

Výzkum mechanických vlastností hornin při dynamickém (cyklickém) namáhání.

Researches into Mechanical Properties of Rocks under Dynamic (Cyclic) Loading.

J. ŠANCER, V. PETROŠ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Abstract

Researches into mechanical properties of rocks are mostly done under static (quasistatic) loading. In nature, however, rocks are also often subjected to dynamic (vibration) loading as a result of propagation of seismic waves due to e.g. earthquakes, rock bursts, blasting operations, etc. The observation of rock characteristics in cyclic mode of testing is thus very important from the point of view of studying problems associated with anomalous geomechanical events. This type of loading can be simulated on a modern press, MTS 816 Rock Test System, purchased by VŠB-Technical University of Ostrava. Whereas in the past, especially stress-strain and energy characteristics in the course of dynamic (cyclic) loading were observed on this test system, recently research has focused mainly on the observation of rheological properties during this loading. In the course of observation of energy characteristics of mechanical loading, anomalies were found before achieving the limit of ultimate strength. The cause of them is probably the action of energies other than mere mechanical energy. For this reason, research focused on the determination of temperature changes in the course of rock dynamic loading as one of possible causes of the occurrence of mentioned anomalies. During the observation of rheological properties under dynamic loading, tests were carried out both in mode of creeping and in mode of relaxation, at various levels of average load or strain and at various vibration parameters (frequency, amplitude). For comparison of data measured, some tests were also performed under static loading. The submitted article presents some results from the above-presented researches.

Úvod

Napětí-opřetvárná charakteristika hornin se dosud zjišťovala převážně při statickém (kvazistatickém) namáhání. Zakoupení testovacího zařízení MTS 816 Rock Test System na VŠB-TU Ostrava umožnilo provádět výzkum i při dynamickém (cyklickém) namáhání.

Vzhledem ke skutečnosti, že cyklické namáhání do jisté míry simuluje namáhání při důlních otřesech, byl výzkum koncipován pro zkoumání vlastností karbonských

průvodních hornin, tedy z horského masívu, ve kterém dochází ke vzniku anomálních geomechanických jevů. Pro vlastní výzkum byly použity horninové vzorky z vrtných jader tak, aby každý vzorek představoval dostatečnou délku pro zhotovení většího množství zkušebních těles se zhruba stejným makropetrografickým složením. Konkrétně byl výzkum prováděn na dvou typických zástupcích průvodních hornin z OKR, a to na karbonském pískovci a prachovci.

V rámci výzkumu proběhla celá řada zkoušek při různých režimech namáhání. Nejprve se zkoušky uskutečňovaly při cyklickém namáhání v režimu rovnoměrně se zvyšujícího namáhání až do rozrušení zkušebního tělíska. V tomto režimu se prováděly zkoušky jak prostým tlakem, tak šikmým stříhem. Při tomto výzkumu byly před porušením vzorků horniny zjištěny energetické anomálie, které je možné vysvětlit přeměnou části přetvárné energie na jinou energii, např. tepelnou. Z tohoto důvodu byla sledována změna teploty hornin při dynamickém namáhání.

Poslední dobou se zkoušky probíhaly především v reologickém režimu, a to jak při konstantním průměrném přetvoření (Target Set Point, dále jen TSP), kolem kterého cyklické namáhání osciluje s určitou amplitudou a frekvencí (toto namáhání je možno označit jako relaxace) nebo v režimu při konstantní průměrné síle (toto namáhání je možno označit jako ploužení, příp. creep). Horninová tělíska byla namáhána při frekvencích, které odpovídají frekvencím šíření seismických vln při důlních otřesech. Předložený referát se bude zabývat poznatky zjištěnými při tomto výzkumu, především pak výsledky zkoušek při reologickém režimu namáhání.

Odběr vzorků pro laboratorní zkoušky a jejich charakteristika

Výzkum vlastností hornin při různých režimech namáhání vyžaduje zhotovení určitého množství zkušebních tělísek ze stejnorodého horninového materiálu. Výzkum byl zaměřen na průvodní karbonské horniny. Jedinou schůdnou možností, jak získat potřebný materiál byl odběr vzorků z vrtných jader. Vzorky byly odebírány z makropetrograficky stejnorodých poloh s co největší mocností.

Pro zajištění srovnatelnosti výsledků zkoušek s různými režimy namáhání byly vybrány dvě makropetrograficky rozdílné polohy pevných hornin, z nichž byla zkušební tělíska zhotovena. Jednalo se o vzorek pískovce a vzorek prachovce.

K výzkumu byly použity vzorky hornin, získané z vrtů vrtných v Ostravsko-karvinském revíru na jádro o průměru 47,5 mm. Jedná se o 2 vrty z těchto lokalit:

Vrt č. 265/01 byl odvrtný na Dole Darkov-Darkov. Celková délka 135 m, vrt je odvrtný úpadně z důlního díla 233562 (5. kra) ve staničení 201 m ze sloje 605-33 sp.l. Z tohoto vrtu bylo odebráno 56 m jádra středně zrnitého arkózovitého pískovce.

Vrt č. 2702/01 z Dolu ČSA-Doubrava byl odvrtný ze sloje 504-40.sl z důlního díla 34026 (3. kra) ve staničení 94 m. Úpadní vrt celkové délky 295 m byl situován v porubských vrstvách a bylo z něj odebráno 12 m jádra polymiktního prachovce.

Stručná charakteristika testovacího zařízení MTS 816 a jeho nastavení pro výzkum vlastností hornin při dynamickém namáhání

Pro dynamické zatěžování bylo použito zařízení pro testování hornin MTS 816. Toto zařízení je schopno vyvolat maximální tlakovou sílu 1015 kN a maximální tahovou sílu

650 kN. Tuhost lisu je stanovena na $26 \cdot 10^8$ N/m. Podrobnější charakteristika testovacího zařízení byla popsána např. v (PETROŠ & ŠANCER, 2007).

