

Deformační pochody a emise akustických impulsů při jednoosém zatěžování vybraných hornin z české části Hornoslezské pánve

Petr Konečný¹

Deformation processes and emissions of acoustic impulses at the uniaxial loading of selected rocks from the Czech part of the Upper Silesian Basin

The deformation and induced acoustic emission during uniaxial loading were studied. Three main phases were distinguished during the whole deformation process: the initial one, in which the adjustment of rock specimen to the loading frame occurred, the middle one, preliminary with an elastic deformation manifestation, and the final one, in which a rapid development of cracks resulting in the fracture was observed. The comparison of the volumetric deformation of the sample with its acoustic emission enables us to distinguish between different behaviour of particular types of rock material.

Key words: acoustic emissions, uniaxial loading, deformation.

Úvod

Přetváření a porušování hornin při působení vnějších sil je proces, jehož kvalifikace a kvantifikace má pro řešení teoretických i praktických problémů geomechaniky zásadní důležitost. Hornina, jako strukturně velmi různorodý materiál, se při působení vnějšího zatížení chová různě, podle toho jaký je fyzikální stav materiálu (teplota, vlhkost) a jaká je úroveň působících sil (napětí). Abstrahujeme-li od vlivu fyzikálních poměrů a předpokládáme „obvyklé“ poměry, tj. pokojovou teplotu a přirozenou vlhkost jakož i obvyklou rychlost zatěžování a obvyklé rozměry zkušebních těles, zjistíme, že se proces přetváření a porušování u jednotlivých typů hornin liší. Rozdíl se projevují např. v různém podílu pružných a plastických (případně klastických) deformací při různých hladinách působících napětí, a ovšem také ve výsledných naměřených parametrech.

Obvyklý způsob měření procesu přetváření a porušování spočívá v zjišťování změn podélných a příčných deformací v závislosti na působící síle. Pracoviště, která jsou vybavena mechanickými lisami, měří zpravidla silovou reakci, která vzniká ve zkušebním tělese při vyvolávané podélné deformaci příslušnou deformací příčnou. Tímto způsobem měříme zpravidla v naší laboratoři petrofyziky.

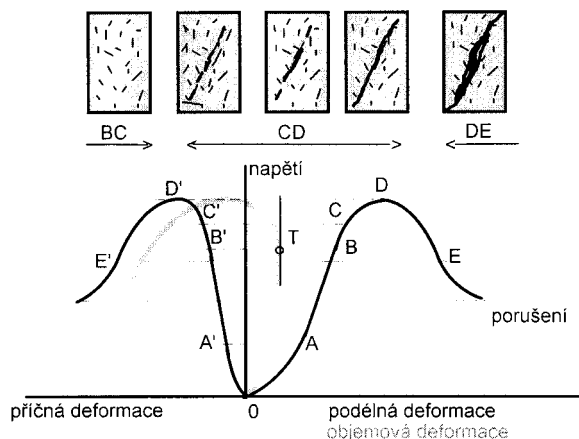
Další informaci o chování horniny při přetváření poskytují akustické impulsy, které se v průběhu zatěžování v hornině indukují a které signalizují vznik mikroporušení. Lze oprávněně předpokládat, že konfrontace vývoje akustických impulsů s deformacemi, vznikajícími při zatěžování zkušebního tělesa zpřesňuje poznání přetvářecího procesu až do porušení. V případě, že je přetváření pevných hornin doprovázeno vývojem akustických impulsů a tedy vznikem mikroporušení v podstatě od samého počátku zatěžování, lze oprávněně předpokládat, že převážná část deformací je nevratná a hornina nebude schopna akumulovat významnější podíl přetvářecí energie, která by se mohla uvolnit ve fázi porušování. Naopak horniny, u nichž dochází k akustické emisi zejména v závěrečné fázi zatěžování, budou k akumulaci deformační energie a jejímu uvolňování až v blízkosti meze pevnosti náchylné. Hodnocení hornin z tohoto hlediska je významné například pro posuzování náchylnosti hornin k důlním otřesům.

