

Magas hőmérséklet műemléki építőkövek anyagtulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata

Hajpál Mónika

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék,
1111-Budapest Műegyetem rkp. 3., hajpal@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Tűzesetek alkalmával műemléképületeink is károsodást szenvednek. Számos történeti épületünk tartalmaz kő részeket, melyek egyes esetekben csak díszítő funkcióval rendelkeznek, máskor azonban teherbíró feladatokat is ellátnak. Az építőkövek bár anyagukat tekintve nem éghetőek, de a tűzesetek alkalmával sérülnek, belső szerkezetükben változások lépnek fel, melyek anyagtulajdonságaikat befolyásolják. Az építőkövek anyagtulajdonságainak változásai az épület teherbírására is hatással lehetnek, így szükség van azok vizsgálatára. A cikk egy, a Magyarországon műemlékeknél leggyakrabban használt kőzettípusok vizsgálatával foglalkozó kutatásba ad betekintést, annak egyes eredményeit mutatja be.

Kulcsszavak: műemlék, tűz, kő, hőhatás, kőzettan, kőzetfizika

1 BEVEZETÉS

A műemlékek építőköveiben a tűzesetek hirtelen és visszafordíthatatlan károsodást okozhatnak, mely súlyosabb esetben akár az épület összeomlásához is vezethet. Ezt elkerülendő szükségessé vált az építési kőzetanyag magas hőmérsékletnél fellépő változásainak vizsgálata. A károsodott műemléki kőanyag restaurálásánál elengedhetetlenül szükséges az alapvető kőzetfizikai jellemzők ismerete. Felismerve a téma fontosságát az utóbbi években szerencsére többféleképpen indultak nemzetközi együttműködések (COST C17 Action, magyar-portugál TÉT, magyar-spanyol TÉT) és kutatások. Először csak a kőzetek makroszkópikus változásaival foglalkoztak (Chakrabarti et al. 1996), melyet a kőzetfizikai jellemzők meghatározása követett (Hajpál 2001, Hajpál 2002, Hajpál és Török 2004, Török és Hajpál 2005), míg aztán egyes vizsgálatok a mikroszkópikus változások egyes kőjellemzőkre (pl. porozitás) gyakorolt hatásának megismerésére irányultak (Hajpál et al. 2006).

2 VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1 Vizsgált kőtípusok

A magyarországi műemlékeknél elsősorban a különböző mészkövek, a homokkövek és a riolit-tufa kedvelt építőkő. A díszítésnél a finom motívumok megformálásánál a könnyű megmunkálhatóság előny, míg a teherbíró szerkezeteknél a kőzet homogenitása, szilárdsága, „keménysége” élvez elsőbbséget. Az építőkövek tűzállóságát, magas hőmérsékletnél bekövetkező változásait természetesen befolyásolják azok ilyen jellegű tulajdonságai.

A vizsgálatokhoz olyan kőzetfajták kerültek kiválasztásra, melyek több történeti épületnél megtalálhatók és alapvetően egymástól különböznek (pl. szövetszerkezet). Ezek a következők:

- o Balatonrendesi homokkő
- o Ezüsthegyi homokkő
- o Süttöi forrásvízi mészkő
- o Sós-kúti durva mészkő
- o Tardosi tömött mészkő
- o Egertihaméri riolittufa

2.2 Hőhatás

A tűz szimulálása az egészen egyszerű modellel kezdődött, az építőkövekből kialakított hengeres próbatestek egy kemencében homogén hőhatásnak lettek kitéve. Az egy órás felfűtést követően az adott hőmérsékletet (150, 300, 450, 600, 750, 900°C) 6 órán keresztül tartva a minták lassan hűltek ki a kemence belsejében. A tardosi tömött és süttöi mészkő minták hevítése során a magasabb hőmérsékleteknél először repedések keletkeztek, majd a próbatestek szétmentek, illetve szétrobbantak. A karbonátok hőbomlásának köszönhetően a hevítést követően nem lehetett minden mintát a vizsgálatoknak alávetni. A forrásvízi mészkő minták átvészelték ugyan a hevítést, de a kemencéből kikerülve a laborhelyiségben pár óra alatt reakcióba léptek a levegő nedvességtartalmával és szétporladtak.

A hevítést követően a mintáknál már szabad szemmel is észlelhető volt a színváltozás, de ennek pontos meghatározására színmérés is történt.