Při dynamickém zatěžování může zařízení pracovat jak v režimu rázových zkoušek, tak v režimu cyklického namáhání s nastavitelnou frekvencí a amplitudou síly, či deformace. V předloženém výzkumu zkoušky probíhaly výhradně v cyklickém režimu namáhání.

V průběhu zkoušky se zaznamenává čas, síla a deformace. Při cyklickém namáhání musíme nejprve rozhodnout o způsobu řízení zkoušky – zda podle síly nebo podle deformace.

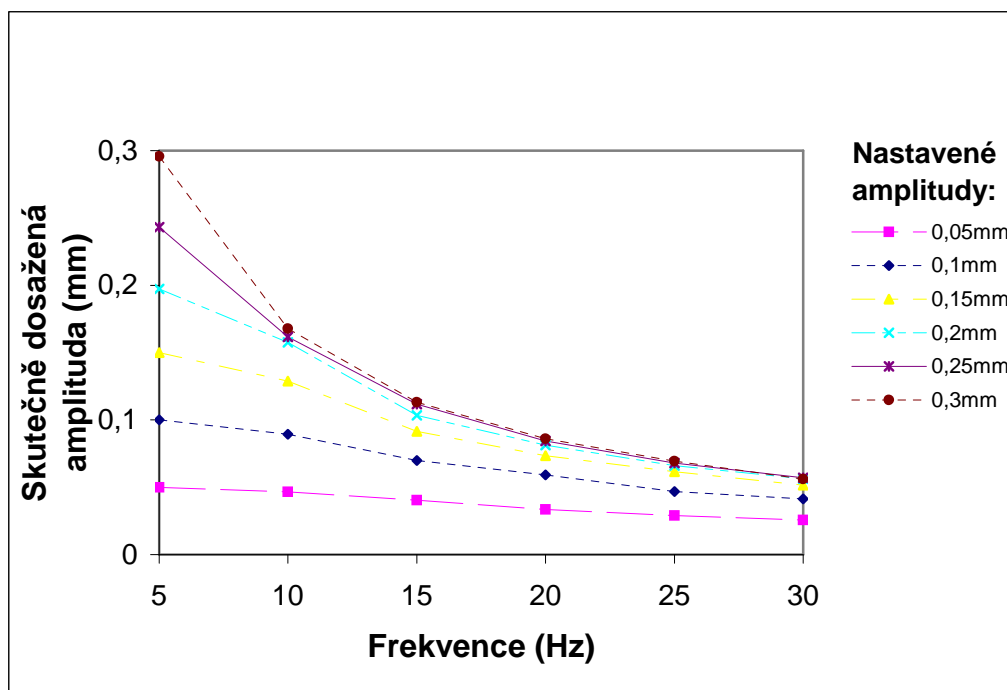
Pro každý ze zvolených režimů musíme dále zvolit tyto parametry zkoušky:

- frekvenci,
- amplitudu,
- TSP - počáteční (střední) přetvoření nebo sílu,
- rychlost přírůstku přetvoření v průběhu zkoušky (pro zkoušky až do rozrušení),
- způsob snímání dat, citlivost snímání apod.

Frekvence i amplituda se před zkouškou nastavuje numericky a je možné ji během zkoušky průběžně měnit bez nutnosti zastavení zkoušky. Při řízení zatěžování podle deformace je amplituda nastavována v milimetrech.

Výkon testovacího zařízení je limitován, proto nemusí být vždy dosažena nastavená hodnota amplitudy. Dosažitelná amplituda pro určitou použitou frekvenci je závislá na nastavené hodnotě požadované frekvence a zřejmě také částečně na charakteristice zkušebního tělesa. V závislosti frekvence – amplituda je u daného MTS 816 Rock Test Systemu dána prioritou frekvenci. Frekvence je vždy udržována na nastavené hodnotě, dochází pouze k ovlivňování amplitudy. S narůstající frekvencí klesá dosažitelná amplituda.

Příklad změn dosažených amplitud v závislosti na frekvenci a nastavených požadovaných amplitudách při měření na karbonských průvodních horninách je na Obr. 1.



Obr. 1. Závislost dosažených amplitud na nastavených amplitudách a frekvencích (PETROŠ ET AL. 2008)
 Fig. 1. Dependence of amplitudes on setup of amplitudes and frequency (PETROŠ ET AL. 2008)

Z tohoto obrázku je vidět, že nastavené amplitudy deformací do 0,3 mm odpovídají skutečným amplitudám zhruba do 5 Hz, pak dochází k jejich poklesům.

Dynamické (cyklické) namáhání bylo používáno při frekvencích, které odpovídaly frekvencím šíření seizmických vln při důlních otřesech v OKR. Parametry seizmických vln při důlních otřesech v OKR byly vyhodnocovány např. v literatuře (HOLUB & ŠANCER, 2007), ze které vyplývá, že zastoupené frekvence P - vln jsou v intervalu 2 – 21 Hz, nejčastěji zahrnují pásmo frekvencí $f = 3 - 8$ Hz, zatímco maximální četnosti frekvencí S - vln se soustřeďují do oboru frekvencí $f = 2-6$ Hz s výrazným maximem u frekvence $f = 3$ Hz. Z tohoto důvodu výzkum probíhal při frekvencích do 30 Hz, především pak při frekvencích do 10 Hz.

