

Meranie viskozity horninových tavenín

Katarína Kysel'ová¹ a Pavol Rybár²

The viscosity measurement of molten rocks

This paper deals with the viscosity measurement of molten rocks. The reason of such investigation was due to the solving of SC No. 95/135/059 LITHO-JET. Technology of thermic rock melting for trenching of tenous vertical works. One task in the scope of above investigation was to experimentally verify the properties of melts of various types of works. An important moment in the trenching of tenuous vertical works by rock melting is the ability of melt to penetrate into the rock cracks. From this point of view an important physical property of molten rock is its viscosity. There are various methods how to measure viscosity but for the continuous measurements just some of them are suitable. The most suitable is rotary viscosimeter because it is simple in its construction, it allows to measure the viscosity as a function of temperature, concentration of wide class of substances with different rheologic properties. Hence, it allows to measure structural viscosity of the chemical reaction systems. The viscosity of molten nefelinitic basanite as the function of temperature is studied in this paper. Viscosity of the nefelinitic basanite taken at locality Konrádovce was measured using rotary viscosimeter HAAKE ROTOVISKO. Eperimental conditions shown, that rising of the temperature vs. viscosity is in reverse order. Measurement is realised in scale 1370-1550°C. Under 1370°C was sample very viscous and measurement was impossible. Viscosity is the function of the temperature, pressure and gas components of rock.

Though the viscosity measurements was carried out at atmospheric pressure, what does not fully conform real condition during trenching, it is still possible to express the effect of pressure. Other conditions, which take effect of viscosity of molten rocks in nature conditions will be subject of future investigation.

Key words: viscosity, nefelinitic basanite, effect of temperature, effect of pressure.

Úvod

Článok sa zaoberá meraním viskozity roztavených hornín. Dôvodom uvedeného výskumu bolo riešenie ŠO č. 95/135/059 LITHO-JET, Technológia termického tavenia hornín za účelom hĺbenia štíhlych vertikálnych diel. Jednou z jej úloh bolo totiž experimentálne overiť vlastnosti tavenín z rôznych typov hornín, pre úspešnú realizáciu hlbinného vrtu pomocou plameňového injektora a následné zatlačanie roztavenej horniny do okolia vrtu. V dôsledku toho bol veľký dôraz kladený na stanovenie viskozity sledovaných horninových vzoriek.

Viskozita je vlastne schopnosť tekutiny klásť odpor vzájomnému premiestňovaniu častíc. Viskozita tavenín závisí od pravdepodobnosti prechodu častíc z jedného rovnovážneho stavu do druhého. Čím ľahšie sa realizuje takýto prechod, tým je viskozita menšia. V spojení s tým na viskozitu tekutín vplývajú: rozmery častíc, veľkosť energetickej bariéry, ktorú je potrebné preklenúť pohybujúcej sa častici pre realizáciu prechodu z jedného stavu do druhého a vzdialenosť medzi jeho susednými stavmi rovnováhy. So zvyšovaním týchto faktorov viskozita vzrastá. Pri zvýšení teploty, v dôsledku rastu počtu častíc schopných prekonať energetickú bariéru tečenia a zmenšenie rozmeru častíc, vplývajúcich na viskozitu, v dôsledku ich disociácie alebo iných zmien, viskozita klesá.

Existujú rôzne metódy merania viskozity, ale pre kontinuálne merania sú vhodné len niektoré. Najvhodnejší z nich je rotačný viskozimeter, jednak preto, že svojim prevedením je veľmi jednoduchý, umožňuje merať viskozitu v závislosti od teploty, koncentrácie širokej triedy látok, rôznych reologických vlastností. Teda umožňuje merania štruktúrnej viskozity chemických reakčných systémov .

