

Vplyv teploty na pretvárne a pevnostné charakteristiky hornín

Milan Labaš¹

The Influence of Temperature on the Deformational and Strength Characteristics of Rocks

The stresses generated as a result of different thermal characteristics of particular rock components as well as the stresses generated as a result of various changes in the chemical or crystallographical rock composition at raised rock temperature are assigned as structural thermal stresses. Both the uniaxial compressive strength change and the deformational modulus change were observed at five various reference temperatures of Ruskov andesite and Hnilec granite. Structural thermal stresses, induced in the rock, increase its disturbance due to inter- and intragranular cracks initiation and the propagation on the micro- and mesoscopic level in a quite significant way. This results in both the uniaxial compressive strength and the deformational modulus decrease. The uniaxial compressive strength decrease is more significant than the longitudinal waves propagation velocity decrease, which is apparently connected with the created cracks activation at loading while determining the rock strength. It is necessary to consider the structural thermal stress influence on the deformational and strength characteristics in the quantification of all thermal treatment processes in rocks. Not considering this influence may result in the overestimating their effect on the rock or some of its characteristics.

Key words: uniaxial compressive strength, deformational modulus, temperature influence

Úvod

Pri pôsobení tepelného zdroja na horninu sa v objeme horniny generuje napät'ové pole. Toto napät'ové pole je výsledkom súčasného pôsobenia dvoch typov termických napätí: gradientných a štruktúrnych. Gradientné termické napätia sú generované v hornine vplyvom pôsobenia teplotného gradientu pri prestupe tepla z tepelného zdroja do horniny a ich veľkosť je určená jednak charakteristikami tepelného zdroja (teplota, spôsob pôsobenia na horninu) a jednak tepelno-technickými vlastnosťami horniny (tepelná rozťažnosť, tepelná kapacita, tepelná vodivosť). Ako štruktúrne termické napätia označujeme napätia generované v dôsledku rozdielnych hodnôt tepelných charakteristík jednotlivých zložiek horniny, v dôsledku anizotropie tepelnej rozťažnosti jedného minerálu (napr. kremeň) alebo napätia generované v dôsledku rôznych zmien v chemickom alebo kryštalografickom zložení horniny pri zvyšovaní jej teploty. Štruktúrne termické napätia sa v hornine indukujú aj v prípade, že teplotný gradient vyvolaný pôsobením tepelného zdroja je zanedbateľne malý (Homand-Etienne, Houpert, 1989).

Prezentovaný príspevok sa zaoberá vplyvom štruktúrnych termických napätí na vybrané charakteristiky horniny, menovite na zmenu pevnosti v prostom tlaku a zmenu modulu pružnosti s teplotou ohrevu vzoriek horniny. Pre výskum boli vybrané dva typy hornín: andezit z lokality Ruskov (Slovensko) a žula z lokality Hnilec (Slovensko).

Vplyv vysokých teplôt na pevnostné parametre hornín závisí od správania minerálov, ktoré tvoria horninu. Ak sa pri zvýšení teploty minerály neporušujú, potom je možný rôzny charakter pevnosti so zmenou teploty, závisiaci na veľkosti a smere vnútorných termických napätí. Ak dochádza k vytaveniu minerálov, ich vyhoreniu alebo rozkladu, pevnosť hornín sa znižuje. Medza pevnosti hornín v prostom tlaku má so zvyšovaním teploty rôzny priebeh, čo tiež súvisí so vznikom, veľkosťou a smerom termónapätí v hornine (Rževskij, Novik, 1973).

Moskalev et al (1987) rozdelil skalné horniny podľa charakteru zmeny pevnosti v oblasti vysokých teplôt do dvoch skupín:

- - horniny, ktorých pevnosť sa so zvyšovaním teploty postupne znižuje,
- - horniny, ktorých pevnosť sa so zvyšovaním teploty najprv zvyšuje po určité maximum a potom sa znižuje.