Pracovní hypotéza přetváření a porušování hornin (v laboratorních podmínkách)

Východiskem dalších úvah je hypotéza, podle které lze rozlišit několik úseků na přetvářecím diagramu reálné horniny, tak jak je znázorněno na obr. 1 (in Bock, 1983): Úsek OA (OA') má zpravidla vzrůstající tendenci a jeho zakřivení vyjadřuje dotvarování na kontaktních plochách mezi zkušebním

¹ Doc. Ing. Petr Konečný, CSc., Ústav geoniky AV ČR, ul. Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, ČR
(Recenzovali: Doc. Ing. Tibor Sasvári, CSc. a Ing. Juraj Ďurove, CSc. Recenzovaná verzia doručená 30.4.1998)

tělesem a zatěžovacím lisem. Úsek AB (A'B') má lineární charakter a je obecně považován za vyjádření pružných deformací tělesa. Úseky BC (B'C'), CD (C'D') a DE (D'E') jsou úseky, v nichž se v různé míře projevují plastické, resp. klastické deformace, vyvolané vznikem mikrotrhlin ve zkušebním tělese. V počáteční fázi, kterou charakterizuje úsek CD (C'D') vznikají jednotlivá izolovaná mikroporušení. V úseku DE (D'E') trhlinek přibývá, vzájemně se propojují, až v konečné fázi dají vzniknout souvislé ploše porušení. Úsek za bodem D vyjadřuje děj za mezí pevnosti. Trhlinek v tělese již výrazněji nepřibývá, dochází však k dalšímu rozvoji a pohybum podle plochy (ploch) porušení při postupné ztrátě nosnosti tělesa. V závěrečné části přetvárného diagramu se těleso rozpadá.



Obr. 1. Schématické znázornění průběhu procesu přetváření podle pracovní hypotézy.

Uvedený průběh deformací se zobrazí odpovídajícím způsobem na křivce, vyjadřující závislost objemových deformací na působícím napětí. Objemové deformace se počítají z podélných a příčných deformací podle známého vztahu:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_L - 2 \times \varepsilon_Q$$

kde značí:

ε_Vrelativní objemová deformace,

ε_Lrelativní podélná deformace,

ε_Qrelativní příčná deformace.

Z uvedených předpokladů současně vyplývá, že proces vznikání mikroporušení by se měl projevit na indukcii akustických impulsů, jejichž četnost by měla být přiměřená té které etapě výše popsaného deformačního procesu, zatím co intenzita impulsů by měla být měřítkem velikosti vznikajících trhlinek. Četnost indukovaných impulsů by se tedy měla výrazně zvyšovat ve fázi kdy dochází ke zvětšování objemu namáhaného tělesa, tedy v úseku za bodem B (B') přetvárného diagramu, resp. za bodem T na diagramu objemových deformací (bod T je bodem dotyku svisle vedené tečny k diagramu objemových deformací).

Tímto způsobem lze dvěma nezávislými měřeními - deformací a akustických impulsů - kontrolovat průběh procesu přetváření a porušování zkušebních těles a tak studovat charakter tohoto procesu. Jak již bylo uvedeno, zejména lze očekávat možnost objektivního hodnocení schopnosti horniny kumulovat při zatěžování elastickou energii. V případech, kdy bude deformované těleso vyzářovat mnoho akustických impulsů, je přetváření doprovázeno vznikem mikroporušení, což spotřebovává část energie, dodávané zatěžovacím systémem, takže podíl akumulované pružné energie je malý. V opačném případě - malé akustické aktivitě při zatěžování - je aktuální předpoklad pružného deformování tělesa a akumulace pružné energie při zatěžování. Tato pružná energie se musí přirozeně uvolnit v okamžiku porušení tělesa.