Snímání a záznam dat je rovněž možné provádět v různých režimech. Zatímco při statickém (kvazistatickém) způsobu namáhání se jako nejvhodnější režim jeví časový záznam, jehož četnost si můžeme zvolit od řádově tisícín sekundy, při cyklickém namáhání byl využíván záznam „peak - valley“. Zobrazování grafů v režimu zápisu „peak – valley“ do značné míry závisí na nastavitelné citlivosti snímání dat. Pokud je nastavena vyšší citlivost snímání, pak záznam zachytí i maličké změny vyvolané systémem regulace požadovaného tvaru křivky (byl používán sinusový tvar, který odpovídá seizmickým vlnám). To způsobuje, že počet řádků záznamu zkoušky enormně vzroste. Proto byla citlivost u dlouhodobých (reologických) zkoušek volena tak, aby zachycovala pouze maxima a minima sinusového průběhu.

Vyhodnocení zkoušek při cyklickém namáhání.

Při cyklickém namáhání byly dříve hodnoceny pevnostní, přetvárné a energetické vlastnosti hornin a v současné době se věnujeme hlavně reologickým charakteristikám.

Hodnocení pevnostních, přetvárných a energetických vlastností hornin

Detailní digitální záznam průběhů zkoušek při cyklickém namáhání umožňuje vyhodnotit celou řadu různých charakteristik zkoumaných horninových vzorků.

Hodnocené charakteristiky při cyklickém namáhání můžeme rozdělit na:

- pevnostní,
- přetvárné,
- energetické,
- reologické.

Vzhledem ke skutečnosti, že poznatky z vyhodnocení pevnostních, přetvárných a energetických charakteristik při cyklickém namáhání již byly podrobněji publikovány např. v (PETROŠ, ŠANCER & KADLEC 2007), jsou v tomto referátu pro úplnost zahrnuty pouze stručné poznatky z těchto pozorování a hlavní pozornost je věnována reologickým charakteristikám. Níže uvedené výsledky zkoušek se vztahují na karbonské průvodní horniny, převážně pískovce.

Ze sledování jednoosé tlakové pevnosti při cyklickém namáhání je možné vyhodnotit následující závěry:

- jednoosá tlaková pevnost klesá s narůstající frekvencí dynamického (cyklického) namáhání.
- jednoosá tlaková pevnost klesá se zvyšující se amplitudou dynamického (cyklického) namáhání.

Z přetvárných vlastností hornin byly stanovovány moduly přetvárnosti a moduly pružnosti. Oba moduly lze vyhodnotit z jednoho záznamu. Při cyklickém namáhání jsou totiž získávány dvojice bodů – při zatěžování (valley – peak) můžeme vyhodnotit modul přetvárnosti, při odlehčování (valley – peak) pak modul pružnosti. Existuje ještě celá řada jiných způsobů vyhodnocování modulů přetvárnosti - např. z křivky „peak“ hodnot, křivky „valley“ hodnot, nebo střední křivky těchto mezních hodnot.

Ze sledování průměrného modulu přetvárnosti při cyklickém namáhání vyplývá, že průměrný modul přetvárnosti nevykazuje prokazatelnou závislost na frekvenci. Výrazný je pokles modulu přetvárnosti s nárůstem amplitudy dynamického zatěžování.

Modul pružnosti je závislý na frekvenci tak, že nejdříve s nárůstem frekvence roste a pak klesá. Maxima bylo dosahováno při cca 5 Hz. Výrazná je závislost na amplitudě dynamického namáhání – s rostoucí amplitudou klesá modul pružnosti.

Při hodnocení energetických charakteristik byla stanovována mechanická energie, příp. výkon vkládaný do namáhání zkušební tělesa. Při vyhodnocování energetických charakteristik cyklického namáhání docházelo u některých zkušebních těles k energetické anomálii, která se projevovala dočasným snížením mechanické energie v určité fázi před docílením meze pevnosti. Příčinou této energetické anomálie patrně může být uplatňování jiného druhu energie než pouze mechanické energie. Z tohoto důvodu byl výzkum dále zaměřen na stanovování teplotních změn při dynamickém namáhání hornin, jako jedné z možných příčin vzniku uvedených anomálií. V rámci tohoto výzkumu byla provedena celá řada měření v různých režimech namáhání. Pro měření teploty se používaly termočlánky, které byly umísťovány do vývrtů v horninových zkušebních tělískách. Pomocí těchto termočlánků se stanovovala

především teplota uvnitř zkušebních tělísek. Pro stanovování teploty na povrchu byla použita termovize.

Z výzkumu zabývajícím se stanovováním teplotních změn při dynamickém namáhání je možné uvést následující závěry:

- časový nárůst změny teploty při dynamickém namáhání má hyperbolický průběh,
- při tlakovém namáhání je teplota uprostřed zkušebního tělíska zhruba dvojnásobná než na jeho povrchu,
- s rostoucí frekvencí se teplotní rozdíly zvyšují až do 20 Hz, poté opět klesají,
- rychlost postupu teplotní změny horninou je cca $0,6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,
- při zvyšující se úrovni zatížení se teplotní rozdíl postupně zvyšuje a v době energetické anomálie nedochází ke zjevnému zvýšení rychlosti nárůstu teploty, tzn., že při energetické anomálii se tepelná energie neuplatňuje.
- hlavní nárůst teploty nastal až po docílení meze pevnosti – vlivem tření po porušené smykové ploše.

