

Komplexný výskum tepelno-technických parametrov andezitu Ruskov

Milan Labaš, František Krepelka a Viera Miklúšová¹

Complex investigation of thermo-technical parameters of Ruskov andesite

The research of thermo-technical parameters of Ruskov andesite was made as a part of the complex research of its properties as well as of rock disintegration by the action of chemical flame on the rock surface, i.e. thermal spalling in particular. Thermal spalling is a process in which thermal stresses are induced in the surface layer of rock whose surface is thereby disintegrated into small parts, the so called spalls, by the brittle manner. The evaluation of thermo-technical properties of the studied rocks is necessary for the qualification and quantification of the thermal spalling process.

The measured and evaluated parameters were the coefficient of linear thermal expansion, the coefficient of thermal conductivity, the specific heat capacity and the coefficient of thermal diffusivity.

Andesite from the Ruskov locality was chosen as a basic experimental material for the investigation of thermal spalling upon preliminary experiments.

The estimated thermo-technical parameters were analyzed regarding the application of thermal spalling for the disintegration of the Ruskov andesite. The outcome is that the values of determined thermo-technical parameters established an expectation for its successful application.

Key words: coefficient of linear thermal expansion, thermal conductivity, specific heat capacity, thermal diffusivity

Úvod

Výskum tepelno-technických parametrov andezitu Ruskov bol robený v rámci výskumu rozpojovania hornín pôsobením plameňa a to konkrétne termického odlupovania. Termické odlupovanie je proces, pri ktorom pôsobením tepelného zdroja, t.j. plameňa, dochádza k indukovaniu termických napätí v povrchovej vrstve horniny a jej krehkému rozpojeniu. Pre kvalifikáciu a kvantifikáciu procesu termického odlupovania je potrebné vyhodnotiť tepelno-technické vlastnosti skúmaných hornín.

Pod tepelno-technickými vlastnosťami hornín rozumieme vlastnosti, ktoré popisujú ich špecifické správanie pri pôsobení tepelného poľa na ne. Tepelná (obecne aj iná fyzikálna) vlastnosť je charakterizovaná jedným alebo niekoľkými parametrami.

Tepelno-technické vlastnosti je možné rozdeliť do dvoch skupín.

Prvá skupina sú parametre, charakterizujúce pôsobenie tepelného poľa na horninu:

- a) parametre, charakterizujúce vratné pôsobenie - entropia a jej zodpovedajúci parameter merná tepelná kapacita, koeficient tepelnej rozťažnosti,
- b) parametre, charakterizujúce nevratné pôsobenie - teplota tavenia.

Druhá skupina sú parametre, charakterizujúce schopnosť hornín ovplyvňovať tepelné pole:

- a) parametre, charakterizujúce schopnosť prenášať tepelnú energiu - koeficient tepelnej, resp. teplotnej vodivosti,
- b) parametre, charakterizujúce schopnosť pohlcovať tepelnú energiu - merné teplo tavenia.

Ďalej je možné tieto parametre deliť na skalárne, t.j. parametre statického charakteru (napr. merná tepelná kapacita) a na tenzorové, t.j. parametre charakterizujúce prenášanie tepelnej energie (napr. koeficient tepelnej vodivosti).

Tepelné vlastnosti hornín, podobne ako aj iné fyzikálne vlastnosti hornín, závisia od kvality a kvantity mineralogického zloženia, štruktúry a textúry horniny, vrstevnatosti, pórovitosti, prítomnosti plyných alebo kvapalných médií v póroch a trhlinách.

V rámci uskutočneného výskumu boli nasledovné parametre: koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti, koeficient tepelnej vodivosti, merná tepelná kapacita a koeficient teplotnej vodivosti.

Ako základný skúšobný materiál pre skúmanie termického odlupovania bol na základe predbežných skúšok vybraný andezit z lokality Ruskov.

¹ Ing. Milan Labaš, Ing. František Krepelka, PhD., Mgr. Viera Miklúšová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, labas@saske.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 13. 12. 2006)

Metodika merania a výsledky experimentov

Koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti

Tepelná rozťažnosť hornín, ako aj iných materiálov, sa posudzuje koeficientmi lineárnej a objemovej tepelnej rozťažnosti. Obidva koeficienty sú tepelno-fyzikálnymi parametrami hornín, ktoré určujú ich schopnosť pretransformovať tepelnú energiu na mechanickú.

Koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti β je definovaný ako pomer relatívnej zmeny dĺžky vzorky s pôvodnou hodnotou l_0 pri zmene teploty materiálu o 1K, čo možno matematicky vyjadriť vzťahom:

$$\beta = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT} \quad (K^{-1}), \quad (1)$$

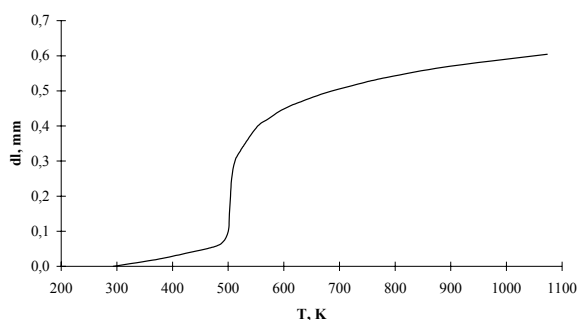
kde l_0 – pôvodná dĺžka vzorky (m), dl – zmena dĺžky vzorky pri ohreve (m), dT – zmena teploty (K).

Koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti β bol meraný na dilatometri HTV pri Bolenhardtovom zapojení diferenčnou metódou.

Dilatometer HTV je konštruovaný na meranie tepelnej rozťažnosti kovov. Priebeh absolútnych dĺžkových zmien skúšanej vzorky, je možné merať v rozsahu teplôt 0 – 1100 °C.

Pre meranie bolo z horniny pripravených päť vzoriek v tvare hranolčeka s približnými rozmermi 6 x 6 x 50 mm. Vzorky boli pripravované z rôznych kusov horniny, povrch vzoriek bol obrúsený a vyleštený. Vzorky boli pred samotným meraním vysušené v sušiarňi pri teplote 105 °C (cca 24 hodín) a vychladené v desikátore na izbovú teplotu. Rýchlosť ohrevu bola udržiavaná konštantná 4 °C.min⁻¹.

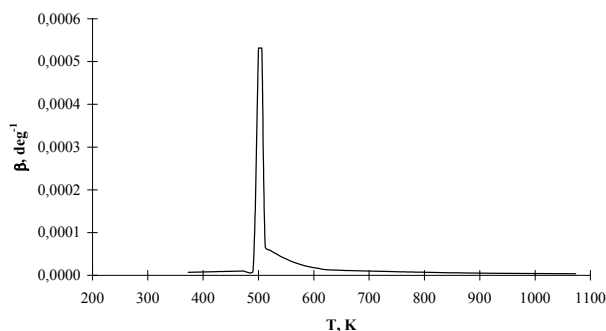
Na základe meraní boli získané krivky zmeny dĺžky vzoriek s teplotou $dl(T)$. Na obrázku 1 je typická krivka $dl(T)$ pre andezit Ruskov. Keďže tieto krivky nebolo možné popísať jedinou rovnicou $dl(T)$, celá krivka bola rozdelená na niekoľko úsekov, v ktorých bola zmena dĺžky vzorky popísaná polynomičnými funkciami a následne bol vyhodnotený koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti pre jednotlivé vzorky podľa rovnice (1).



Obr. 1. Priebeh zmeny dĺžky vzorky andezitu Ruskov s teplotou ($l_0=45,8$ mm).

Fig. 1. The course of change in the length of Ruskov andesite sample ($l_0=45,8$ mm).

Výsledná hodnota koeficientu lineárnej tepelnej rozťažnosti bola určená ako priemer z piatich meraní. Na obr. 2 je znázornený priebeh výslednej hodnoty koeficientu lineárnej tepelnej rozťažnosti pre andezit Ruskov.



Obr. 2. Teplotný priebeh výslednej hodnoty koeficienta lineárnej tepelnej rozťažnosti andezitu Ruskov.

Fig. 2. The temperature course of the resultant value of the coefficient of linear thermal expansion of the Ruskov andesite.

Na krivke zmeny hodnoty koeficienta lineárnej tepelnej rozťažnosti $\beta(T)$ pre andezit Ruskov je zjavné jedno veľmi výrazné maximum, ktoré sa nachádza v oblasti teplôt 500 až 506 K. Po teplote 500 K rastie koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti mierne podľa lineárnej závislosti. Pri teplote 500 K dochádza ku skokovej zmene hodnoty koeficienta tepelnej rozťažnosti a pri zvyšovaní teploty nad 506 K jeho hodnota nelineárne klesá.

