениям X, Y, Z соответственно при отсутствии напряжения (не нагруженное состояние, без остаточных напряжений).

Знак напряжений (растягивающий - положительный, сжимающий - отрицательный, как это принято в классической механике) определяется в соответствии со знаком величины $\left(\frac{V_{SO}}{V_S} - 1 \right)$ и K_i .

Введем обозначение

$$\omega_Z = \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right) ; \quad \omega_X = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right) ; \quad \omega_Y = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right) ,$$

тогда из формулы (1): $\sigma_X = \omega_Z K_Z ; \sigma_Y = \omega_X K_X ; \sigma_Z = \omega_Y K_Y$, откуда

$$K_X = \frac{\sigma_Y}{\omega_X} ; \quad K_Y = \frac{\sigma_Z}{\omega_Y} ; \quad K_Z = \frac{\sigma_X}{\omega_Z} \quad (2)$$

Величину ω назвали акустическим параметром напряжения (остаточного или действующего), так как величина и знак напряжения, в том числе остаточного, определяется и зависит главным образом от этого параметра. Например, при $V_{SOX} / V_{SX} > 1$ знак напряжения положительный, то есть напряжение растягивающее и т.д. Равенство нулю параметра ω означает отсутствие действующего или остаточного напряжения.

Необходимо отметить, что действующее напряжение, определяемое в массиве горных пород, может включать в себя и остаточные напряжения. В связи с этим остаточные напряжения, при необходимости, определяются отдельно в свободных от внешней нагрузки представительных кусках горной породы, отобранных из места измерения скорости распространения ультразвуковой поляризованной поперечной волны в породном массиве. Обычно остаточные напряжения определяются в лабораторных условиях. Для установления наличия или отсутствия остаточных напряжений, измерение скорости распространения ультразвуковой поляризованной поперечной волны в образце, свободном от внешней нагрузки, необходимо проводить в разных направлениях [7, 8].

Для предварительного определения знака (направления) и величины остаточных напряжений сначала необходимо определить параметр остаточных напряжений ω , а затем после определения волнового модуля напряжения K определяются величины остаточных напряжений по разным направлениям. На рисунке 1 и 2 в качестве примера представлены результаты определения параметра остаточных

напряжений в образцах горных пород месторождения Кумтор и зависимость волнового модуля напряжения для образца гранодиорита (Германия, Саксония).



Рис. 1. Графики параметра остаточных напряжений в объеме образца метасамотита - 1 и хлорит серицитового филлита - 2 для разных направлений (рудник Кумтор, θ^0 совпадает с направлением севера)