Poznamenávám, že výše uvedené předpoklady jsou vázány na horniny, u nichž se předpokládá vznik plastických deformací spojených s mikroporušováním, tak jak je schématicky znázorněno na obr. 1. Toto je zpravidla typické pro skalní horniny. Neuvažují se zde plastické deformace, vyvolané klouzáním jednotlivých stavebních prvků hornin, jak to lze uvažovat např. u plastických zemin. Materiál, v němž by docházelo ke vzniku plastických deformací bez indukovaných trhlinek, by byl velmi dobře rozpoznatelný tak, že plastické deformace by se rozpoznaly na přetvárném diagramu při cyklickém zatěžování (porovnání deformací při zatížení a odlehčení), na tvorbu trhlinek by se dedukovalo z množství změřených akustických impulsů.

Měřicí aparatura a postup měření

Měřicí aparatura je konstruována pro zkoušky zkušebních těles tvaru válce s průměrem 48 mm a štíhlostním poměrem 2 a sestává z měřicí komory, jednotky interface a počítače PC s kartou analogově-číslicového převodníku AD. Mechanický lis generuje zatěžovací sílu na zkušební těleso, které je vloženo do měřicí komory, vybavené snímači podélné deformace, příčné deformace a akustické emise. Podélná deformace se měří mezi čelistmi lisu a vyhodnocuje se jako průměr signálu ze dvou tenzometrických čidel, umístěných souměrně vůči ose zkušebního tělesa. Příčná deformace se měří tenzometrickými čidly v polovině výšky zkušebního tělesa ve dvou kolmých

směrech a vyhodnocuje se opět jako průměrná hodnota. Použité tenzometrické snímače se vyznačují vysokou přesností a linearitou měření a malou časovou konstantou (Rambouský, 1993).

Akustická emise se měří zařízením, vyvinutým v Ústavu geoniky (Knejzlík, 1997). Používaná čidla typu S 9223 od Physical Acoustic Corporation umožňují měření ve frekvenčním rozsahu od 5 kHz do 300 kHz. Tomuto frekvenčnímu rozsahu také odpovídá příslušné elektronické registrační zařízení. Na zkušební těleso se zatím přitmeluje jedno čidlo pomocí parafinu v polovině výšky tělesa, i když aparatura umožňuje i připojení dvou čidel současně.

Rozsahy měření použitých snímačů a rozlišovací schopnosti jsou uvedeny v tab. 1.

Tabulka 1. Vlastnosti použitých snímačů.

	rozsah měření:	rozlišovací schopnost:
síla	500 kN	24, 1 N
podélná deformace	2 mm	976,56 μ m
příčná deformace	1 mm	488,28 μ m
frekvence snímaných signálů	5 až 300 Hz	

Přesnost měřicí aparatury, zjištěná na ocelovém zkušebním tělese, je 1,5%. Při měření na horninových zkušebních tělesech je celková přesnost dále ovlivněna přesností opracování.

Měření probíhá tak, že je zkušební těleso zatěžováno v mechanickém lisu při konstantní rychlosti deformace, zpravidla 0.5 mm/min. Hodnoty indukované zatěžovací síly a podélných a příčných deformací jsou zapisovány pravidelně ve vhodné frekvenci, zvolené podle očekávané doby zkoušky, při čemž nejvyšší frekvence tohoto zápisu je 1 kHz. Navíc se při každém impulsu, jehož intenzita převyšuje nastavenou spouštěcí úroveň, zapíší hodnoty síly, příčných a podélných deformací a parametry impulsu, tj. čas, maximální amplituda, průměrná hodnota a jeho trvání. Pokud by časová prodleva mezi dvěma po sobě následujícími impulsy byla menší než 1 ms, bude zaznamenán pouze první impuls.

S ohledem na použitý interval vzorkování a délku zkoušky tak při běžném necyklovaném měření v prostém tlaku dostáváme zpravidla 500 až 3000 silových úrovní s příslušnými deformačními údaji. Výsledky měření jsou zapsány na počítači do textového souboru.