2.3 Vizsgálati módszerek

Az egyes közettípusokból készített minták közettani és közetfizikai vizsgálatoknak lettek alávetve. A belső szerkezet és összetétel változásait megfigyelendő a következő közettani vizsgálatokra került sor: makroszkópos leírás, vékonycsiszolatok polarizációs mikroszkópos elemzése, röntgendiffrakciós vizsgálat, derivatográfus vizsgálat, valamint pásztázó elektronmikroszkópos elemzés.

A közetfizikai vizsgálatok közül az anyagsűrűség, testsűrűség, a porozitás, a víztartalom, a légköri nyomáson történő vízfelvétel, az ultrahang terjedési sebesség és a duroszkóp visszapat-tanás meghatározására került sor. Ezen kívül a hevítés hatására fellépő színváltozás meghatározására színmérés is készült. A szilárdsági vizsgálatok közül egyirányú nyomóvizsgálatra (2:1-es henger) és közvetett húzóvizsgálatra (1:1-es henger) került sor.

3 VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

3.1 Ásvány-, közettani változások

A színváltozás minden közettípusnál megfigyelhető volt. A riolittufára a vörös tartományba való eltolódás volt jellemző (vas oxidációja), míg a forrásvízi és durva mészköveknél sajátos feketés elszíneződés volt látható. A tömött mészkő színe kezdetben sötétebb vörös, bordós színre változott, majd a 600°C-os hevítés felett a minták kifehéredtek (mészégetés).

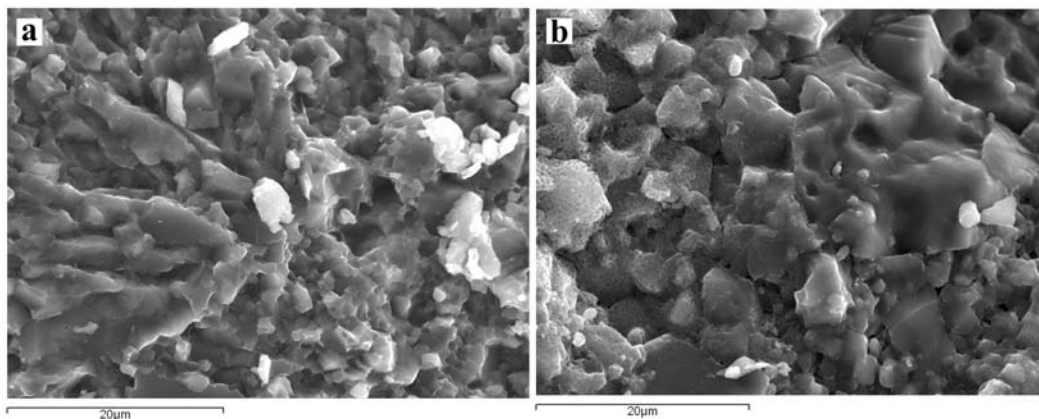
Az 1. ábra a tardosi mészkő pásztázó elektronmikroszkópos felvételeit mutatja. Szobahőmérsékleten a kalcit kristályokat vékony hártaként vonja be a vas-oxid (1.a ábra), de ez a vékony réteg a 750°C-os hevítést követően már lebomlott. A kép bal oldalán (1.b ábra) jól megfigyelhető a mikroyukacs-kákkal tarkított, heterogén, „pontosított” szövet (Hajpál et al. 2006).

A süttöi forrásvízi mészkőre a kalcit kristályok durvasága jellemző, mely a lerakódás gyorsaságára utal (2.a ábra). A 600°C-on hevített mintánál már felfedezhetők a hő hatására fellépő hasadások, a szemcsék belső repedései és kezdeti felületi feloldódásai is (2.b ábra, Hajpál et al. 2006).

