

УДК 622.831

DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-8-206-211

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

К.Т. Тажибаяв, К.М. Маканов

Аннотация. Показана возможность определения остаточных и действующих механических напряжений в горных породах и технических твердых материалах на основе применения ультразвуковой поляризованной сдвиговой (поперечной) волны. Приведена методика определения механического напряжения в массиве горных пород. Проанализированы результаты лабораторных экспериментальных исследований показателей удароопасности горных пород. Установлено, что статическое разрушение при одноосном сжатии и равномерные изменения напряженности магнитного поля в процессе нагружения являются признаками неудароопасности горной породы. Доказано, что одним из главных факторов, определяющих удароопасность горных пород, является наличие в них неоднородных по своей природе остаточных напряжений, участков высокой концентрации этих напряжений в массиве горных пород, что согласуется с локальностью и приуроченностью горных ударов к разломам и зонам магматических горных пород.

Ключевые слова: горная порода; остаточное напряжение; ультразвук; поляризованная волна; удароопасность; магнитное поле; разрушение.

ТОЛКУН ПРОЦЕССИНИН НЕГИЗИНДЕ ТОО ТЕКТЕРИНИН ЧЫҢАЛУУСУН ЖАНА БУЗУЛУУСУН ИЗИЛДӨӨ

К.Т. Тажибаяв, К.М. Маканов

Аннотация. Макалада ультрадобуштук уюлдаштырылган жылышуу (туурасынан) толкундарын колдонуунун негизинде тоо тектериндеги жана техникалык катуу материалдардагы аракеттеги жана калдык механикалык чыңалууларды аныктоо мүмкүнчүлүгү көрсөтүлгөн. Тоо тектеринин массасындагы механикалык чыңалууну аныктоонун методикасы келтирилген. Тоо тектеринин жарылуу коркунучунун көрсөткүчтөрү боюнча лабораториялык эксперименталдык изилдөөлөрдүн натыйжалары талдоого алынган. Бир октук кысууда статикалык бузулуу жана жүктөө процессинде магнит талаасынын интенсивдүүлүгүнүн бирдей өзгөрүшү тоо тектеринин жарылуу коркунучунун жок экендигинин белгиси болуп белгиленди. Тоо тектеринин жарылуу коркунучун аныктоочу негизги факторлордун бири болуп аларда жаратылышы боюнча текши эмес калдык чыңалуулардын болушу, тоо тектеринин массивдериндеги бул чыңалуулардын жогорку концентрациялануучу участкторунун болушу, мунун өзү магмалык тоо тектеринин жаракаларына жана зоналарына тоо соккуларынын локалдуулугуна жана ырааттуулугуна дал келе тургандыгы далилденген.

Түйүндүү сөздөр: тоо тектери; калдык чыңалуу; ультрадобуштук; уюлдаштырылган толкун; жарылуу коркунучу; магнит талаасы; бузулуу.

INVESTIGATIONS OF STRESS AND ROCK DESTRUCTION BASED ON WAVE PROCESSES

K.T. Tazhibaev, K.M. Makanov

Abstract. The possibility of determining residual and acting mechanical stresses in rocks and technical solid materials based on the use of ultrasonic polarized shear (transverse) waves is shown. Methodology for determining mechanical stress in a rock mass is given. The results of laboratory experimental studies of rock burst hazard indicators are analyzed. It has been established that static fracture under uniaxial compression and uniform changes in the magnetic field strength during loading are signs of rock non-shock hazard. Experimental results have shown that one of the main

factors determining rock burst hazard is the presence in rock the residual stresses which are heterogeneous in nature, areas of high concentration of these stresses in a rock mass, which is consistent with the locality and confinement of rock bursts to faults and zones of igneous rocks.

Keywords: rock; residual stress; ultrasound; polarized wave; shock hazard; magnetic field; destruction.

Введение. Механические процессы, протекающие в горных породах при действии мощных упругих колебаний, изменяют первоначальное напряженное состояние и структуру среды, так как возникающие при этом волны несут в себе определенное количество энергии. Мощные волны по мере их распространения оказывают дополнительные эффекты, с искажением формы волны, усилением радиального давления, повышенным звукопоглощением. Вследствие воздействия волн обуславливаются особенности деформирования горных пород, изменяется проницаемость водогазонасыщенных пород, усиливаются газовыделения из жидкой фазы и происходят изменения их теплопроводности. Под действием мощных интенсивных колебаний, в горных породах может развиваться акустопластический эффект, который влияет на прочность и пластичность горных пород. А при амплитудах напряжения, превышающих предел упругости, происходят необратимые изменения механических свойств. В отличие от статического режима нагружения, внутренние напряжения, возникающие в горных породах под действием упругих колебаний, релаксируют несколько секунд после их прекращения, не оставляя долго действующих остаточных напряжений.