Meranie viskozity nefelinického bazanitu

Viskozita vzorky nefelinického bazanitu, odobratá v lokalite Konrádovce, bola meraná rotačným viskozimetrom HAAKE ROTOVISKO so siedmimi stupňami prepínania rýchlosti otáčania. Pre ohrev bola použitá Tamannova pec typu ET.20 s inštalovaným výkonom 20 kVA, napätím 380 V, maximálnym prúdom 52,2 A a frekvenciou 50 Hz. Pec mala 7 stupňov prepínania pre hrubú reguláciu teploty a 6 stupňov prepínania pre jemnú reguláciu teploty. Vzorka bola umiestnená v grafitovom téglíku s výškou 120 mm a priemerom 60 mm. Ako čidlo bola pri meraní viskozity použitá molybdénová tyčka s priemerom 4 mm a grafitovým teleskom tvaru valca, ktorý mal priemer 15 mm a výšku 32 mm.

Pri meraní viskozity bola vzorka roztavená v Tamannovej peci a prehriata na teplotu 1550°C. Teplota sa pomaly znižovala, pričom prepnutie pece o jeden stupeň znížilo teplotu o 10°C. Po krátkej výdrži na uvedenej

¹ RNDr. Katarína Kysel'ová, PhD. Katedra chémie HF, Park Komenského 19, 043 84 Košice.

² prof. Ing. Pavol Rybár, PhD. Katedra ropného inžinierstva a využitia zemských zdrojov, Park Komenského 19, 043 84 Košice.
(Recenzované, revidovaná verzia dodaná 29.5.2001)

teplota bola odčítaná výchylka na stupnici viskozimetra a rýchlostný stupeň. Termočlánok sa dotýkal dna téglíka. Viskozita bola počítaná podľa vzťahu:

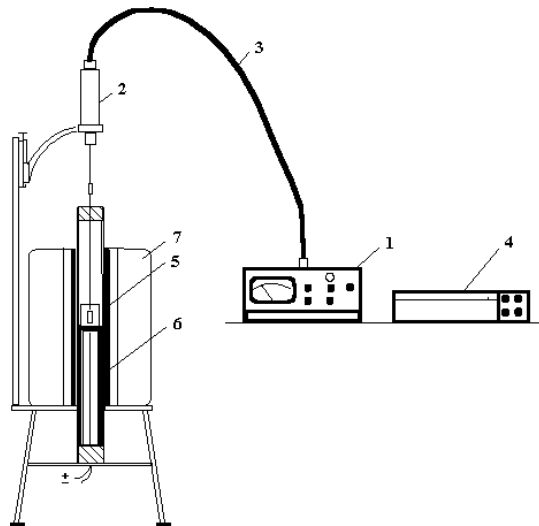
$$\eta = n.d.K$$

kde η - dynamická viskozita taveniny, Pa.s,
 n - výchylka viskozimetra,
 d - rýchlostný stupeň,
 K - konštanta čidla, Pa.s.

Pre výpočet viskozity bolo potrebné poznať veličinu K -konstantu používaného čidla. Táto sa určila zo vzťahu:

$$K = \frac{\eta_G}{n.d}$$

kde η_G - viskozita referenčnej kvapaliny pri danej teplote (v tomto prípade glycerínu), Pa.s,
 n - výchylka ručičky viskozimetra pri rotácii čidla v glyceríne,
 d - rýchlostný stupeň.



Obr.1. Zariadenie na meranie viskozity rotačným viskozimetrom: 1-riadiaci panel, 2-hlavica pre prenos krutového momentu, 3-flexibilná hriadeľ, 4-zapisovač, 5-keľimok s taveninou, 6-podstavec, 7-elektrická odporová pec.

Fig. 1. Equipment for measurement of viscosity by rotary viscosimeter: 1-control panel, 2-gauging head for transmission of torsional movement from platinum cylinder sensing unit, 3-flexible shaft, 4-transistor recorder, 5-crusible with melt, 6-stand, 7-electric resistance furnace.

Nakoľko glycerín bol používaný dlhšiu dobu a keďže patrí medzi veľmi hydroskopické látky, dochádzalo k zmene jeho koncentrácie a tým aj k zmene jeho viskozity, preto kvôli presnosti merania bola jeho viskozita meraná pomocou Hopplerovho viskozimetra. Princíp merania viskozity Hopplerovým viskozimetrom spočíva v meraní doby padania guľičky (v tomto prípade sklenenej) so známou

konštantou. Prítom sa celý sklenený valec naplnený glycerínom s padajúcou guľičkou vyhrieval vo vodnom kúpeli, ktorého teplota bola veľmi presne meraná.