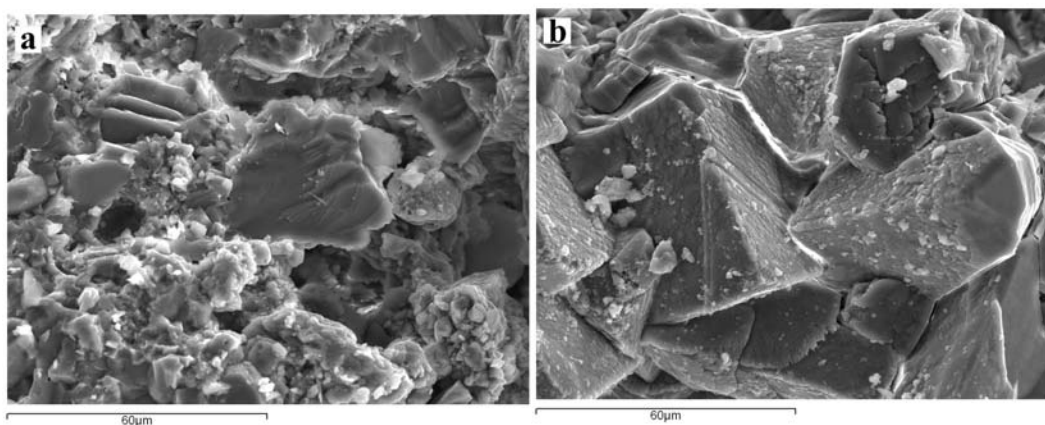
A sós-kúti durva mészkőnél (3.a ábra) a pásztázó elektronmikroszkóp segítségével a hevítés hatására kis repedések voltak felfedezhetők a szemcsék között és azok belsejében (Hajpál et al. 2006). A hevítési hőmérséklet emelésével ezen repedések gyakorisága nőtt (3.b ábra).

Az egertihaméri riolittufánál a kezdetben (4.a ábra) megfigyelhető bentonit pikkelyecskék, melyek vékonyan, filmszerűen vonják be a közettörmelék szemcséket már alig észlelhetők a

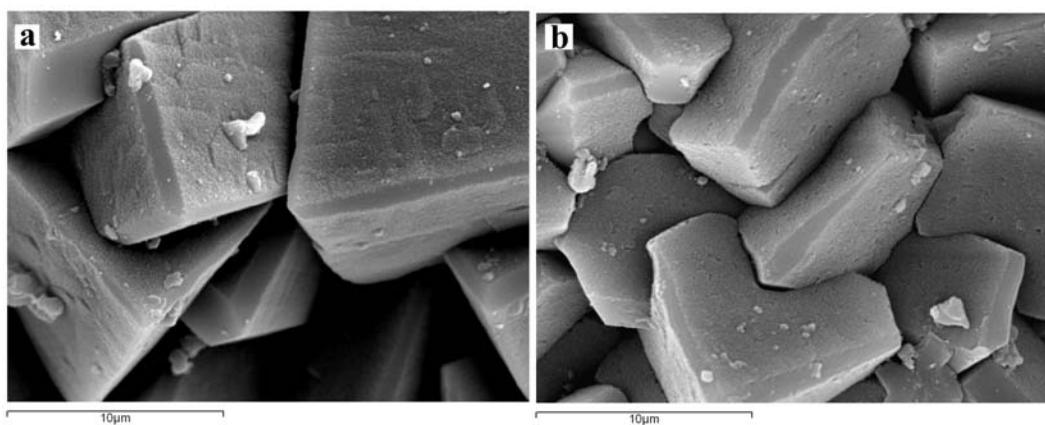
750°C-os hevítési hőmérséklet fölött (4.b ábra). Emellett itt is megfigyelhetők kis szemcseközi és szemcse repedések is.



1. ábra. A tardosi mészkő pászta elektronmikroszkópos felvételei



2. ábra. A süttöi forrásvízi mészkő pászta elektronmikroszkópos felvételei a) szobahőmérsékleten b) 600°C-os hevítést követően

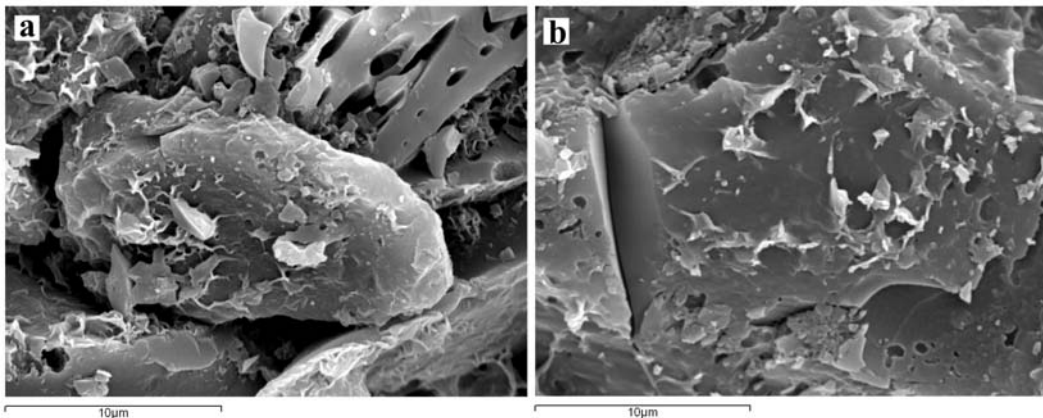


3. ábra. A sósúti durva mészkő pászta elektronmikroszkópos felvételei a) szobahőmérsékleten b) 600°C-os hevítést követően