При импульсных динамических воздействиях на горную породу в пределах упругости, имеющиеся в породе остаточные напряжения снижаются, и при многократных таких воздействиях эти напряжения могут полностью разгружаться [1].

Экспериментально доказано, что под действием упругих колебаний количество дефектов и дислокаций увеличивается. При низких частотах упругие волны с большой амплитудой способствуют появлению новых дефектов и активизируют раскрытие существующих макро- и микротрещин.

Экспериментальными исследованиями доказано, что чем меньше проницаемость горных пород, тем больше эффективность воздействия упругих волн. При этом коэффициент проницаемости может возрасти в десятки раз. С увеличением температуры снижается эффективность воздействия волн на проницаемость породы. При повышении температуры с 25 до 65 °С она снижается в 4–8 раз. Эффективность теплопроводности в горных породах при распространении мощной упругой волны увеличивается, одновременно увеличиваются темп и зоны нагрева среды.

С другой стороны, маломощные ультразвуковые волны можно использовать для распознавания механических напряжений в твердых средах. Это возможно, например, при использовании для этой цели поляризованных сдвиговых (поперечных) маломощных (“неразрушающих”) ультразвуковых волн, так как такие волны имеют определенное направления (направление вектора поляризации), то есть они векторные, а как известно, механические напряжения, как и векторные, бывают сжимающими или растягивающими, и могут иметь разные пространственные направления каждый из этих напряжений.

Методы исследования. На основе экспериментальных исследований К.Т. Тажибаевым [2, 3] была установлена закономерность изменения относительной величины скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от изменения механического напряжения в твердых материалах. Закономерность заключается в том, что изменение механического напряжения в твердых материалах, в том числе в горных породах, приводит к пропорциональному изменению относительной величины скорости ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны, проходящей в направлении, перпендикулярном к направлению действия напряжения. В результате теоретических и экспериментальных исследований получена формула, позволяющая определить знак и величину действующих, а также и остаточных напряжений в твердых материалах (Закон Кушбакали). Формула, отражающая данную закономерность, имеет следующий вид [3]:

$$\sigma_x = \left(\frac{V_{soz}}{V_{sz}} - 1\right)K_z; \sigma_y = \left(\frac{V_{sox}}{V_{sx}} - 1\right)K_x; \sigma_z = \left(\frac{V_{soy}}{V_{sy}} - 1\right)K_y, \quad (1)$$

где V_{sx} , V_{sy} , V_{sz} – скорости прохождения поперечной поляризованной ультразвуковой волны по X, Y, Z соответственно; V_{sox} , V_{soy} , V_{soz} – скорость сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны по направлениям X, Y, Z при отсутствии напряжения (ненагруженное состояние, без остаточных напряжений); K – волновой модуль напряжения материала, имеющий размерность напряжения (новая характеристика твердого материала).

Измерив скорость сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны, если известно значение волнового модуля напряжения, по формуле (1) можно определить действующие и остаточные напряжения. Величина волнового модуля напряжения материала (горной породы) определяется в лабораторных условиях.

Напряжения в породном массиве, можно определить по следующей методике:

1. В породном массиве по заданному направлению, например, по оси Z (вертикальное направление) пробуриваются две параллельные скважины (шпуры), с расстоянием между ними порядка 7–15 см (для размещения преобразователей сдвиговых волн с выпуклыми контактными поверхностями, соответствующими цилиндрической поверхности и диаметру скважины).

2. Поверхности скважин предварительно очищаются и высушиваются, на контактную поверхность преобразователей сдвиговых волн наносится тонкий слой контактной среды (искусственный мед, полисахариды). Далее преобразователи с векторами поляризации, направленными по заданной оси Z, слегка (постоянной силой) прижимаются к гладкой цилиндрической поверхности скважины.

3. К ультразвуковому прибору (УК 10 ПМ) подсоединяются преобразователи, и после прогрева в течение 20 мин не менее 10 раз снимается отчет времени прохождения сдвиговой волны через заданную базу (7–15 см) при точности измерения времени $\pm 0,01$ мкс, и далее по средней величине времени определяется скорость сдвиговой ультразвуковой волны.