Do prvej skupiny patria horniny, pri ohreve ktorých dochádza ku kvalitatívnym a kvantitatívnym zmenám ich stavby, sprevádzaných uvoľnením prchavých zložiek, tavením, atď. Sú to napr. mramor, apatit, dolomit, vápenec.

Horniny druhej skupiny majú maximálne hodnoty pevnosti v oblasti teplôt 473-573° K, pričom tieto hodnoty sú o 20-40 % vyššie ako pri normálnej teplote. Toto zvýšenie pevnosti možno vysvetliť vznikom dislokácií v mineráloch a medzizmovej hmote, ktoré sa medzi sebou zmiešavajú a nevychádzajú na povrch, čo vedie k zvýšeniu pevnosti. Pri ďalšom zvýšení teploty nad spomínanú oblasť teplôt dochádza k znižovaniu pevnosti v dôsledku zhlukovania vakancií, ako zárodkov mikrotrhlín, ktoré sa rozvíjajú pôsobením štruktúrnych termických napätí. K tejto druhej skupine hornín patria pieskovce, gabro, žuly, železité kvarcity.

¹ Ing. Milan Labaš, Ústav geotechniky SAV, 04353 Košice, Watsonova 45., labas@saske.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 15. 11. 2004)

Modul pružnosti väčšiny kryštalických hornín postupne klesá so zvyšovaním teploty, keďže sa začína prejavovať nárast tepelného pohybu molekúl a zvýšenie plasticity. Najvýraznejší pokles modulu pružnosti sa pozoroval do 870° K, pri ďalšom zvyšovaní teploty ostával približne rovnaký (Rževskij, Novik, 1973).

Horniny s obsahom kremeňa majú minimálnu hodnotu modulu pružnosti pri teplote okolo 846° K. V oblasti nad touto teplotou dochádza k jeho rýchlemu nárastu. Existencia tejto minimálnej hodnoty sa vysvetľuje polymorfnou premenou kremeňa. Pre amorfné a niektoré jemnozrné horniny je charakteristické postupné zvyšovanie modulu pružnosti so zvyšovaním teploty. Ílovité horniny, ktoré majú vodno-koloidný charakter väzby medzi časticami, sa so zvyšovaním teploty spekajú, spevňujú a hodnoty ich pružnostných parametrov sa znásobujú.

Pre charakterizovanie zmeny hodnoty modulu pružnosti hornín s teplotou bol zavedený koeficient pomernej zmeny modulu pružnosti s teplotou (Dmitrijev et al, 1969):

$$\varphi = \frac{E_0 - E_T}{E_0} , \quad (1)$$

kde E_0 - modul pružnosti horniny pri cca. 20° C,
 E_T - modul pružnosti horniny pri teplote T.

V intervale teplôt od 200 do 500°C Dmitrijev et al (1969) rozdelili horniny do troch skupín:

1. Termicky pružné horniny, pre ktoré platí lineárna závislosť $\varphi(T)$ daná vzťahom:

$$\varphi = a_1 T + b_1 . \quad (2)$$

Sem boli zaradené bezrudné a železité kvarcity a jemnozrné žuly.

2. Termicky pružno-plastické horniny, pre ktoré platí tzv. posunutá exponenciálna závislosť $\varphi(T)$, charakteristická nevelkým odklonom od lineárnej závislosti, daná rovnicou:

$$\varphi = a_2 T^{b_2} + c_2 . \quad (3)$$

Do tejto skupiny hornín boli zaradené stredne až hrubozrné žuly, granodiority, pegmatity, niektoré železité kvarcity. Odklon od lineárnej závislosti bol vysvetlený plastickými javmi na hraniciach zrn.

3. Termicky plastické horniny, pre ktoré platí hyperbolická (tzv. zbertená hyperbola) teplotná závislosť koeficientu $\varphi(T)$ daná rovnicou:

$$\varphi = \frac{T}{a_3 + b_3 T} . \quad (4)$$

Sem boli zaradené peridotity, gabrodiabázy a gabrá.