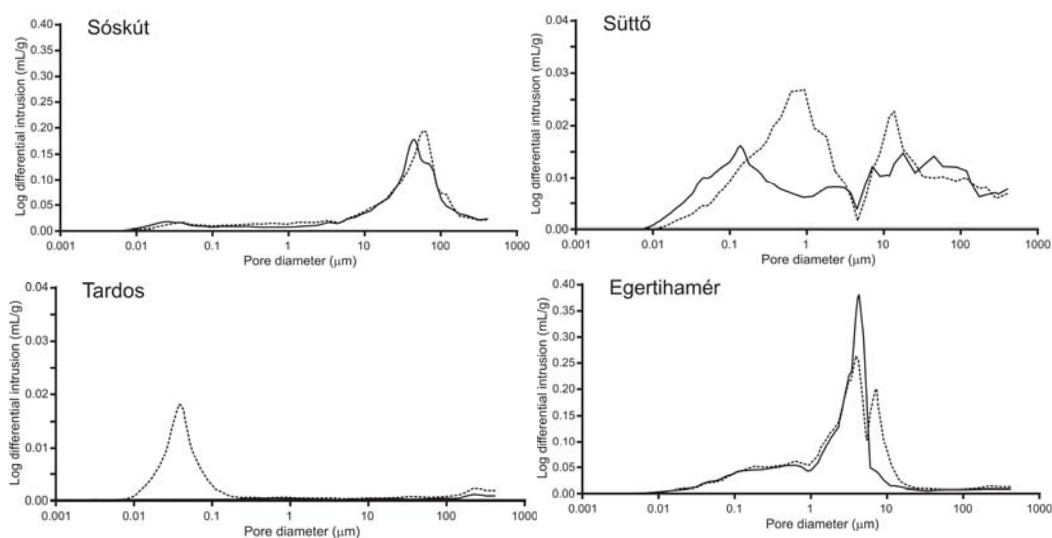
3.2 Porozitás

A vizsgált közettípusoknál a porozitás mérése (higanyos poroziméter - Mercury Intrusion Porosimetry) három hőmérsékletnél történt: szobahőmérséklet, 450°C és maximális hevítési hőmérsékletnél (ez az a hőmérséklet, ahol még a minták nem mennek tönkre, mészköveknél 600°C, riolittufánál 900°C). Az 5. ábrán a folyamatos vonalak a szobahőmérsékleti értékeket

mutatják, míg a szaggatott vonal a maximális hevítési hőmérséklet utáni értékeket jelölik. A mért értékeket az 1. táblázat mutatja.



4. ábra. Az egertihaméri riolittufa pásztázó elektronmikroszkópos felvételei a) szobahőmérsékleten b) 750°C-os hevítést követően