Reologické vlastnosti hornin při cyklickém namáhání

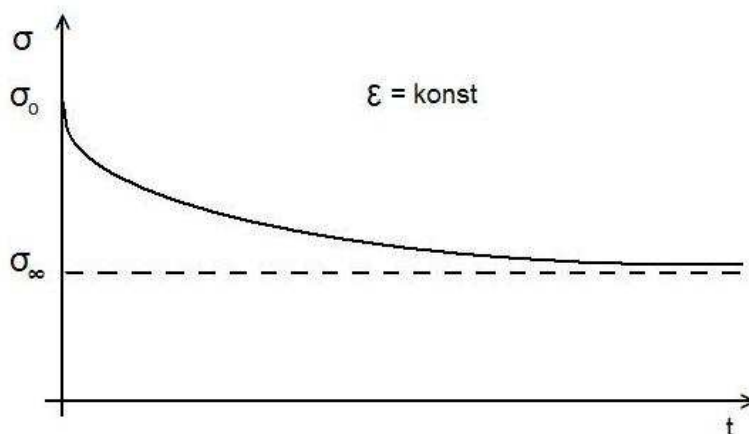
Reologie hornin se zabývá studiem změn napěťodeformačních charakteristik hornin v čase při jinak neměnných poměrech a podmínkách. Studium reologických vlastností hornin se dosud zabývalo poměrně málo institucí a autorů. Výzkum v této oblasti je spjat např. s ukládáním radioaktivních odpadů do podzemních prostor. Přestože důležitost a význam podrobného výzkumu reologického chování hornin nabývá stále většího významu, dosud nebyly vypracovány žádné závazné metodiky pro zkoušky časově závislých vlastností hornin. Doposud bylo publikováno poměrně mnoho článků a studií zabývajících se výzkumem reologických vlastností hornin např. (TRČKOVÁ 2002), nicméně všechny se zabývaly výzkumem reologie hornin při statickém zatížení. V odborných časopisech dosud nebyl nalezen žádný záznam, který by se přímo zabýval stejnou problematikou - reologickými vlastnostmi hornin při dynamickém (cyklickém) namáhání.

Je třeba poznamenat, že výzkum reologických vlastností je časově i technologicky velmi náročný. V současné době v České republice není pracoviště, které by se specializovalo výhradně na výzkum reologických vlastností hornin. V dnešní době je pro výzkum reologických vlastností při statickém namáhání asi nejkomplexněji vybaven Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR v Praze. Na tomto pracovišti je 10 kusů pružinových lisů, u nichž za pružinu slouží třmenový dynamometr o síle do 80 kN. Aktivaci síly obstarává šroubový automobilový zvedák s ruční regulací. Osové deformace se měří mikrometrickými úchylkometry, případně pomocí křížových drátkových tenzometrů (příčná deformace). Unikátním zařízením používaným pro dlouhodobé zkoušky je na tomto pracovišti mechanický závažový lis s rozsahem osové síly do 500 kN. Zatížení horninového tělíska se dosahuje plněním vodní nádrže, přičemž hmotnost vody je přenášena pákovým mechanismem na horninové tělísko. Předností tohoto lisu je zcela bezhlučný a ekonomický provoz, bez závislosti na ruční obsluze nebo zdroji elektrické energie (SKLENÁŘ ET AL. 2000).

Výzkum reologických vlastností při dynamickém (cyklickém) zatěžování je v ČR v současné době možný provádět jen na minimálním počtu pracovišť, mezi které patří VŠB-TU Ostrava, díky již zmíněnému zařízení MTS 816 Rock Test System. Nutno dodat, že ač je toto zařízení plně automatizované a umí pracovat jak v režimu plouživosti, tak relaxace, jsou dlouhodobé zkoušky na tomto zařízení energeticky náročné. Rovněž zpracování dat je při tomto výzkumu poměrně náročné, pakliže chceme vyhodnotit všechna zaznamenaná data. Počet zaznamenaných dat je závislý na nastavené citlivosti snímání a frekvenci zatěžování. Jako příklad můžeme uvést záznam, do kterého se budou zapisovat pouze údaje o čase, síle a přetvoření např. při frekvenci 10 Hz, kdy citlivost snímačů bude nastavena tak, aby zaznamenávala pouze maxima a minima sinusového průběhu. Při tomto nastavení se bude každou vteřinu zaznamenávat 60 hodnot (3x20), tj. 216000 hodnot za hodinu, což běžný komerční software není schopen zpracovat. Z tohoto důvodu si autoři tohoto článku dali za cíl ověřit reologické vlastnosti hornin jak při statickém, tak při dynamickém namáhání a pokusit se nalézt korelační vztah mezi oběma režimy namáhání tak, aby bylo možné z naměřených dat při statickém namáhání odvodit chování hornin při dynamickém namáhání. Proto byly v rámci výzkumu prováděna měření jak při statickém, tak i dynamickém namáhání. Výzkum byl veden jak v režimu relaxace, tak plouživosti.

Relaxace (ochabovost) hornin

Pojmem relaxace hornin je vyjádřena schopnost horniny ztrácet v čase únosnost, přestože přetvoření horniny zůstává konstantní. Jinými slovy, relaxace vyjadřuje časový průběh napětí při konstantním přetvoření. Při zjišťování relaxace hornin se udělí hornině určité přetvoření, čemuž odpovídá určité počáteční napětí σ_0 a zjišťuje se změna působícího napětí při konstantním přetvoření. Technické provedení této zkoušky je poměrně náročné díky nutnosti udržovat konstantní přetvoření, nicméně testovací zařízení MTS 816, umožňuje provozovat tento režim. Typický průběh relaxace hornin uváděný v tuzemské i zahraniční literatuře je na obrázku č. 2.