Metodika určovania pevnosti v prostom tlaku a modulu pružnosti

Zo skúšobných hornín boli zhotovené valcové vzorky s kruhovou podstavou s priemerom cca 32 mm a štíhlostným pomerom 2. Na týchto vzorkách boli realizované skúšky pre zistenie pevnosti v prostom tlaku a modulu pružnosti.

Skúšky pevnosti v prostom tlaku boli robené pri zvýšenej (referenčnej) teplote, preto bol zhotovený špeciálny tepelne izolovaný prípravok, do ktorého sa vkladali zohriate vzorky. Prípravok so vzorkou bol potom vložený medzi čeľuste lisu a zaťažovaný. Aby sa skutočne zistil len vplyv štruktúrnych termických napätí na výslednú pevnosť a vylúčil vplyv teplotného gradientu, boli vzorky pomaly ohrievané v elektrickej peci, a to do teploty 573° K rýchlosťou 50° Kh⁻¹, nad touto teplotou rýchlosťou 100° Kh⁻¹. Po dosiahnutí požadovanej referenčnej teploty bola vzorka temperovaná 4 hodiny. Referenčné teploty boli zvolené na základe teplotnej závislosti koeficienta lineárnej tepelnej rozťažnosti týchto hornín. Referenčné teploty andezitu boli 293, 473, 523, 673 a 873 °K, u žuly 293, 473, 673, 873 a 1073° K.

Tie isté referenčné teploty boli zvolené aj pre určovanie modulu pružnosti. Tieto merania boli však realizované na vychladnutých vzorkách. Vzorky boli najprv ohrievané tým istým spôsobom ako vzorky pre zisťovanie pevnosti v prostom tlaku, pričom ich ochladzovanie prebehlo podľa tej istej schémy ako ohrev, t.j. bola dodržaná v daných teplotných rozsahoch pri ochladzovaní tá istá rýchlosť ako pri ohreve. Vzorky boli zaťažované pri konštantnej rýchlosti pomernej deformácie 10⁻⁴s⁻¹.

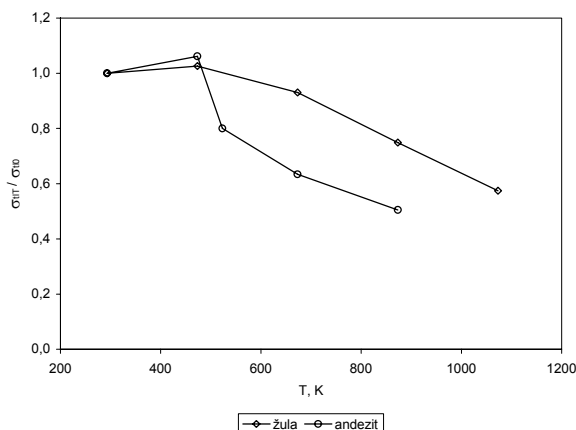
Výsledky experimentov a diskusia

Na obr.1 sú zobrazené priebehy zmeny hodnoty pevnosti v prostom tlaku pri zvyšovaní teploty pre andezit Ruskov a žulu Hnilec.

U oboch hornín došlo najprv k nárastu pevnosti v prostom tlaku pri teplote 473° K oproti pevnosti pri teplote 293° K, pričom toto zvýšenie predstavovalo 6 % u andezitu, resp. 3 % u žuly, vid'. obr. 1. Tento nárast je však vzhľadom na rozptyl hodnôt pevnostných charakteristík hornín všeobecne malý a možno tvrdiť, že do teploty 293° K sa priemerná hodnota pevnosti v prostom tlaku u oboch hornín takmer nemení.