Viskozita glycerínu bola vypočítaná zo vzťahu:

$$\eta_G = \tau.(\rho_1 - \rho_2).K$$

kde η_G - dynamická viskozita glycerínu, cPa.s,
 τ - doba padania guľičky, s,
 ρ_1 - hustota guľičky, $0,8207 \text{ g.cm}^{-2}$,
 ρ_2 - hustota glycerínu pri meranej teplote, g.cm^{-3} .

Hustota glycerínu bola meraná pri jednej teplote pyknometrom a pomocou tabuliek upravená korekčným faktorom pre danú teplotu:

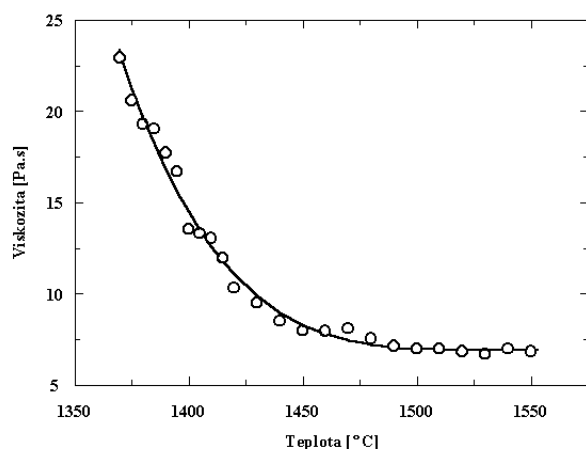
K - konštanta guľičky: $0,5399 \text{ cPa.s.cm}^{-3}.\text{g}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Z nameraných hodnôt teploty a viskozity používaného glycerínu bola zostrojená závislosť, z ktorej sa dala odčítať viskozita glycerínu pri akejkoľvek teplote.

Namerané hodnoty viskozity nefelinického bazanitu z lokality Konrádovce sú pre jednotlivé teploty uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 1 (Kyseľová, 1998) a graficky znázornené na obr. 1.

Tab.1. Výsledky merania viskozity. Tab.1. Results of the viscosity measurement.

t	T	η	$\ln \eta$	$\ln \eta_{st}$
Teplota [°C]	Teplota [K]	Viskozita [Pa.s]		
1550	1823	6,840	4,2254	3,9699
1540	1813	6,980	4,2456	4,0317
1530	1803	6,701	4,2048	4,0943
1520	1793	6,840	4,2254	4,1575
1510	1783	6,980	4,2456	4,2215
1500	1773	6,980	4,2456	4,2861
1490	1763	7,120	4,2654	4,3515
1480	1753	7,538	4,3226	4,4177
1470	1743	8,097	4,3940	4,4846
1460	1733	7,957	4,3767	4,5523
1450	1723	7,975	4,3789	4,6207
1440	1713	8,516	4,4445	4,6900
1430	1703	9,493	4,5531	4,7601
1420	1693	10,330	4,6377	4,8310
1415	1688	11,960	4,7841	4,8667
1410	1683	13,025	4,8694	4,9027
1405	1678	13,285	4,8892	4,9389
1400	1673	13,546	4,9087	4,9753
1395	1668	16,672	5,1163	5,0119
1390	1663	17,714	5,1760	5,0488
1385	1658	19,016	5,2479	5,0859
1380	1653	19,277	5,2615	5,1231
1375	1648	20,579	5,3269	5,1607
1370	1643	22,924	5,4348	5,1984



Obr. 2. Závislosť viskozity od teploty.

Fig. 2. Dependence viscosity vs. Temperature.

Z obr. 2 vyplýva, že viskozita s klesajúcou teplotou stúpa, pričom od teploty asi 1470 °C je vzrat hodnôt viskozity výraznejší. Odklon experimentálnych hodnôt od vypočítanej regresnej závislosti možno pripísať fluktuáciám teploty a miešaniu taveniny počas merania viskozity.