Výsledky měření na vybraných vzorcích hornin

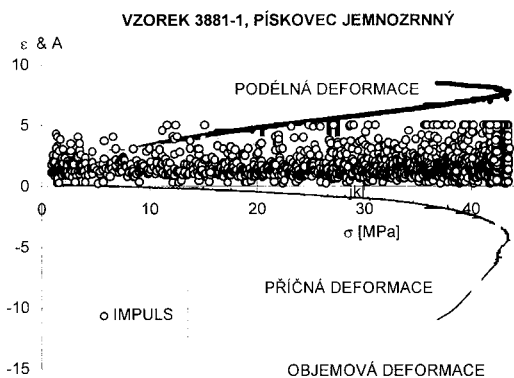
Akustická emise při jednoosém zatěžování byla dosud, spolu s průběhem deformací, změřena na několika desítkách zkušebních těles, připravených ze sedimentárních hornin OKR. V této fázi výzkumu byla pozornost soustředěna hlavně na sledování případného vlivu zrnitosti na akustickou emisi.

Při interpretaci výsledků měření akustické emise podle výše popsaného uspořádání je třeba mít na zřeteli, že objektivně registrujeme vznik každého jevu (a tedy porušení) takové intenzity, že je ho schopen snímač zaznamenat. Přitom stejný účinek na snímač mají slabší jevy s ohniskem v blízkosti snímače i silnější jevy s ohniskem vzdálenějším. Tato okolnost se projevuje i při oceňování energie jednotlivých jevů. Zde můžeme s určitou mírou pravděpodobnosti předpokládat, že ohniska mikroporušení migrují v objemu celého zkušebního tělesa, takže odchylky, způsobené různou vzdáleností od snímače, jsou nahodilé a ve velkém počtu jevů se vzájemně kompenzují. Lze tedy zhruba kvantifikovat celkovou energii všech registrovaných jevů, zatím co pro hodnocení energie jednotlivých jevů je stávající uspořádání s jedním snímačem nedostačující.

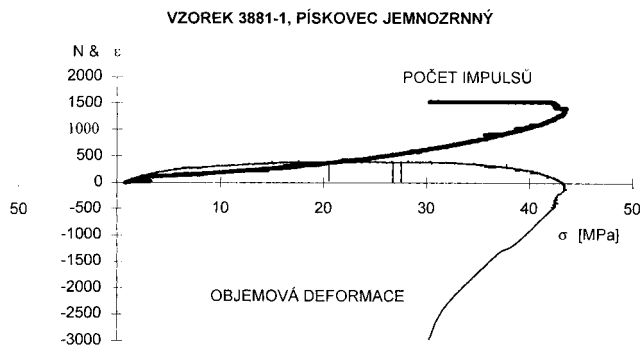
Typické průběhy přetváření a akustické emise sedimentárních hornin z české části hornoslezské byly vyhodnoceny dvěma způsoby:

V prvním případě byly do přetvárných diagramů, znázorňujících průběh podélných, příčných i objemových deformací v závislosti na zatížení, vyneseny jednotlivé registrované impulsy tak, že jejich x-ová souřadnice znázorňuje napětí, při němž k impulsu došlo a souřadnice y odpovídá velikosti maximální změřené amplitudy. Amplituda je vyjádřena ve voltech, protože cejchování na absolutní hodnoty nebylo dosud provedeno, a stávající interpretační postup toto ani nevyžadoval. Ve druhém případě byla zobrazena závislost objemové deformace a počtu impulsů na působícím napětí. Charakteristické výsledky, získané na různých horninách, jsou znázorněny na obr. 2 až 5.