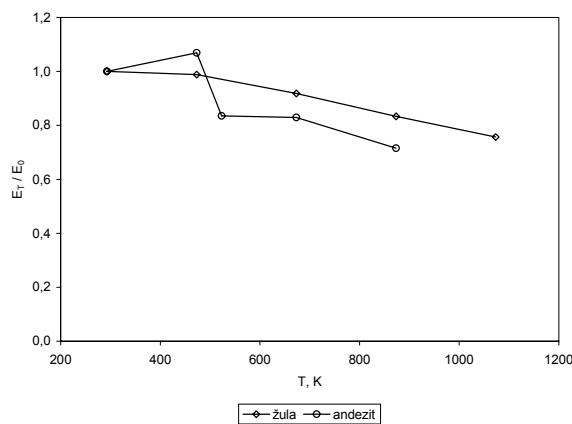
U andezitu je pri teplote 523° K hodnota pevnosti v prostom tlaku menšia o 20% oproti pôvodnej hodnote, pri ďalšom narastaní teploty je tento pokles už miernejší, vid'.obr. 1. Toto zníženie bolo očakávané vzhľadom na priebeh krivky zmeny koeficienta lineárnej tepelnej rozťažnosti s teplotou, kde v oblasti teploty 513° K je výrazný nárast jeho hodnoty, čo naznačuje, že v tejto teplotnej oblasti dochádza k nejakej výraznejšej zmene v štruktúre alebo zložení andezitu.

U žuly Hnilec klesá hodnota pevnosti v prostom tlaku postupne s narastajúcou teplotou, vid'. obr. 1. Zaujímavé pri tom je to, že polymorfná premena β -kremeňa na α -kremeň v oblasti teploty 850° K, ktorá je jednoznačne určená priebehom krivky zmeny koeficienta lineárnej tepelnej rozťažnosti s teplotou, sa neprejavila nejakou výraznejšou zmenou pevnosti. To môže byť spôsobené tým, že už v oblasti teplôt okolo 673° K sa v dôsledku indukovaných štruktúrnych termických napätí tvoria a širšia mikrotrhliny, resp. trhliny na mezoskopickú úroveň, do takej miery, že je ich existenciou potlačený očakávaný prejav tejto polymorfnej premeny.



Obr. 1. Zmena hodnoty pevnosti v prostom tlaku andezitu Ruskov a žuly Hnilec s teplotou; σ_{iT} – hodnota pevnosti v prostom tlaku pri referenčnej teplote T , σ_{i0} – hodnota pevnosti v prostom tlaku pri teplote 293°K.

Fig. 1. The temperature change of the uniaxial compressive strength (UCS) values for the Ruskov andesite and Hnilec granite; σ_{iT} – UCS value for the reference temperature T , σ_{i0} – UCS value at 293°K.



Obr. 2. Zmena hodnoty modulu pružnosti andezitu Ruskov a žuly Hnilec s teplotou; E_T – hodnota modulu pružnosti pri referenčnej teplote T , E_0 – hodnota modulu pružnosti pri teplote 293°K.

Fig. 2. The temperature change of the deformational modulus values for the Ruskov andesite and Hnilec granite; E_T – deformational modulus value for the reference temperature T , E_0 – deformational modulus value at 293°K.

Mierny nárast pevnosti u oboch hornín pri teplote 473° K je možné vysvetliť aj tým, že pri tejto teplote štruktúrne termické napätia nie sú dostatočné na tvorbu a rozvoj mikrotrhlín a že v tejto teplotnej oblasti dochádza k podobným javom na submikroskopickú až mikroskopickú úroveň ako u kovových materiálov, t.j. k pohybu a interakcii dislokácií, ich hromadeniu na hraniciach zŕn, čo podľa Cotrellovej teórie vedie k zvýšeniu pevnosti materiálu (Puškár, 1986).

Na obr.2 sú zobrazené priebehy zmeny hodnoty modulu pružnosti pri zvyšovaní teploty pre andezit Ruskov a žulu Hnilec.

U žuly aj u andezitu možno sledovať, že pokles hodnoty modulu pružnosti s teplotou je kvalitatívne podobný ako pokles pevnosti v prostom tlaku s teplotou. Sú tu však určité kvantitatívne odlišnosti. Pokles hodnôt rýchlosti nie je taký výrazný ako v prípade pevnosti. Podobne ako v prípade zmeny pevnosti pri teplote 473° K aj u modulu pružnosti došlo k miernemu nárastu jeho hodnoty u andezitu (7 %), u žuly došlo k minimálnemu poklesu (1 %).