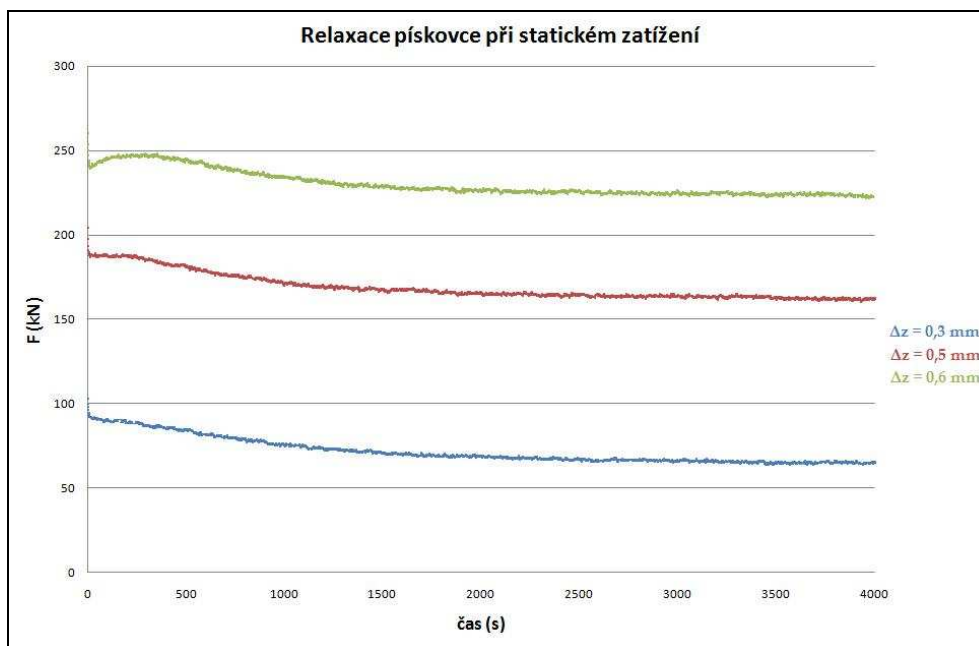
Obr. 2. Typický průběh relaxace hornin
Fig. 2. Typical graph of relaxation of rocks

Z uvedeného obrázku je patrné, že napětí v čase klesá a jeho hodnota se asymptoticky blíží k určité stálé hodnotě různé od nuly. Při relaxaci horniny

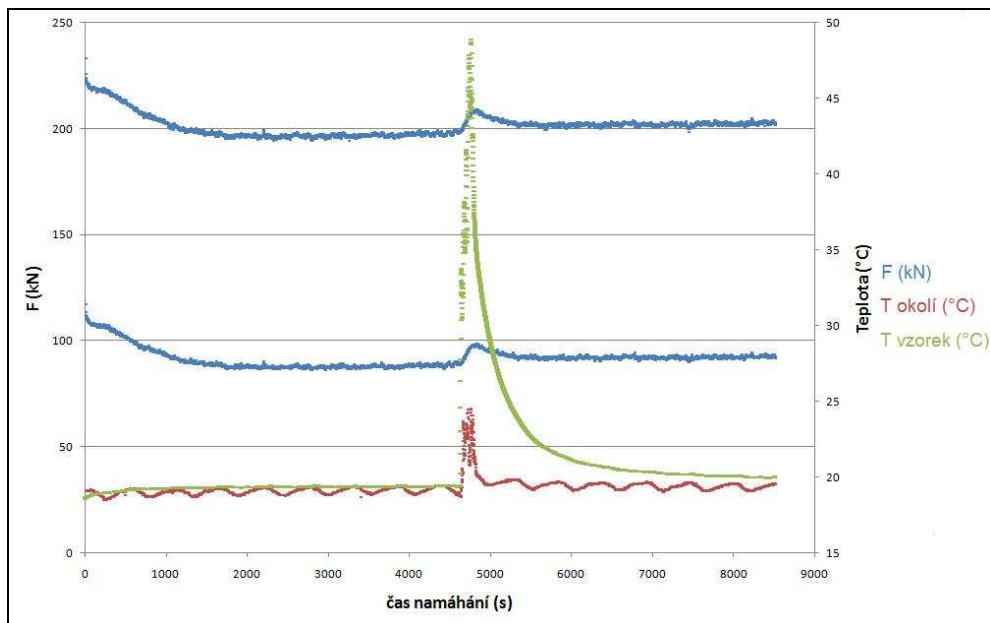
pravděpodobně dochází v průběhu zkoušky ke změně poměru pružného a plastického přetvoření. S dobou po kterou působí zatížení, narůstá plastické přetvoření na úkor pružného, přitom jejich součet zůstává konstantní. K udržení plastického přetvoření je potřeba menší síly, proto dochází k poklesu měřeného napětí (TRČKOVÁ 2002).

Při výzkumu relaxace na zařízení MTS 816, byla tato stanovována jak při statickém tak i dynamickém zatížení. Při dynamickém (cyklickém) zatížení byl vzorek zatížen na určitou střední hodnotu deformace TSP (Target Set Point), kolem které přetvoření konstantně kmitalo sinusovým průběhem o nastavené amplitudě přetvoření při zvolené frekvenci kmitání. Výzkum byl prováděn za různých hodnot TSP, amplitudy i frekvencí.