Záver

Z hľadiska fyzikálno chemických vlastností bol v rámci práce LITHO-JET venovaný veľký dôraz na stanovenie viskozity nefelinického bazanitu v roztavenom stave, z pohľadu schopnosti prenikania

taveniny do trhlín v hornine. Z experimentálnych výsledkov vyplýva, že so zvyšovaním teploty sa viskozita pri atmosférickom tlaku znižuje. Meranie prebehlo v teplotnom intervale 1370–1550 °C. Pod teplotou 1370 °C bola vzorka už veľmi viskózna a neumožňovala meranie. Viskozita závisí od teploty, od tlaku a rôznych plynných komponentov.

Meranie viskozity prebiehalo za atmosférických podmienok, čo nie celkom vystihuje proces, ktorý možno očakávať pri aplikácii plameňového injektora v rámci projektu LITHO-JET. Tavenie v podmienkach in situ totiž prebehne pri vysokých tlakoch a za prítomnosti vodných pár. Scarfe vo svojich prácach poukazuje nato, že viskozitu znižuje pravdepodobne prítomnosť vody a iných zložiek, napr. HF, HCl. Z jeho prác vyplýva, že napr. v prípade tholeiitického bazaltu pri rozpustení $4 \pm 0,5$ hmot. % H_2O pri 1150 °C došlo k významnému zníženiu jeho viskozity. Pri olivínickom bazalte však neboli preukázané nejaké merateľné zmeny vo viskozite. V suchých taveninách (bez vody) je viskozita v istej proporcionality k chemickému zloženiu. V súčasnosti sa dosiahli značné pokroky v chápaní vzájomného vzťahu viskozity a zloženia magiem, a to najmä zásluhou prác C. W. Burnhama, Y. A. Bottinga a D. F. Weilla, menovite H. R. Shawa, ktorý rozpracoval metódu výpočtu viskozity mnohokomponentného silikátového roztoku, pričom vychádzal z jej chemického zloženia. Vo všeobecnosti viskozita rastie s obsahom SiO_2 , ale zvyšujú ju aj Al_2O_3 a TiO_2 . Terénne pozorovania poukazujú na to, že kyslé magmatické taveniny sa vyznačujú väčšou viskozitou ako bázičné taveniny (Krist E, 1985).

Goransson pri štúdiu suchých silikátových tavenín pri atmosferickom tlaku zistil viskozitu niektorých hornín a minerálov (tab.2).

Tab.2. Viskozita η v Poissonoch pri atmosferickom tlaku.

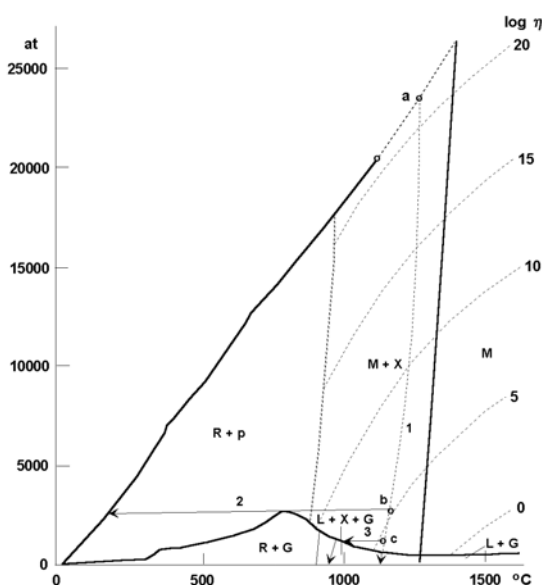
Tab.2. Viscosity η in Poisson units at atmospheric pressure.