Tepelná a teplotná vodivosť hornín

Ak v tuhom nepriepriaznenom telese existuje teplotný gradient, potom teplo prestupuje z oblasti s vysokou teplotou do oblasti s nízkou teplotou. Tepelná vodivosť charakterizuje proces šírenia tepla v látkach a je definovaná známym Fourierovým zákonom koeficientu tepelnej vodivosti λ :

$$q = -\lambda \text{ grad}T \quad (\text{Wm}^{-1}), \quad (2)$$

kde q – vektor hustoty tepelného toku, λ – koeficient tepelnej vodivosti ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), T – teplota (K).

Koeficient tepelnej vodivosti horniny určuje schopnosť minerálov, tvoriacich horninu, viesť teplo. Horniny sú vo všeobecnosti zlými vodičmi tepla a majú nízke hodnoty koeficientu tepelnej vodivosti.

Teplotná vodivosť priamo súvisí s tepelnou vodivosťou. Koeficient teplotnej vodivosti a závisí na koeficiente tepelnej vodivosti λ , mernej tepelnej kapacity c a mernej hmotnosti ρ :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{m}^2\text{s}^{-1}), \quad (3)$$

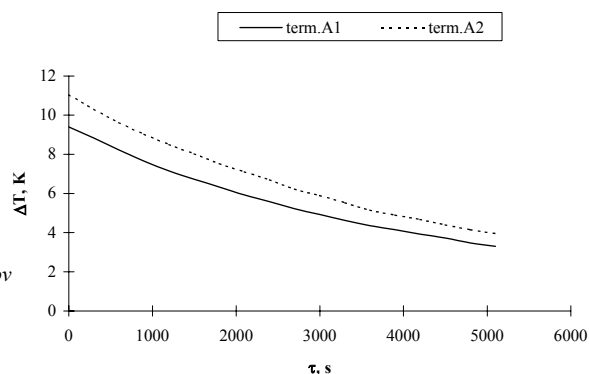
Teplotná vodivosť v podstate charakterizuje tepelnoizolačné vlastnosti hornín pri nestacionárnom tepelnom režime. Koeficienty teplotnej vodivosti hornín majú rádovo hodnoty $10^{-3} - 10^{-4} \text{ m}^2\text{h}^{-1}$.

Ako metóda merania pre stanovenie koeficienta teplotnej vodivosti bola vybraná metóda regulárneho režimu I. druhu, konkrétne metóda regulárneho chladnutia kocky, matematickú formuláciu ktorej rozpracovali Matiašovský a Koronthályová (1993). Regulárny režim je definovaný ako neustálený stav, charakterizovaný nezávislosťou časovo - priestorového rozloženia teploty pri chladnutí, resp. zahrievaní vzorky v prostredí s konštantnou teplotou, pričom teplotné zmeny prebiehajú podľa jednoduchého exponenciálneho zákona. Pri metóde regulárneho režimu I. druhu sa určuje teplotná vodivosť analýzou časového priebehu rozdelenia teploty vo vzorke s počiatočnou teplotou T_0 , náhle prenesenej do prostredia s odlišnou konštantnou teplotou. Citovaní autori popisali štádium regulárneho režimu chladnutia kocky s hranou d a počiatočnou teplotou T_0 premiestnenej do prostredia s nižšou konštantnou teplotou T_∞ pri okrajových podmienkach 3. druhu.

Merania boli robené na kockových vzorkách s dĺžkou hrany cca 100 mm. Povrch vzoriek bol jemne zabrušený a pred meraním boli vzorky vysušené v sušiarňi pri 105 °C.

Horninové kocky s pripevnenými termočlánkami boli temperované v sušiarňi na konštantnú teplotu $T_0 = 303\text{-}308 \text{ K}$ ($t_0 = 30\text{-}35 \text{ °C}$) a potom prenesené do prostredia s nižšou konštantnou teplotou T_∞ (do uzavretej miestnosti s teplotou $t_\infty = 20 \text{ °C}$) a zavesené na stojan pomocou tenkých špagátov. Kocka bola orientovaná tak, že hrana kocky, v strede ktorej bol umiestnený termočlánok A2, bola zvislou hranou kocky a v strede zvislej steny priľahlej k tejto hrane bol umiestnený druhý termočlánok A1.

Výsledkom meraní bol časový záznam poklesu teploty vzorky v dvoch bodoch merania pri jej chladnutí. Typický priebeh chladnutia vzorky andezitu Ruskov je na obr. 3.



Obr. 3. Časový záznam priebehu chladnutia vzorky andezitu Ruskov pre stanovenie koeficienta tepelnej vodivosti.