Na obrázku č. 3 jsou uvedeny relaxační křivky pískovce při statickém zatížení a různých hodnotách nastavené podélné deformace Δz . Z obrázku je patrné, že s rostoucí deformací narůstá počáteční napětí (síla). U všech křivek je možné pozorovat rapidní pokles síly v prvních sekundách relaxace, pak se průběhy jednotlivých křivek liší v závislosti na velikosti nastavené deformace. S rostoucí hodnotou deformace se projevuje zdánlivě nelogický „opačný“ průběh relaxační křivky, který vysvětlujeme ohřevem horniny při počátečním stlačení. Obdobné průběhy relaxace byly zaznamenány i při zkouškách relaxace za dynamického (cyklického) namáhání. Aby byla tato teorie ověřena, byla při jedné ze zkoušek měřena teplota uvnitř horninového tělíska pomocí termočlánku a pro kontrolu rovněž teplota okolí. Po více než hodině relaxace (po ustálení síly) bylo horninové tělísko v průběhu zkoušky ohřáno horkým vzduchem (fénem) a bylo sledováno, zdali dojde k nárůstu síly potřebné k udržení nastavené deformace. Tato zkouška byla na vzorku pískovce, kdy byl udržován sinusový průběh deformace, kmitající kolem konstantní střední hodnoty deformace TSP = 0,5 mm, s amplitudou 0,1 mm a frekvencí 1 Hz. Záznam z této zkoušky je uveden na obrázku č. 4.



Obr. 3. Naměřené průběhy relaxace pískovce při statickém zatížení
Fig. 3. Measured relaxation curves of sandstone under static loading

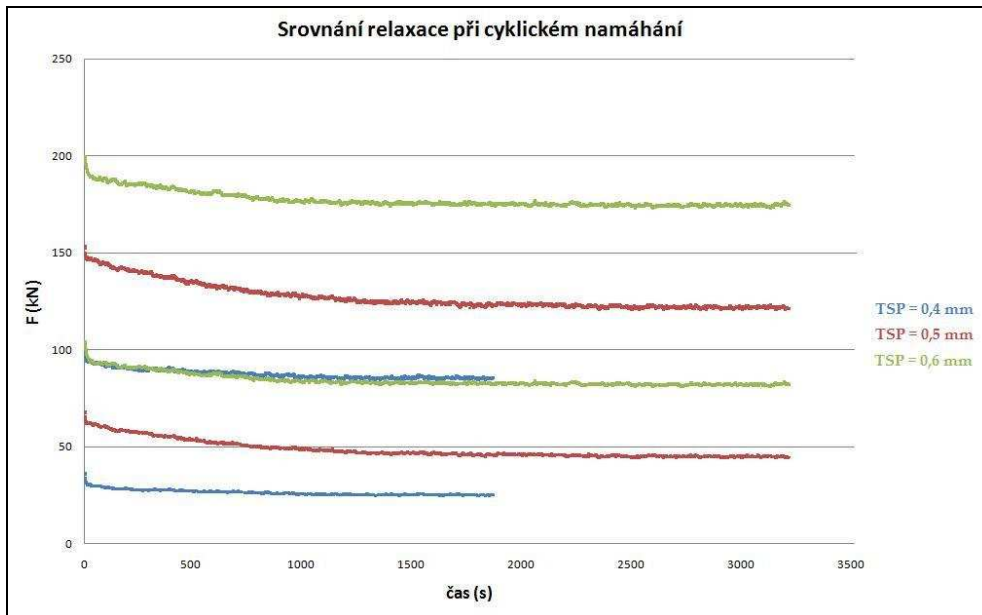


Obr. 4. Vliv teploty na relaxaci hornin
 Fig. 4. Influence of temperature on relaxation of rocks

Z obrázku č. 4 je patrný mírný nárůst teploty tělíska ihned po spuštění zkoušky, jenž má hyperbolický průběh (viz výzkum teplotních změn při dynamickém namáhání). Toto zvýšení teploty se projevilo pozastavením klesajícího trendu síly nutné k udržení konstantní deformace. Po prvotním zahřátí vzorku se nárůst teploty vzorku ustálil, a tudíž následoval pokles síly. Po ustálení relaxace tělíska byla záměrně zvýšena teplota vzorku, což se projevilo znatelným nárůstem síly potřebné k udržení deformace. Zvlněný průběh teploty okolí je zapříčiněn klimatizací v místnosti. I přes běžící klimatizaci je patrný mírný nárůst teploty v místnosti během zkoušky i její projev na křivce relaxace. Tímto pokusem byl vysvětlen „atypický“ průběh relaxační křivky v počáteční fázi a prokázán negativní vliv změn teploty na přesnost stanovování reologických charakteristik hornin.

V rámci výzkumu relaxace hornin při dynamickém namáhání byly prováděny zkoušky s různým nastavením vstupních hodnot (TSP, amplituda, frekvence) a tyto pak vzájemně srovnávány. Na obrázku č. 5 jsou vyneseny průběhy křivek relaxace hornin při cyklickém namáhání za rozdílného nastavení TSP, avšak shodné amplitudě $A=0,1$ mm a frekvenci $f=5$ Hz. Z obrázku je patrné, že křivky spolu vzájemně korelují (křivka „peak“ při TSP 0,4mm začíná na téměř shodné hodnotě jako křivka „valley“ TSP 0,6 mm). Z obrázku je dále možné vyčíst, že se zvyšující se hodnotou deformace je potřeba použít pro udržení shodné amplitudy vyšší rozsah síly. Průběh relaxační křivky s rostoucí hodnotou deformace je strmější.