5. ábra. A vizsgált közettípusok póruseloszlása

1. táblázat. A vizsgált közettípusok porozitás értékei

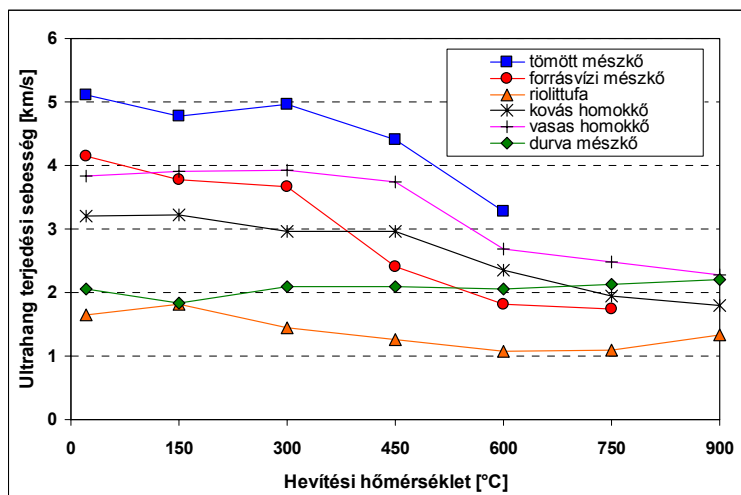
	Tömött mészkő			Forrásvízi mészkő			Durva mészkő			Riolittufa		
	22°C	450°C	600°C	22°C	450°C	600°C	22°C	450°C	600°C	22°C	450°C	600°C
Porozitás [%]	0,20	1,40	2,70	10,10	11,60	12,10	28,90	27,00	30,30	33,40	37,50	35,20
Átl.pórusátmérő [µm]	2,76	0,05	0,04	0,19	0,27	0,38	0,32	0,40	0,49	0,33	0,23	0,35
Látzólagos sűrűség [g/cm ³]	2,70	2,66	2,68	2,65	2,65	2,62	2,68	2,67	2,64	2,36	2,38	2,28
Térfogatsűrűség [g/cm ³]	2,70	2,62	2,61	2,39	2,34	2,31	1,91	1,95	1,84	1,57	1,49	1,47
Teljes mikroporozitás (<5mm) [%]	0,03	0,94	2,32	5,23	6,18	7,27	4,85	5,71	5,88	29,30	31,70	25,70

A porozitás az összes vizsgált kőfajtánál emelkedik a hevítési hőmérsékletet emelkedésével. A porozitásváltozás mértékét befolyásolja a kőzet tömörsége. A kisebb porozitású, tömörebb szerkezetű kőzettípusok, mint a tardosi tömött és süttői forrásvízi mészkövek mutatják a nagyobb porozitásváltozást. A tömött mészkőnél a kezdeti 0,2%-os érték a 600°C-os hevítést követően 2,7%-ra nőtt, a forrásvízi mészkőnél ez a növekedés 20% körüli. Ezzel szemben a sokkal porózusabb kőzetek, mint a durva mészkő és a riolittufa mindössze 5% nagyságú növekedést mutatnak. A porózusabb anyagoknál általában kisebb a porozitás változása, mert itt több a szemcsék közötti tér és a szemcsék hőtágulását ez a rész felveszi (Hajpál et al. 2006). A tömörebb anyagok általában ridegebbek, itt repedések alakulnak ki a szemcsék belsejében és a szemcsehatároknál. Itt megemlíthetjük a homokköveket, ahol a több és finomabb kötőanyaggal rendelkező agyagos típusok jobban viselik a tüzeseteknél fellépő magasabb hőmérsékletet, míg a kötőanyagban szegény, durvább szemű típusok a belső szerkezetben kialakuló repedések következtében érzékenyebben reagál a hőhatásra (Hajpál 2001, Hajpál 2002, Hajpál és Török 2004, Török és Hajpál 2005).

Az átlagos pórusátmérő lényegesen a tardosi tömött mészkőnél változik, ahol is a hevítési hőmérséklet emelésével jelentősen lecsökken. A többi három vizsgált kőzettípusnál nem csökken, sőt inkább egy kicsit emelkedik ez az érték (1. táblázat). A tömött mészkőnél megfigyelhető csökkenés a már a pásztázó elektronmikroszkópos felvételeknél látható vas-oxid film tönkremenetelével magyarázható (Hajpál et al. 2006).

3.3 Ultrahang terjedési sebesség

E vizsgálattal a kőzet belsejében bekövetkező szerkezeti változásokra (pl. repedések keletkezésére) következtethetünk. Az ultrahang terjedési sebesség értékei a ridegebb, tömöttebb szövetű mészkőtípusoknál (tardosi tömött és süttői forrásvízi mészkő) már a 300°C-os hevítési hőmérséklet fölött jelentősen csökkenni kezdenek, ami a belső repedések kialakulására utal. Ezzel szemben a riolittufa és a durva mészkő nem mutat ilyen szembetűnő változást (6. ábra). A homokköveknél csak a 450°C-os hőmérséklet fölött következik be csökkenés.