Z obrázků 2a, 2b, 3a, a 3b je patrné rozdílné chování horniny se stejnou zrnitostí – jemnozrnného pískovce. Málo pevný typ této horniny s pevností v tlaku asi 44 MPa vyzařoval v celém průběhu zatěžování akustické impulsy (obr. 2a). Zmenšování objemu (komprimace tělesa) se projevovalo jen přibližně do 1/3 pevnosti v prostém tlaku, jakmile napětí začalo přesahovat polovinu pevnosti v tlaku, docházelo ke zvětšování objemu (dilatanci) zkušební tělesa. V této oblasti zatěžování se také zrychloval počet emitovaných akustických impulsů a to až do porušení. Ve fázi za mezí pevnosti deformace i růst objemu tělesa výrazně pokračovaly, aniž by docházelo k akustickým projevům. Tato skutečnost zřejmě svědčí o tom, že v této oblasti dochází k rozevírání již dříve indukovaných mikroporušení. Ke tvorbě nových trhlinek však již nedochází.

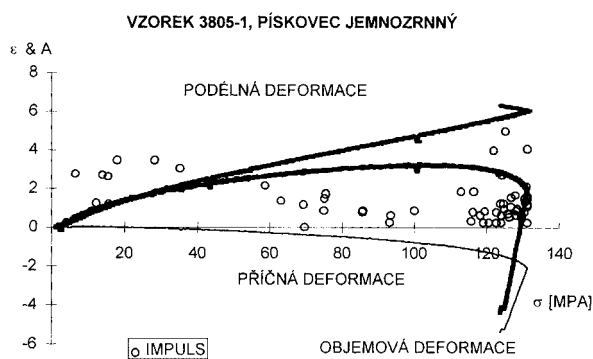


Obr.2a. Deformační charakteristika a akustická emise v závislosti na napětí σ . Málo pevná jemnozrnná hornina. Napětí σ je v MPa, osová a příčná deformace ϵ v promilích, amplituda impulsů A ve voltech.

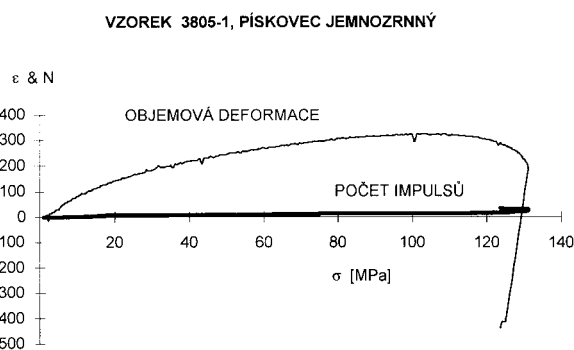


Obr.2b. Počet impulsů N a objemová deformace ϵ v závislosti na napětí σ . Málo pevný horninový materiál. Objemová deformace znázorněna v měřítku 100 dílků na grafu se rovná 1 promile deformace.

Vzorek pevného jemnozrnného pískovce (pevnost v prostém tlaku cca 130 MPa) se choval odlišně. V průběhu zatěžování emitovalo zkušební těleso jen ojedinělé impulsy a to až do zatížení dosahujícího cca 80 % pevnosti v prostém tlaku (obr. 3a). Teprve v poslední fázi zatěžování, v blízkosti pevnosti v prostém tlaku, byly zaregistrovány četnější akustické impulsy. Až v této oblasti také docházelo k dilatanci zkušební tělesa, zatím co převážná část deformací má charakter komprimace. V tomto případě došlo i za mezí pevnosti k emisi akustických impulsů, což svědčí o tvorbě nových trhlin, přičemž však velmi rychle došlo k rozpadu zkušební tělesa (obr. 3a, b).