Значение волнового модуля напряжения K связано с особенностью упругопластической деформации при статическом сжатии, обусловленной вещественным составом, механическими свойствами и структурой материалов. Такие материалы как бронза, органическое стекло, алюминий и др., имеют отрицательный знак волнового модуля напряжений, они относятся к материалам с ярко выраженными пластическими свойствами. А такие материалы как сталь 3, горные породы, эпоксидная смола ЭД-6 имеют положительное значение волнового модуля. Например, в пределах упругости волновой модуль напряжения K оставался постоянным для такого однородного материала, как эпоксидная смола ЭД-6, сталь 3 и т. д. Для мраморизованного известняка (месторождение Ингичке), испытанного до разрушения, вблизи предела прочности, т. е. при напряжении сжатия 120 МПа (разрушение наступило при 121,3 МПа) волновой модуль напряжения резко изменяется, а при остальных нагрузках в пределах упругости оставался постоянным.

Результаты исследования. На основе уприведенной закономерности и формулы (1) разработан ультразвуковой – поляризационно акустический метод определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах, в том числе горных породах [4, 5]. Для геомеханики весьма важно надежное определение действующих в породном массиве напряжений, особенно остаточных напряжений горных пород. Экспериментально доказано, что один из главных факторов, определяющих удароопасность горных пород, это наличие участков высокой концентрации остаточных напряжений в них [6–8].

В работе [9], посвященной изучению удароопасности горных пород, проводились эксперименты на установке для измерения электромагнитных излучений (ЭМИ) при деформировании породных образцов в случае их одноосного нагружения до разрушения. При исследовании рудных и породных кернов Таштагольского удароопасного железорудного месторождения было отмечено следующее. Породные образцы разрушались в основном с хлопающим (иногда стреляющим) звуком; при разрушении образовывались несколько разлетающихся больших кусков и мелкая крошка. Породные керны Зыряновского месторождения разрушались на большие куски с образованием крошки с хлопающим звуком. При проведении экспериментов выделено несколько видов разрушения с характерными признаками: “плавным” спадом нагрузки – мраморизованный известняк (рисунок 1, а); многоступенчатым

падением нагрузки – мелкоигльчатый мелко блочный туф (рисунок 1, б); резким одноступенчатым падением нагрузки – массивный мелкозернистый сиенит (рисунок 2). Авторы отмечают, что «для образцов мраморизованного известняка, принадлежащих к “пластичным” породам ($\sigma^* = 14.6$ МПа, где σ^* – предел прочности на одноосное сжатие), характерно “спокойное” развитие процесса разрушения с достаточно плавным падением нагрузки (рисунок 1, а). Сигналы ЭМИ регистрировались уже на стадии нагружения ($0.4-0.6$) σ^* . Более прочные горные породы, например образцы мелкоблочного мелкоигльчатого туфа и магнетитовой руды, начинали излучать импульсы ЭМИ только при нагрузке, достигающей ($0.6-0.8$) σ^* , при этом амплитуды сигналов увеличивались и падение нагрузки (разрушение образца) происходило несколькими ступенями (рисунок 1, б). Резкое одноступенчатое падение нагрузки (разрушение) у прочных и хрупких образцов кварцита и кварцевого сиенита (рисунок 2) наблюдалось лишь при ($0.8-0.9$) σ^* , при этом регистрируемые токи ЭМИ достигали значений в несколько десятков и даже сотен микроампер. Этот факт отражает способность прочных и хрупких пород накапливать упругую энергию без интенсивного трещинообразования, что может свидетельствовать о склонности этих типов пород к удароопасности» [9].

Следует отметить, что авторами получены весьма полезные и интересные экспериментальные результаты с точки зрения исследования характера и механизма разрушения разных по генезису и структуре горных пород. Поэтому попытаемся со своей точки зрения адекватно интерпретировать эти результаты. Нам представляется, что более спокойное разрушение образца мраморизованного известняка без скачков, и практически равномерные изменения напряженности магнитного поля (Н, МкА/м), начиная с малых нагрузок ($0,4 \sigma^*$) и вплоть до начала общего разрушения (рисунок 1, а, K_4), связано с генезисом, структурой, отсутствием остаточных напряжений, равномерным разрушением границ зерен, начиная с малых нагрузок, равномерным образованием новых поверхностей, обуславливающих практически равномерную эмиссию электронов, приводящих к более или менее монотонному изменению электромагнитного излучения.

При испытании образца мраморизованного известняка месторождения Ингичке в условиях одноосного сжатия авторы наблюдали также спокойный характер деформирования (в продольном и поперечном направлениях) и “спокойное” разрушение с образованием множества кусков разной фракции. Предварительные исследования показали отсутствие остаточных напряжений в данном образце мраморизованного известняка и позволили считать данную породу не удароопасной [10].