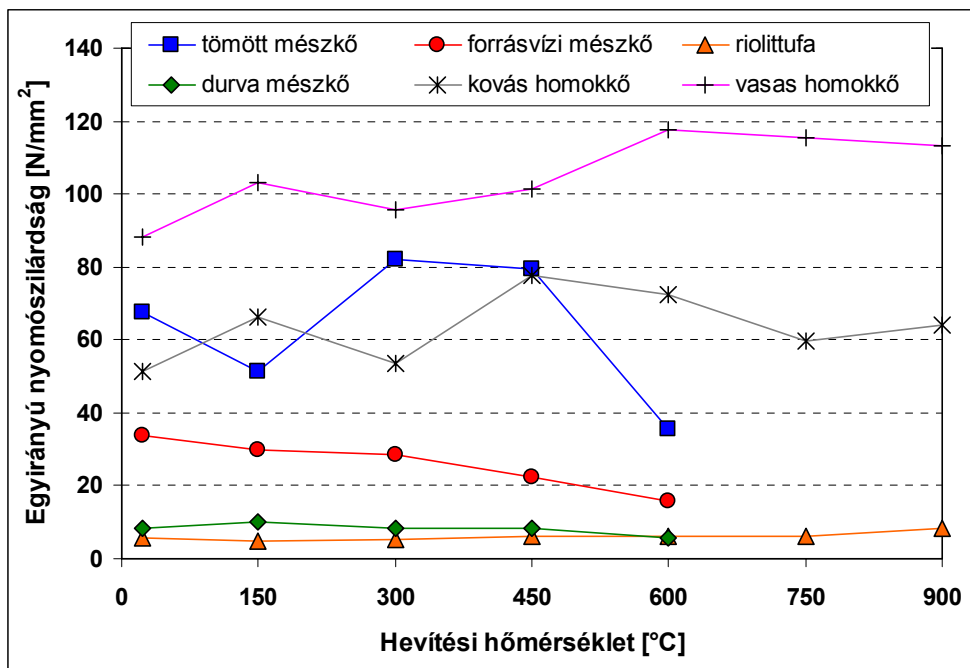
6. ábra. A vizsgált kőzettípusok ultrahang terjedési sebesség értékei a hevítési hőmérséklet függvényében

3.4 Szilárdsági vizsgálatok

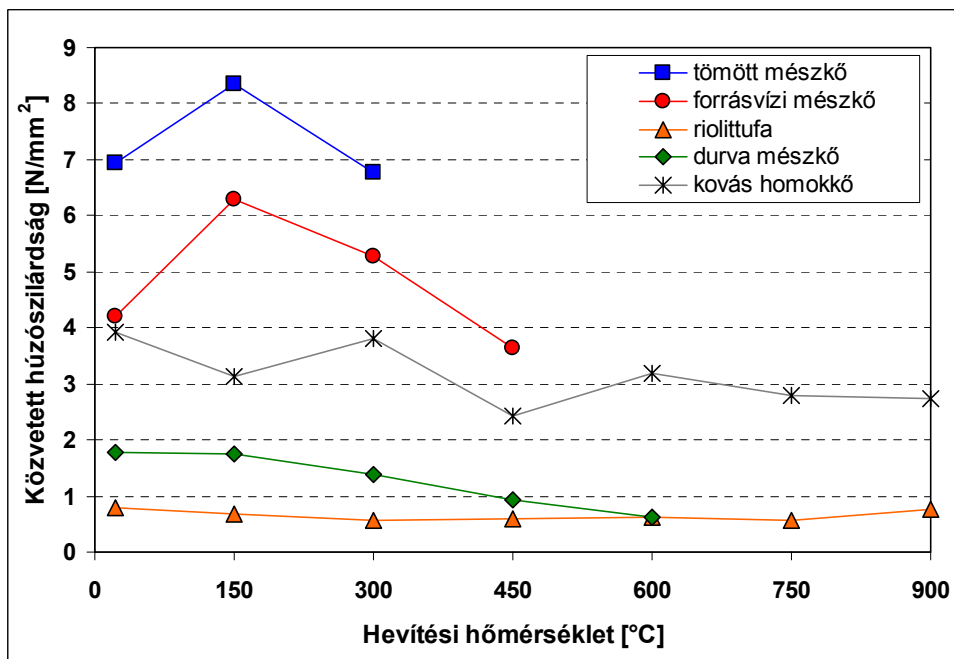
A hevítési hőmérséklet emelésével megváltozik a kőzetek szilárdsága is. Ennek oka a kőzetalkotó ásványokban és a kőzet belső szerkezetében bekövetkező változásokban keresendő. A keletkező repedések szilárdságcsökkenést okozhatnak és a próbatest tönkremeneteléhez vezetnek. A tömött és forrásvízi mészkőveknél megfigyelhető a 450°C-os hevítési hőmérséklet felett a rohamos szilárdságcsökkenés (7. ábra). Ezzel szemben a durva mészkőnél csekély a csökkenés, a riolittufánál még szilárdságnövekedésről is beszélhetünk. A vasas homokkőnél egyértelmű szilárdságcsökkenésről is beszélhetünk.