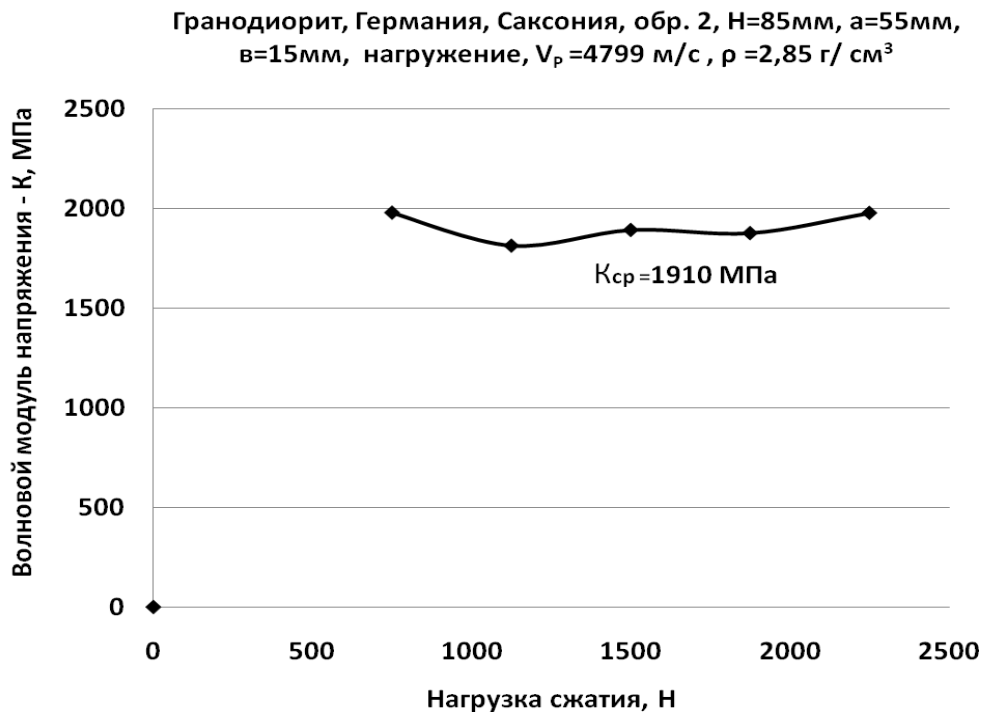


Рис. 2. Зависимость волнового модуля напряжения от нагрузки одноосного сжатия (гранодиорит, Германия, Саксония)

Следует отметить, что для определения параметра остаточного напряжения важно более точно определить скорость поляризованной поперечной волны для ненагруженного состояния (для направления, где остаточное напряжение отсутствует или близко к нулю) V_{SO} .

Из рисунка 1 видно, что в метасамотите, представляющем рудную зону, по сравнению с хлоритсерицитовым филлитом, имеются значительные сжимающие остаточные напряжения,

ориентированные субмеридионально. Данные рисунка 2 свидетельствуют о неизменности волнового модуля напряжения в пределах упругих деформаций для разных значений сжимающей нагрузки.

Следует отметить, что для широкого внедрения поляризационно акустического метода определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах [7, 8] необходимо исследовать и устанавливать значения волнового модуля напряжения для широкого круга твердых материалов, в том числе новых композитных.

Литература

1. *Тажобаев К. Т.* О причинах и механизмах горных ударов и землетрясений / Исслед., прогноз и предотвр. горных ударов // Матер IX Всес. конф. по механике горн. пород. Бишкек, 1991. С. 139-167.
2. *Тажобаев К. Т.* Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород. В двух томах. Т. 1. Бишкек: Издательство “Алтын Принт”, 2016. 352 с.
3. *Тажобаев К. Т., Тажибаев Д. К.* Технологические меры предупреждения тектонических горных ударов и землетрясений / Вестник Кыргызско-Российского славянского университета, 2007 г. Том 7. № 1. Бишкек. С. 24-28.
4. *Тажобаев К. Т., Акматалиева М. С., Тажибаев Д. К.* Способ определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах / Патент Кыргызской Республики: № 1826, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Кыргызской Республики, 29.01.2016 г.
5. *Тажобаев К. Т.* Закон изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета, 2011 г. Том 11. № 11. г. Бишкек. С. 151-156.
6. *Тажобаев К. Т., Тажибаев Д. К., Акматалиева М. С.* Закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах (закон Кушбакали) / Диплом № 453 на научное открытие от 3 октября 2013 года, г. Москва. Международная академия авторов научных открытий и изобретений, Российская академия естественных наук. // Научные открытия. 2013. Сборник кратких описаний. М. РАЕН, 2014 г. С. 48-50.
7. *Тажобаев К. Т., Акматалиева М. С., Тажибаев Д. К.* О методологии определения остаточных и действующих напряжений в горных породах с применением поляризованных ультразвуковых волн // Материалы Кыргызской секции 9 - международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». Том 2. М.: РАН, 2016. С. 39 - 46.
8. *Тажобаев К. Т., Тажибаев Д. К.* Поляризационно-акустический метод определения остаточных и действующих напряжений горных пород. // Неделя горняка. 2015. Москва. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 11, 2015. Издательство «Горная книга». М. С. 153-160.