Ступенчатый характер спада нагрузки при испытании образца мелкоигльчатого мелкоблочного туфа (рисунок 1, б) связан с образованием единичных (двух) магистральных трещин в результате разрушений границ мелких блоков, из которых незначительные излучения токовых (рисунок 1, б, K_2, K_3) и электромагнитных (рисунок 1, б, K_4) излучений из-за незначительности эмиссии электронов. Две магистральные трещины отмечены только на третьем графике (K_3) двумя всплесками токового импульса. Возможно это связано с близким расположением соответствующего датчика к участкам магистральных трещин. Сравнительная значительность плотности образца данной горной породы (порядка 4 г/см^3), возможно, связана с наличием металла в породе. Исходя из мелкоблочной и игльчатой структуры и указанных выше показателей электромагнитных излучений при деформации и разрушении, данную горную породу, на наш взгляд, нельзя отнести к удароопасной.

Обращают на себе внимание значительные изменения токовых (рисунок 2, K_2, K_3) и электромагнитных (рисунок 2, K_4) импульсов и соответствующих излучений из образца массивного мелкозернистого сиенита после полного снятия внешней нагрузки (рисунок 2). Такие изменения обычно наблюдаются после горного удара в виде афтершоков, и это, как правило, характерно для горных пород (магматических, гидротермальных), имеющих значительные генетические или наведенные остаточные напряжения. Имеются факты образования трещин, “саморазрушения” блоков, кусков горных пород после отделения их от породного массива и при отсутствии каких либо внешних нагрузок или воздействий. Такие “саморазрушения” не только горных пород, но иногда и металлов, других технических твердых материалов, происходят за счет проявления остаточных напряжений [9, 10]. Таким образом,

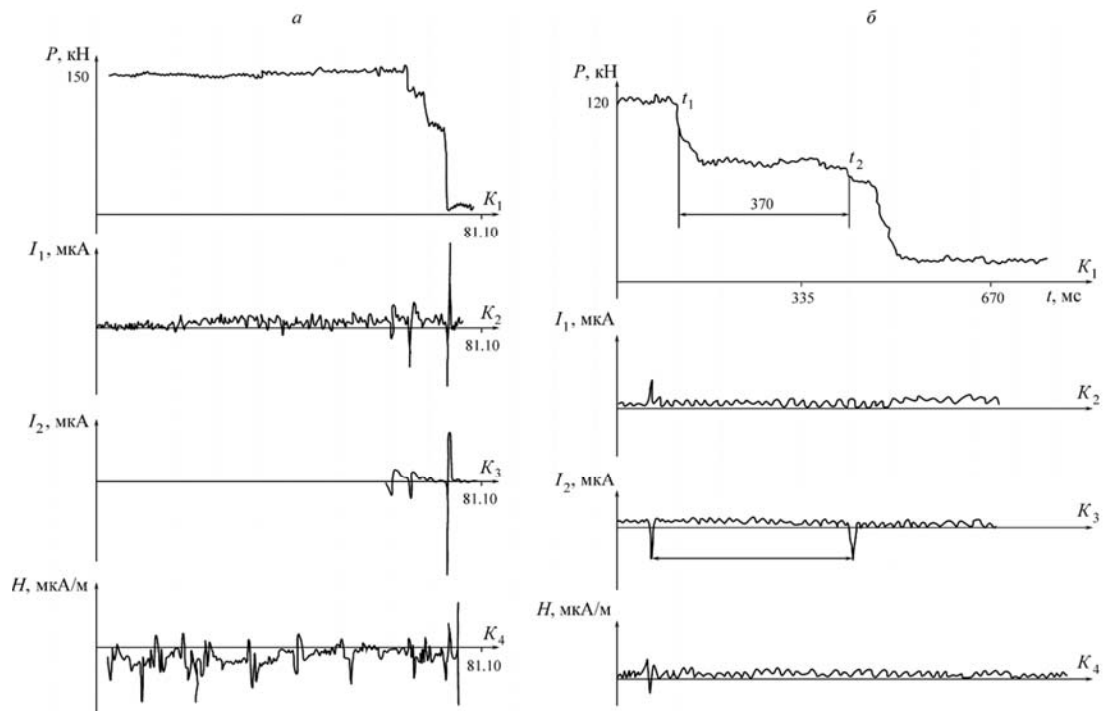


Рисунок 1 – Записи электромагнитных и токовых сигналов при разрушении образцов мраморизованного известняка (а) и мелкоугольчатого мелкоблочного туфа (б) [9]