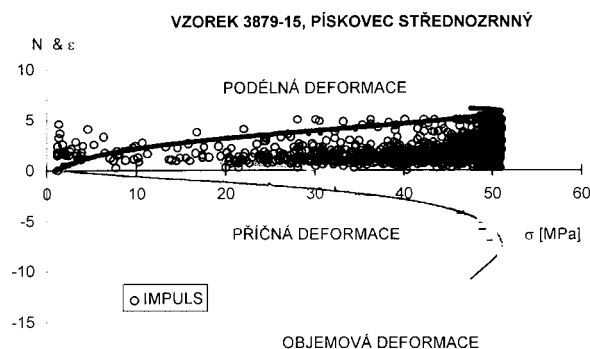


Obr.3a. Deformační charakteristika a akustická emise v závislosti na napětí σ . Pevná jemnozrnná hornina. Napětí σ je v MPa, osová a příčná deformace ϵ v promilích, amplituda impulsů A ve voltech.

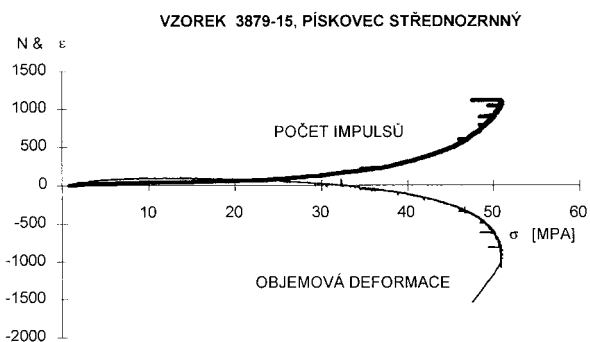


Obr.3b. Počet impulsů N a objemová deformace ϵ v závislosti na napětí σ . Pevná jemnozrnná hornina. Objemová deformace je znázorněna v měřítku 100 dílků na grafu se rovná 1 promile deformace.

Jiné chování se projevilo u vzorku 3879-15, střednozrnného pískovce s pevností v prostém tlaku 51 MPa. Zkušební těleso vykazovalo akceleraci emitovaných impulsů v podstatě od samého počátku zatěžování (s výjimkou projevů dotlačování tělesa v samém počátku zkoušky), přičemž i projevy dilatance začaly již při hodnotě napětí ve výši cca 20 % pevnosti v prostém tlaku (obr. 4a, 4b). Po dosažení meze pevnosti akustická emise ustala a těleso se velmi brzy rozpadlo.



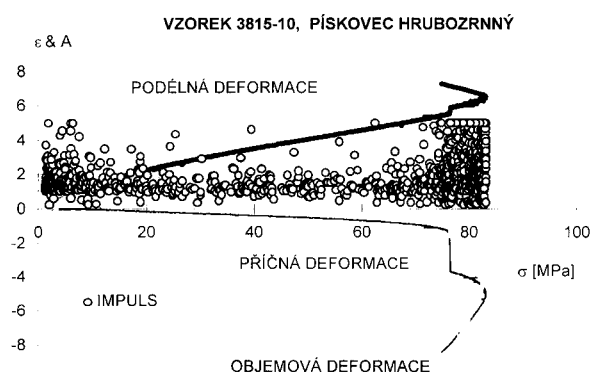
Obr.4a. Deformační charakteristika a akustická emise v závislosti na napětí σ . Málo pevná střednozrná hornina. Napětí σ je v MPa, osová a příčná deformace ε v promilích, amplituda impulsů A ve voltech.



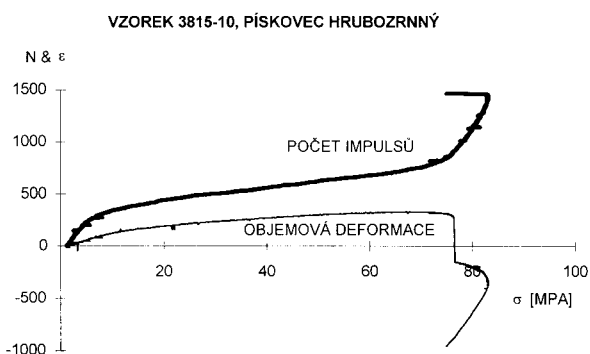
Obr.4b. Počet impulsů N a objemová deformace ε v závislosti na napětí σ . Málo pevná střednozrná hornina. Objemová deformace je znázorněna v měřítku 100 dílků na grafu se rovná 1 promile deformace.