Fig. 3. The time-dependent logging of the Ruskov andesite cooling curve for the estimation of the coefficient of thermal diffusivity.

Z týchto časových záznamov chladnutia vzorky bola vyhodnotená rýchlosť ochladzovania M vzorky ako smernica priamky $\ln(T_{Ai} - T_\infty) = f(t)$. Táto smernica bola vyhodnocovaná v časovom úseku, ktorý začal cca 15 minút po umiestnení vzorky do prostredia s konštantnou teplotou, aby sa vylúčil možný vplyv výraznejších nerovnomerností teplotného poľa, spôsobených turbulentným prúdením v okolí vzorky po jej prenesení a skončil pri dosiahnutí rozdielu teploty vzorky a prostredia $\Delta T = 5 \text{ K}$, pretože od dosiahnutia tejto hodnoty začína hodnota koeficienta prestupu tepla medzi stenami vzorky a okolitým prostredím prudko klesať. Výsledná hodnota koeficienta teplotnej vodivosti bola určená ako priemer z piatich meraní.

Merná tepelná kapacita

Merná tepelná kapacita látky vyjadruje, aké množstvo tepelnej energie treba dodať 1 kg látky, aby sa jej teplota zvýšila o 1 K.

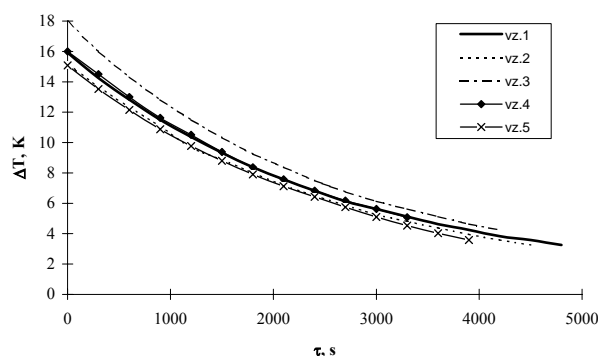
Merná tepelná kapacita je statický parameter, t.j. nemá na ňu vplyv napr. to, či je hornina v amorfnom alebo kryštalickom stave, tiež nezávisí od iných parametrov stavby horniny. Merná tepelná kapacita hornín pri konštantnom tlaku c_p je vyššia o 5-15 % ako merná tepelná kapacita pri konštantnom objeme c_V . Preto sa merná tepelná kapacita pevných máloporovitých hornín pri veľkých všesmerných tlakoch zvyčajne znižuje.

Pre meranie mernej tepelnej kapacity bola tiež vybraná metóda regulárneho režimu I. druhu pri okrajových podmienkach 3. druhu, pričom je potrebné poznať hodnotu koeficientu teplotnej vodivosti (Matiašovský, Koronthályová, 1993).

Merania boli robené na kockových vzorkách s dĺžkou hrany cca 40 mm. Povrch vzoriek bol jemne obrúsený a pred meraním boli vzorky vysušené v sušiarňi pri 105 °C. Pred samotným meraním boli vzorky s pripraveným termočlánkom zabalené do kovovej fólie a takto temperované v sušiarňi na teplotu 35 – 40 °C

a potom prenesené do prostredia s konštantnou teplotou (uzavretá miestnosť s teplotou cca 20 °C). Výsledná hodnota c bola určená ako priemer piatich meraní.

Na obr. 4 sú časové záznamy chladnutia vzoriek andezitu Ruskov.



Obr. 4. Časový záznam chladnutia vzoriek andezitu Ruskov pri meraní mernej tepelnej kapacity.

Fig. 4. The time-dependent logging of the cooling curves of Ruskov andesite at the specific heat capacity measurement.

Diskusia a záver

Výsledné priemerné hodnoty koeficienta teplotnej vodivosti a mernej tepelnej kapacity andezitu Ruskov, ktoré boli zistené meraním podľa uvedených metodík sú uvedené v tabuľke 1. V tejto tabuľke je uvedená aj hodnota koeficienta tepelnej vodivosti, ktorá bola vypočítaná podľa vzťahu (3) z priemerných hodnôt koeficienta teplotnej vodivosti a mernej tepelnej kapacity.

Tab. 1. Priemerné namerané hodnoty koeficienta teplotnej vodivosti a , mernej tepelnej kapacity c a vypočítaná priemerná hodnota koeficienta tepelnej vodivosti λ andezitu Ruskov.