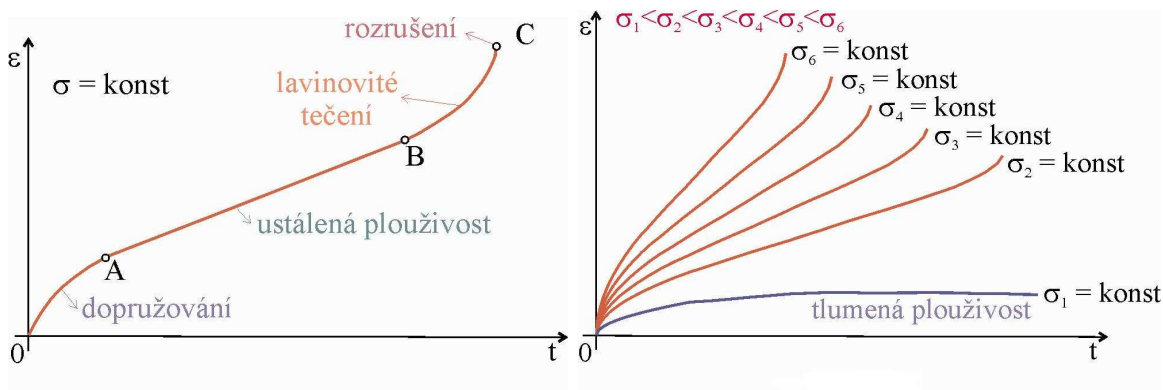
Vliv změny frekvence namáhání na relaxaci hornin nebyl dosud pro malý počet zkoušek prokázán.



Obr. 5. Srovnání relaxace hornin při různém nastavení TSP
Fig. 5. Comparison of relaxation curves on various TSP

Plouživost hornin při dynamickém namáhání

Plouživostí hornin rozumíme schopnost horniny přetvářet se v čase, aniž by došlo ke změně působícího zatížení. Jinými slovy sledujeme přetváření horniny v čase, při konstantním zatížení. Podle PETROŠE (2008) je obecná závislost plouživosti při statickém zatížení uvedena na následujících obrázcích č. 6.



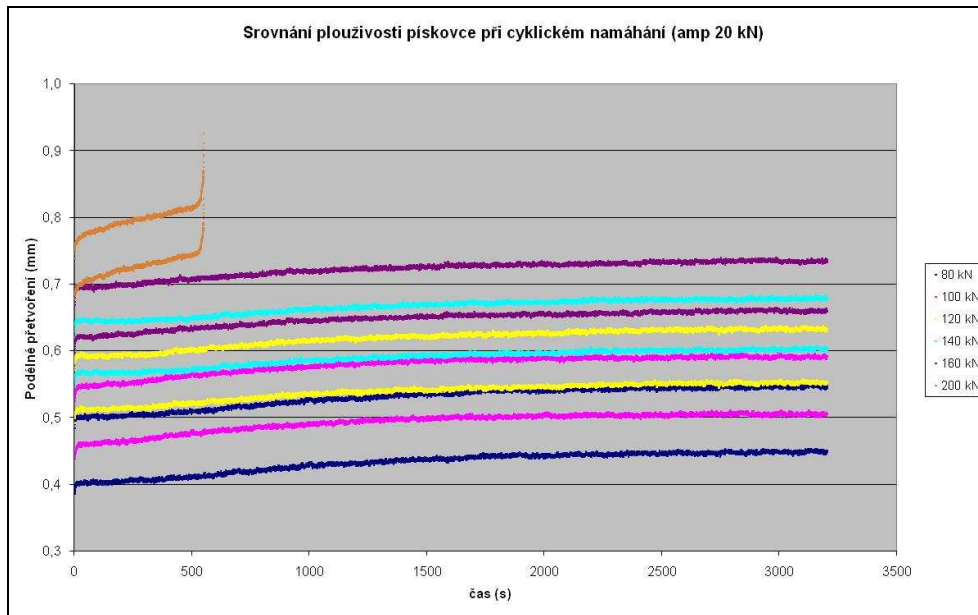
Obr. 6. Typický průběh plouživosti hornin
Fig. 6. Typical creep curve of rocks

V oblasti OA jde o tzv. dopružování horniny. Oblast AB označujeme jako ustálenou plouživost. Od bodu B dochází k zrychlení přetváření až do bodu C, kdy nastává rozrušení zkušebního tělíška. Úsek křivky BC charakterizuje lavinové tečení.

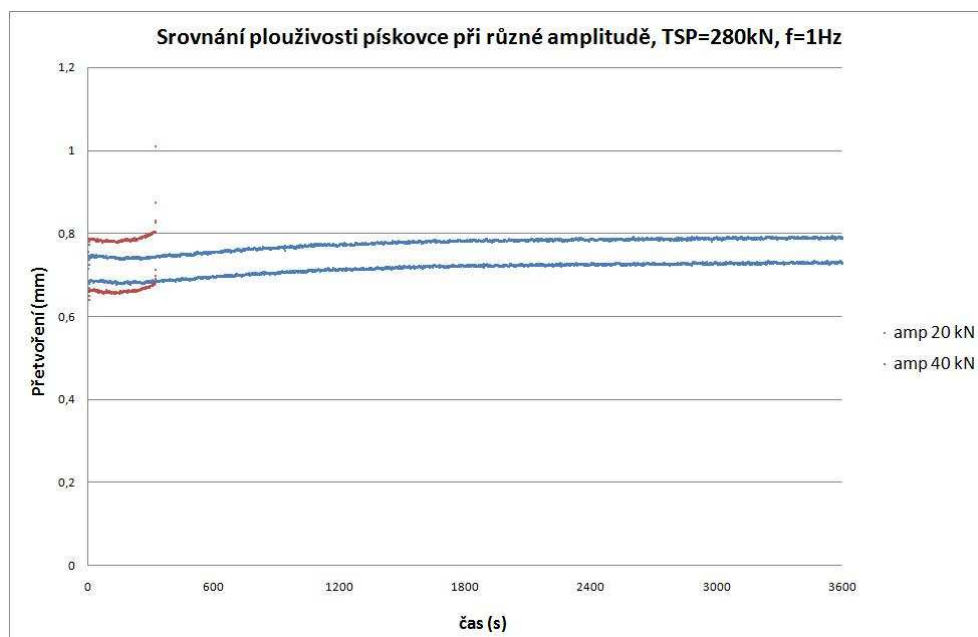
Při použití různých zatěžovacích napětí by měly být obdrženy u téže horniny různé křivky plouživosti – viz obr. 6. Charakteristické body A, B, C leží na spojitých křivkách. Při užití nižších napětí dochází po určité době k zastavení nárůstu přetvoření, nedojde k lavinovému tečení, a tudíž nedojde ani k rozrušení horninového tělíška. V tomto případě hovoříme o tlumené plouživosti. K tlumené plouživosti dojde tehdy, když působící konstantní napětí je menší nebo rovné dlouhodobé pevnosti.