U andezitu je najvýraznejší pokles hodnoty modulu pružnosti (o 16 % oproti hodnote modulu pružnosti pri 293° K) v oblasti teploty 523° K, čo sa zhoduje s tendenciou poklesu pevnosti. Pri ďalšom zvýšení teploty na 673° K jeho hodnota stagnuje, k ďalšiemu poklesu dochádza pri zvýšení teploty na 873° K.

U žuly Hnilec je priebeh poklesu hodnoty modulu pružnosti kvalitatívne podobný ako pokles pevnosti, nie je však taký výrazný. To môže byť spojené s metodikou zisťovania pevnosti v prostom tlaku, resp. modulu pružnosti. Kým v prípade zisťovania pevnosti sa merania robili na horúcich vzorkách, pri zisťovaní modulu pružnosti sa použili vychladnuté vzorky. V prvom prípade sa tak mohlo výraznejšie prejavíť narastanie plasticity horninového materiálu, najmä v oblasti vyšších teplôt.

Záver

Štruktúrne termické napätia indukované v hornine pomerne výrazným spôsobom zvyšujú jej porušenosť v dôsledku tvorby a šírenia inter- a intragranulárnych trhlín na mikro- a mezoskopickú úroveň. Nárast porušenia horniny možno nepriamo sledovať prostredníctvom zmeny jej pevnosti alebo prostredníctvom zmeny hodnoty modulu pružnosti. Na základe experimentov pre stanovenie pevnosti v prostom tlaku a modulu pružnosti pri referenčných teplotách, zvolených na základe priebehu krivky teplotnej závislosti tepelnej rozťažnosti, ktoré boli robené na andezite Ruskov a žule Hnilec možno urobiť tieto závery:

1. Štruktúrne termické napätia spôsobujú nárast porušenia hornín, ktorý sa navonok prejavuje poklesom pevnosti v prostom tlaku aj modulu pružnosti.
2. Pokles pevnosti v prostom tlaku je výraznejší ako pokles modulu pružnosti, čo je zrejme spojené s metodikou zisťovania týchto charakteristík.
3. Pri poklese modulu pevnosti žuly Hnilec nebola zaregistrovaná minimálna hodnota v oblasti teplôt 846° K, tak ako sa uvádza v literatúre (Rževskij, Novik, 1973).

Experimenty preukázali nesporný vplyv zvýšenej teploty horniny a následnej indukcie štruktúrnych termických napätí na porušenosť horniny, resp. na hodnoty pevnosti v prostom tlaku a modulu pružnosti. Kvantifikácia veľkosti štruktúrnych termických napätí je veľmi zložitá a možná zrejme len použitím štatistickej a numerickej matematiky. Napriek tomu je nutné zohľadniť vplyv vysokej teploty na pevnostné a pretvárne charakteristiky horniny pri kvantifikácii všetkých procesov skúmaných na horninách, pre ktoré je typický nárast teploty horniny, napr. termické rozpojavanie, posúdenie stability podzemných diel po požiaroch.

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu VEGA č. 3210

Literatúra.-References

- Dmitrijev, A., P., Kuzjajev, L., S., Protasov, Ju., I., Jamščikov, V., S.: Fizičeskije svojstva gornych porod pri vysokich temperaturach, *Nedra, Moskva 1969*.
- Hoand-Etienne, F., Houpert, R.: Thermally Induced Microcracking in Granites: *Characterization and Analysis. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.&Geomech.Abstr., Vol.26, No.2, pp.125-134, Pergamon Press, Oxford 1989*.
- Moskalev, A., N., Pigida, A., J., Kerekilica, L., G., Buchalin, J., N.: Razrušeniye gornych porod pri termocikličeskom vozdejstviji, *Naukova Dumka, Kijev 1987*.
- Pušár, A.: Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov. *Veda, Bratislava 1986*.
- Rževskij, V., V., Novik, G., J.: *Osnovy fiziki gornych porod, Nedra, Moskva 1973*.