Konečně, zatím poslední varianta průběhu vývoje akustické emise při zatěžování zkušebního tělesa byla pozorována na poměrně pevném hrubozrnném pískovci s pevností v tlaku 84 MPa (obr.5a, 5b).

Tento materiál vykázal poměrně intenzivní akustické vyzařování v počáteční fázi zatěžování do cca 15 % pevnosti v prostém tlaku. V úseku 15 až 85 % pevnosti v tlaku je přírůstek akustických impulsů prakticky lineární, a ve stejném úseku mají objemové deformace charakter komprimace tělesa. V posledních 15 % zatěžovacího úseku před dosažením meze pevnosti počet impulsů opět významně akceleruje. V tomto úseku dochází také ke skokovému nárůstu zejména příčné a objemové deformace, což lze přičíst vzniku významné trhliny, orientované navíc tak, že byla čidlem příčných deformací výrazně postižena. Po dosažení meze pevnosti další impulsy nebyly registrovány a zkušební těleso se rychle rozpadlo



Obr.5a. Deformační charakteristika a akustická emise v závislosti na napětí σ . Středně pevná až pevná hrubozrnná hornina. Napětí σ je v MPa, osová a příčná deformace ε v promilích, amplituda impulsů A ve voltech.



Obr. 5b. Počet impulsů N a objemová deformace ε v závislosti na napětí σ . Středně pevná až pevná hrubozrnná hornina. Objemová deformace je znázorněna v měřítku 100 dílků na grafu se rovná 1 promile deformace

Závěr

Uvedené příklady vývoje akustické emise a průběhu přetváření zkušebních těles při jednoosém namáhání ukazují, že se sedimentární karbonské horniny různé zrnitosti a pevnosti mohou projevat různě. Toto demonstuje komplikovanost a variabilitu procesu přetváření a porušování a přispívá k vysvětlení variability, kterou při porušování hornin in situ pozorujeme. Na druhé straně zjištěné poznatky potvrzují správnost použité hypotézy o procesu přetváření a porušování sedimentárních hornin v jejich základních předpokladech s tím, že variabilita výsledného projevu je důsledkem různé míry uplatnění jednotlivých fází tohoto procesu.

Dosavadní výsledky výzkumu, se zřetelem na provedený počet zkoušek, zatím neumožňují posoudit, které chování je pro jednotlivé horniny typické. Další výzkum v této problémové oblasti by měl přispět k poznání, zda existuje vazba mezi petrografickou a strukturální stavbou horniny, jejím

přetvárným projevem a akustickou emisí při zatěžování. Již nyní lze však konstatovat, že současné měření přetváření a akustické emise na laboratorních zkušebních tělesech dovoluje lépe poznat a hodnotit děje, související s tvorbou a rozvojem mikrotrhlin, které v horninovém materiálu při jeho zatěžování probíhají. Aplikaci těchto poznatků lze očekávat například v prohloubení protiotřesové prevence.

Literatura

- Bock, H.: An Introduction to Rock Mechanics. *Moscow, Mir, 1983.*
- Knejzlík, J, Konečný, P. Jr. & Rambouský, Z.: Measurement of the stress - strain behaviour and acoustic emission of rock in the uniaxial strain. *In: 33 Conf. of Experimental Stress Analysis, Třešť, 1995, s. 129-133.*
- Knejzlík, J.: The equipment for measurement of acoustic emission during laboratory tests. *In: Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection, Ostrava, 1977, s. 325-331.*
- Šimáně, J.: Qualitative determination of the rock burst parameters of rocks. *Acta Montana 55, UGG ČSAV Praha, 1980.*

Poděkování: Zpracování publikace bylo umožněno finanční podporou z Grantové agentury České republiky, registrační číslo grantu 105/96/1531 a z Projektu klíčových oblastí badatelského výzkumu RA K10 12601.