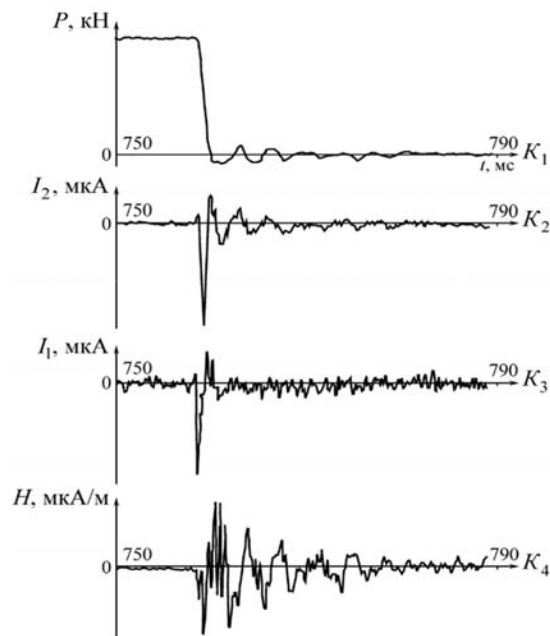


Рисунок 2 – Записи электромагнитных и токовых сигналов при разрушении образца массивного мелкозернистого сиенита [9]

осциллограммы и представленные записи электромагнитных и токовых сигналов при разрушении образца массивного мелкозернистого сиенита, свидетельствуют о склонности этой горной породы к динамическому разрушению. Данная горная порода по всем признакам относится к удароопасной.

Выводы. Статическое разрушение образца мраморизованного известняка без скачков и практически равномерные изменения напряженности магнитного поля, начиная с малых нагрузок и вплоть до начала общего разрушения, связано с генезисом, структурой, отсутствием остаточных напряжений, равномерным разрушением границ зерен, начиная с малых нагрузок, равномерным образованием новых поверхностей, обуславливающих практически равномерную эмиссию электронов. Данная горная порода относится к неудароопасной.

Ступенчатый характер спада нагрузки при испытании образца мелкоиглочатого мелкоблочного туфа связан с образованием единичных (двух) магистральных трещин в результате разрушений границ мелких блоков, из которых незначительны излучения токовых и электромагнитных излучений из-за незначительности эмиссии электронов. Данная горная порода относится к неудароопасной.

Осциллограммы и представленные записи электромагнитных и токовых сигналов при разрушении образца массивного мелкозернистого сиенита свидетельствуют о склонности этой горной породы к динамическому разрушению. Данная горная порода по всем признакам относится к удароопасной.

Поступила: 22.03.22; рецензирована: 05.04.22; принята: 08.04.22.

Литература

1. *Тажибаев К.Т.* Остаточные напряжения в горных породах и методы их определения / К.Т. Тажибаев, А.С. Ташмаматов. Бишкек: Изд-во “Текник”, 2014. 126 с.
2. *Тажибаев К.Т.* Закон изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение / К.Т. Тажибаев // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 11. С. 151–156.
3. *Тажибаев К.Т.* Закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах (закон Кушбакали) / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С. Акматалиева (Диплом № 453 на научное открытие от 3 октября 2013 г.). М.: Междунар. академия авторов научных открытий и изобретений. Российская академия естественных наук // Научные открытия. 2013. Сборник кратких описаний. М.: РАЕН, 2014. С. 48–50.
4. *Тажибаев К.Т.* Научно-технические основы поляризационно-акустического метода определения действующих и остаточных напряжений в горных породах / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев // Современные проблемы механики. Бишкек, 2020. № 41 (3). С. 223–238.
5. *Тажибаев К.Т.* Основы поляризационно-акустического метода определения остаточных напряжений / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева. Бишкек: «Алтын Принт», 2020. 203 с.
6. *Тажибаев К.Т.* Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов / К.Т. Тажибаев. Фрунзе, 1989. 180 с.
7. *Тажибаев К.Т.* О причинах и механизмах горных ударов и землетрясений. Исслед., прогноз и предотвр. горных ударов / К.Т. Тажибаев // Матер. IX Всес. конф. по механике горн. пород. Бишкек, 1991. С. 139–167.
8. *Тажибаев К.Т.* Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород: в 2 т. Т. 1 / К.Т. Тажибаев. Бишкек: Изд-во “Алтын Принт”, 2016. 352 с.
9. *Опарин В.Н.* О коэффициенте механико-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород / В.Н. Опарин, Г.Е. Яковицкая, А.Г. Вострецов, В.М. Серяков, А.В. Кривецкий // ФТПРПИ. № 3. Новосибирск: НГУ. 2013. С. 3–20.
10. *Тажибаев К.Т.* Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород: в 2 т. Т. 2 / К.Т. Тажибаев. Бишкек: Изд-во “Алтын Принт”, 2016. 357 с.