Tab. 1. The measured mean values of the coefficient of thermal diffusivity a , specific heat capacity c and the estimated mean value of the coefficient of thermal conductivity λ for the Ruskov andesite.

Andezit Ruskov	a [m^2s^{-1}]	c [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
	$0,53 \cdot 10^{-6}$	802	1,15

Z hľadiska rozpojovania horniny pomocou plameňa pri termickom odlupovaní je dôležité dosiahnuť v povrchovej vrstve horniny takú hodnotu termicky indukovaných napätí, ktoré presiahnu hodnotu pevnosti horniny a spôsobia jej rozpojenie skôr, ako sa prejaví plastická deformácia horniny, ktorá znemožní jej krehké porušenie. Preto je dôležité, aby pri natekaní plameňa na povrch horniny dosiahol výrazný teplotný gradient v povrchovej vrstve za čo najkratší čas. Veľkosť teplotného gradientu v povrchovej vrstve je priamo úmerná hodnote koeficientu tepelnej, resp. teplotnej vodivosti (Kuneš, 1989). Po porovnaní s literárnymi údajmi o tepelno-technických vlastnostiach, resp. parametroch hornín, je možné konštatovať, že hodnoty koeficientov tepelnej a teplotnej vodivosti andezitu Ruskov sa nachádzajú na spodnej hranici rozsahu hodnôt týchto parametrov, uvedených pre rôzne horniny (Labaš, 2002). Nízke hodnoty týchto koeficientov, ktoré boli namerané, resp. stanovené pre andezit Ruskov dávajú predpoklady pre úspešnú aplikáciu termického odlupovania pre jeho rozpojovanie.

Vplyv hodnoty koeficienta tepelnej rozťažnosti na proces termického odlupovania je zrejмый z jeho definície. Čím je nárast jeho hodnoty výraznejší v oblasti nižších teplôt ohrevu horniny, tým je jeho vplyv na termické odlupovanie pozitívnejší.

Tlakové napätia, generované teplotným gradientom v hornine, paralelné s ohrievaným povrchom možno vyjadriť vzťahom (Rauenzahn, Tester, 1991):

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\beta E \Delta T}{1 - \nu} \quad (\text{Mpa}) \quad (4)$$

kde E – Youngov modul pružnosti (MPa), ΔT – teplotný gradient v hornine (K), ν – Poissonove číslo (-).

Je zřejmé, že prudký nárast hodnoty koeficienta lineárnej tepelnej rozťažnosti v oblasti teplôt 500 až 506 K indikuje možnosť rozpojovania andezitu Ruskov pomocou termického odlupovania práve po dosiahnutí tohto teplotného intervalu. V tejto teplotnej oblasti je nárast hodnoty koeficienta lineárnej tepelnej vodivosti v hodnote jedného rádu. Takýto nárast je možné pripísať len nejakej zmene v chemickom zložení niektorého z minerálov, tvoriacich tento andezit, pričom ako najpravdepodobnejšia sa ukazuje chemická zmena minerálu, ktorý zložením najpravdepodobnejšie zodpovedá magnetitu s obsahom titánu a ktorý sa pomerne hojne vyskytuje v základnej hmote andezitu Ruskov. Ostatné minerály tohto andezitu neindikujú možnosť takého prudkého nárastu tepelnej rozťažnosti.

Vzhľadom na to, že táto výrazná zmena nastáva v oblasti pomerne nízkych teplôt, je veľký predpoklad, že sa ešte neprejaví negatívny vplyv plastických deformácií pri rozpojovaní termickým odlupovaním. To by bolo možné posúdiť štúdiom vplyvu ohrevu tejto horniny na zmenu jej pretvárných vlastností, napr. posúdením vplyvu zvýšenej teploty na zmenu hodnôt modulu pružnosti.

Prispevok vznikol aj vďaka podpore VEGA.

Literatúra - References

- Kuneš, J.: Modelování tepelných procesů, *SNTL, Praha, 1989.*
- Labaš, M.: Termické rozpojovanie hornín pri pôsobení plameňa na ich povrch, Písomná práca k dizertačnej skúške, *2002 Košice.*
- Matiašovský, P., Koronthályová, O.: Moisture Dependent Thermal Properties of Cellular Concrete. In: *Building Research Journal, Vol.42, No.4, 1993, p.265-274.*
- Rauenzahn, R. M., Tester, J. W.: Numerical simulation and field testing of flame-jet thermal spallation drilling - 1. Model development. In: *Int.J.Heat Transfer, Vol.34, No.3, Pergamon Press, Oxford, 1991, p.795-808.*