lárdságnövekedés figyelhető meg, melynek oka a kőzet szövetszerkezetében és ásványos összetételében keresendő (Hajpál 2001, Hajpál 2002).

A közvetett húzószilárdságnál még extrémebb helyzetről beszélhetünk, mivel a tömött és forrásvízi mészkő szilárdsága már a 300C-os hevítési hőmérsékletnél rohamosan lecsökken és előlött már nem, vagy alig mérhető. A durva mészkőnél folyamatos, de lassú szilárdságsökkenésről beszélhetünk. Egyedül a riolittufa az, ahol a szilárdságértékek szinte nem változnak a hevítési hőmérséklet emelésével (8. ábra). A kovás homokkőnél is csak enyhe szilárdságsökkenés látszik (Hajpál 2001, Hajpál 2002).



7. ábra. A vizsgált kőzettípusok egyirányú nyomószilárdság értékei a hevítési hőmérséklet függvényében



8. ábra. A vizsgált kőzettípusok közvetett húzószilárdság értékei a hevítési hőmérséklet függvényében

4 KÖVETKEZTETÉSEK

Makroszkópikus változások minden közettípusnál megfigyelhetők voltak hőhatásnál. A legszembetűnőbb a színváltozás, melynél beszélhetünk „vörösödésről” (vas-oxid tartalom függvényében) vagy feketedésről (szervesanyag tartalom következtében) egyaránt. Az elszíneződés mértéke összefügghet a hevítési hőmérséklettel is, de nem határozható meg a színváltozásból egyértelműen a hőhatás mértéke.

A különböző típusú kőzetek hőhatásnál eltérően viselkedhetnek. A mészkövek egyes fajtái igen érzékenyen reagálnak, míg a riolittufa kevésbé hajlamos radikális viselkedésre. A homokköveknél főleg a kötőanyag milyensége határozza meg a kőzet magatartását. Megállapítható, hogy az ásványos összetétel, a szövetszerkezet egyaránt befolyásolja, hogy egy kőzet hogyan reagál hőhatásnál. A mészkövek és azok közül is a tömör, rideg szerkezetűek a legsérülékenyebbek, a porózusabb típusok rugalmasabban viselkednek. A tűz, hőhatás szempontjából előnyösebb, ha a kőzetben a szemcsék között kötőanyag, mátrix van, mert a szoros szemcse-szemcse kontaktusnál hamarabb keletkeznek repedések mind a szemcsehatároknál, mind a szemcsék belsejében, amelyek a kőzetet gyengítetik és szilárdságát csökkenthetik.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti az OTKA Posztdoktori Ösztöndíjat (D 45932) a kutatás támogatásáért.

IRODALOMJEGYZÉK

- Chakrabarti B., Yates T., Lewry A. 1996. Effect of fire damage on natural stonework in buildings. *Construction and Building Materials*, **10**(7), 539-544
- Gomez-Heras M., Alvarez de Buego M., Fort, R., Hajpál, M., Török Á., Varas M.J. 2006. Evolution of porosity in Hungarian building stones after simulated burning. In: Fort, R., Alvarez de Buego M., Gomez-Heras M. & Vazquez-Calvo C. (szerk.): *Heritage Weathering and Conservation*, Taylor & Francis/Balkema, London. Vol. I, 513-519.
- Hajpál M. 2001. *Égetés hatására fellépő változások vizsgálata homokköveknél*. Ph.D. értekezés 136p.
- Hajpál M. 2002. Changes in Sandstones of Historical Monuments Exposed to Fire or High Temperature. *Fire Technology* **38** (4) 373-382
- Hajpál M., Török Á. 2004. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. *Environmental Geology* **46** 311-322
- Török Á., Hajpál M. 2005. Effect of temperature changes on the mineralogy and physical properties of sandstones. A laboratory study. *Restoration of Buildings and Monuments* **11** (4) 211-218