Látka	pri 20°C	pri 1150°C	1200°C	1300°C
Glycerín	10 ¹	—	—	—
H ₂ O Voda	10 ⁻¹	—	—	—
KAlSi ₃ O ₈ Ortoklas	—	—	5.10 ⁸	1.10 ⁷
NaAlSi ₃ O ₈ Albit	—	1.10 ⁸	8.10 ⁶	4.10 ⁵
Andezit	—	8.10 ⁴	3.10 ⁴	2.6.10 ²
Olivín	—	9.10 ²	5.10 ²	2.10 ²

Ritman vo svojej práci uvádza, že na základe uvoľnených plynov sa viskozita taveniny podstatne znižuje. Zároveň tvrdí, že vysoká viskozita pyromagmy je podstatne nižšia ako pôvodná odplynená láva pri rovnakej teplote a tlaku. Bolo viackrát pozorované, že vyvrelá pyromagma je veľmi tekutá a jej tečenie je možné porovnávať s viskozitou vody. Pre viskozitu hypomagmy sme odkázali na extrapolácie, ktoré dovoľujú len nie viac ako dohady, ktoré pripúšťajú závery podporené analogickými pokusmi a niektorými geofyzikálnymi údajmi. Úplne všeobecne platí, že viskozita je proporcionálna k logaritmu tlaku a opačne proporcionálna k teplote, čo je vyjadrené v nasledovnom vzťahu:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{ap} e^{\frac{b+cp}{T}}$$

Viskozita pri 1050 °C a tlaku 1 atm môže byť rádovo 10⁵. Na základe izostatických vyrovnávacích pohybov a časového pôsobenia mohli geofyzici vypočítať, že približne v 80 km hĺbke viskozita pri teplote 1300 °C a tlaku 23000 atm je rádovo 10²³. Ďalej môžeme uvažovať, že tepelná závislosť viskozity magmy je analogická ako pri lávach. Pri tomto uvažovaní sa objavujú vo vzorci konštanty: a= 1.10⁻³, b= 45.103, c=0,75. pomocou ktorých je možné vypočítať viskozitu pri všetkých PT podmienkach. Výsledky tohoto prepočtu sa nachádzajú na obr. 1 na čiarkovaných krivkách, ktoré udávajú logaritmus viskozity pri všetkých možných PT podmienkach (Ritmann,1960).



Obr.3. Stavový diagram olivínico-bazaltického materiálu (Ritmann, 1960). M-tavenina, X-drobné kryštalické častice, R-kryštalická hornina, L-láva, G-plyny, p-pneumatické roztoky, h-hydrotermálne roztoky, v-vodná para.

Fig.3. Phase diagram of olivine-basalt material. M-melt, X-small crystallites, R-crystalline rocks, L-lava, G-gases, p-pneumatic solutions, h-hydrothermal solutions, v-steam.

V častiach magmy /M a M+K/, sú uvedené prerušované krivky, ktoré približne zodpovedajú logaritmu viskozity.

Z toho vyplýva, že hlbinná magma je 10 krát viskóznejšia, ako olovo pri izbovej teplote. Pri znížení tlaku (čo môže vzniknúť pri prasknutí abizálnej trhliny) sa skoro okamžite premení na úplne riedku pyromagmu, ktorá následkom zväčšenia objemu a vplyvom trvalého zaťaženia zemskej kôry sa veľmi rýchlo musí vtláčiť do vzniknutej trhliny (Ritmann, 1960).

Meranie viskozity za zmenených podmienok (za zvýšeného tlaku), bude predmetom ďalšieho výskumu.

Literatúra

Krist, E. a Krivý, M.: Petrológia, ALFA/SNTL, Bratislava, 1985.
 Kysel'ová, K.: Zmeny vlastnosti hornín po ich pretavení. Dizertačná práca, Košice, 1998.
 Rybár, P., Kysel'ová, K., Zacharov, M. and Sekula, F.: Changes of the structural and physico-chemical properties of the remolten nefelinic basanite. *Metallurgija*, 37, Zagreb, 1998, 4, 239-244.
 Rittmann, A.: Vulkane und ihre Tätigkeit. Ferdinand Enke, Stuttgart, 1960.
 Sekula, F., Rybár, P., Lazár, T. a kol.: Technológia termického tavenia hornín za účelom hĺbenia štíhlych vertikálnych diel, *Výskumná správa za rok 1997, Košice, február 1998*.