V rámci výzkumu plouživosti hornin při dynamickém namáhání byly prováděny zkoušky s různým nastavením vstupních hodnot (TSP, amplituda, frekvence) a tyto pak vzájemně srovnávány.

Nejprve byly srovnávány křivky plouživosti pískovce při různé hodnotě TSP, avšak shodné amplitudě $A = 20 \text{ kN}$ i frekvenci $f = 5 \text{ Hz}$. Hodnota TSP se postupně zvyšovala až do porušení vzorku. Graf závislostí z tohoto výzkumu je uveden na obrázku 7. Z obrázku je patrné dopružování, které nastává ihned po zatížení. Poté následuje fáze ustálené plouživosti, která je zpravidla zpočátku mírně utlumena nárůstem teploty v horninovém tělísku při dynamickém namáhání (viz výše). Většina křivek při nižší hodnotě TSP se utlumí. Při hodnotě TSP 200 kN k utlumení nedošlo a po poměrně krátké době ustálená plouživost přešla do stádia lavinového tečení, což přešlo do porušení a ztrátě soudružnosti vzorku.



Obr. 7. Srovnání plouživosti pískovce při dynamickém namáhání
 Fig. 7. Comparison of creep curves of sandstone under cyclic loading



Obr. 8. Srovnání plouživosti pískovce při různé amplitudě
 Fig. 8. Comparison of creep curves at various setup of amplitude

Byl rovněž zkoumán vliv velikosti amplitudy. Při neměnné hodnotě TSP i frekvence byla měněna velikost amplitudy. Grafický záznam plouživosti z tohoto měření je vyobrazen na obrázku 8. Z obrázku je patrný vliv velikosti amplitudy. Zatímco při nižší hodnotě nastavené amplitudy se plouživost horninového tělíska postupně tlumila, při vyšší hodnotě amplitudy se vzorek za poměrně krátkou dobu porušil.

V současné době je sledován vliv nastavení frekvence namáhání na plouživost hornin, při jinak shodném nastavení TSP a amplitudy. Vzhledem ke skutečnosti, že nebyl v tomto režimu zatím uskutečněn dostatečný počet zkoušek, nebylo možné do tohoto článku zařadit výsledky uvedeného zkoumání.

Závěr

Závěrem je třeba podotknout, že se jedná o základní výzkum a článek nemá přímou návaznost na aplikaci v boji proti anomálním geomechanickým jevům. Výzkum vlastností hornin při dynamickém (cyklickém) namáhání, však může napomoci k lepšímu pochopení dějů, které probíhají při těchto geomechanických jevech v horském masívu.

V článku byly shrnuty některé poznatky z výzkumu hornin při tomto druhu namáhání hornin. Bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti hornin při cyklickém namáhání jsou závislé jak na amplitudě, tak frekvenci namáhání. Chování hornin při dynamickém namáhání v reologickém režimu má obdobný průběh jako při statickém namáhání. Výzkum rovněž potvrdil, že jedním ze základních požadavků při dlouhodobých zkouškách horninových vzorků je udržování pokud možno konstantního stavu zkušebního prostředí, zejména stálé teploty. Pro vyloučení chyb vzniklých změnou teploty je pro další měření doporučeno stálé sledování teploty horniny i okolí.

Důležitým je poznatek, že energie spotřebovaná na ohřátí horniny při zatížení vzniká přeměnou z deformační energie – svědčí o tom např. počátek křivky relaxace.

Poděkování:

Príspevek byl zpracován za finanční podpory Grantového projektu GAČR 105/08/P307.

Literatura

- HOLUB, K. & ŠANCER, J. (2007): Hodnocení parametrů důlních otřesů v OKR za období 1993-2005 na základě seismologických pozorování a jejich projevů in-situ, Sborník referátů Tradiční geomechanické a geofyzikální kolokvium. OKD, DPB, a.s. Paskov.
- PETROŠ, V. (2008): Mechanika hornin a zemin, skriptum HGF, VŠB TU Ostrava.
- PETROŠ, V., ET AL. (2008): Výzkum energetické charakteristiky hornin při dynamickém namáhání. Závěrečná zpráva projektu GAČR č. 105/05/0883, VŠB-TU Ostrava.
- PETROŠ, V. & ŠANCER, J. (2007): Energetické anomálie při dynamickém namáhání karbonských hornin. Sborník referátů Tradiční geomechanické a geofyzikální kolokvium. OKD, DPB, a.s. Paskov.
- PETROŠ, V., ŠANCER, J. & KADLEC, Z. (2007): Research of energy distribution during dynamic loading of rocks. Proceedings of 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. Lisabon, Portugal, ISRM International Symposium 2007. ISBN 978-0-415-45084-3.
- SKLENÁŘ J., ŽIVOR R. & FILLER V. (2000): Contribution to the deformation behaviour of rocks during rheological loading. Acta Montana IRSM AS CR Series A No. 16(118), 175-188.
- TRČKOVÁ, J. (2002): Reologické vlastnosti hornin se zaměřením na granitoidní a metamorfované horniny, studie, Praha.

Odborné posouzení Doc. Ing. Petr Konečný, CSc.