

VPLIV PROCESA POLIRANJA NA RAZVOJ POVRŠINE IN KARAKTERIZACIJA POLIRANEGA MARMORJA

THE EFFECT OF POLISHING PHASES ON THE SURFACE EVOLUTION AND CHARACTERISTICS OF POLISHED MARBLE STONE

Tinkara Kopar¹, Vilma Ducman¹, Ana Mladenovič¹, Marijan Frlic²,
Enrique Sanchez³

¹ Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

² Marmor Hotavlje, d. d., Hotavlje 40, 4224 Gorenja vas, Slovenija

³ Instituto de Tecnología Cerámica, Campus Universitario Riu Sec, 12006 Castellón, Spain
tinkara.kopar@zag.si

Prejem rokopisa – received: 2004-11-25; sprejem za objavo – accepted for publication: 2005-01-19

Poliran marmor je široko uporaben kot dekorativna stenska in talna obloga. Ena od najbolj zaželenih lastnosti poliranega marmorja je sijaj. Da dobi naravni kamen svoj končni sijaj, je v industriji izpostavljen zaporedju različnih faz poliranja. Prva faza je brušenje z grobim abrazivom, s katero izravnamo površino kamna. V naslednjih fazah poliranja površino gladimo, dokler marmor ne dobi svoj končni sijaj.

V prispevku je predstavljen tipičen industrijski proces poliranja marmorja. Da bi optimizirali proces, smo študirali mehanizem odstranjevanja materiala pri poliranju, določili sijaj površine, hrapavost, strukturo površine in spremembe mikrostrukture. Po vsaki fazi poliranja smo odvzeli vzorce marmorjev sivec in volakas ter jih karakterizirali z različnimi metodami kot so: meritve sijaja pri različnih kotih, meritve hrapavosti in pregled mikrostrukture z elektronskim mikroskopom LV-SEM. Meritev sijaja je za doseg estetskega učinka merodajnejša od meritve hrapavosti, ker naravni defekti v kamnu vplivajo na rezultat. Vseeno pa se je izkazalo, da je kombinacija izbranih metod dober način za študij in optimiziranje procesa poliranja v industriji naravnega kamna.

Ključne besede: marmor, brušenje, poliranje, hrapavost, sijaj

Polished marble stone is widely used in the decoration of walls and floors for public buildings. One of the most desired qualities of such stone is a high surface gloss. In the industrial polishing process there are several successive operations in order to gain the final gloss. A first-stage grinding tool with a coarse abrasive is used to level the stone surface; the next stages involve grinding tools with progressively decreasing grain-size abrasives to produce the desired gloss.

In this paper a typical marble-stone industrial polishing process was studied. In order to optimize the polishing process to achieve the highest surface gloss, the effects of abrasive size on the material-removal mechanism, surface gloss, surface texture, changes of microtexture, surface topography and roughness were analyzed. After each polishing stage, samples were taken to characterise the surface properties of the volakas and sivec marbles using different methods: gloss measurements at different angles, roughness measurements and LV-SEM analyses. Results show that the naturally occurring defects on the stone surface even after polishing can make the roughness analysis unreliable to some extent, and that gloss measurements are more reliable when characterizing the marble surface. Nevertheless, the selected test methods proved to be a good combination for investigating and optimising the polishing process.

Key words: marble, grinding, polishing, roughness, gloss

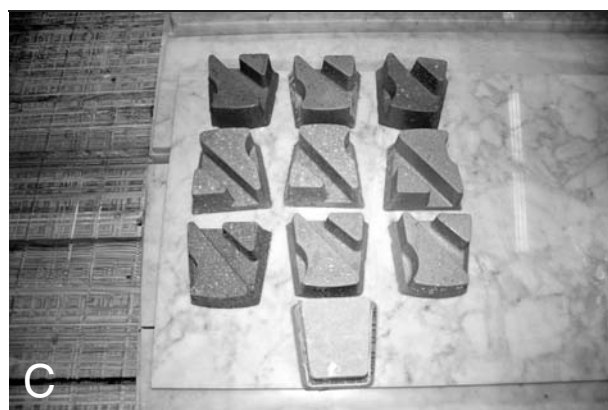
1 UVOD

Marmor je bela metamorfna kamnina, ki je posledica transformacije apnenca ali dolomita pod ekstremnimi pritiski. Glavni mineraloški komponenti sta kalcit in dolomit, lahko pa se pojavljajo tudi različne mineralne primesi, pogosto v obliki žil in pasov, ki kamnino nekoliko tonirajo oziroma povzročijo specifičen marmoriran videz. Marmorji so v primerjavi z graniti mehkejši in manj trdni. Trdota po Mohsu je med 3 in 4, upogibna trdnost pa med 10 MPa in 15 MPa. Gostota marmorjev se giblje med 2,7 g/cm³ in 2,8 g/cm³. Povprečen termični raztezek v temperaturnem območju 20-100 °C, je 5 · 10⁻⁶ /K.

Poliran marmor je široko uporaben kot dekorativna stenska in talna obloga javnih objektov. Ker je sijajna površina ena od njegovih najbolj zaželenih lastnosti, je

marmor v industrijskem procesu izpostavljen različnim fazam obdelave. Brušenje in poliranje je najpomembnejši proces v industriji naravnega kamna, zato mora biti obvladovan in izveden v optimalnih razmerah¹. To zahteva dobro poznanje materiala, postopka obdelave ter procesov na stiku polirnega orodja in površine kamna. Namen prispevka je ugotoviti vpliv industrijskega procesa poliranja na razvoj površine marmorja; izbrali smo marmorja sivec in volakas.

V prispevku je predstavljen tipičen industrijski proces poliranja marmorja, kjer po predhodnem žaganju površino obdelamo z zaporednimi fazami poliranja (slika 1a). V prvih fazah uporabljamo bruse z večjimi delci abrazivnega materiala, da površino zgladimo, v naslednjih fazah pa velikost delcev abraziva postopno zmanjšujemo, da dosežemo končni sijaj. Zaporedje brusnih glav je prikazano na sliki 1b. V predstavljenem



Slika 1: Industrijski proces poliranja; A) polirni stroj, B) zaporedje polirnih glav, C) brusilni abrazivni sredstvo SiC v polimerni matrici

Figure 1: Industrial polishing process :A) polishing machine, B) polishing heads, C) abrasives: SiC in polymer matrix

procesu poliranja je uporabljen abrazivni material SiC v polimerni matrici brusila (slika 1c).

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Osnovne lastnosti izbranih marmorjev sivcev in volakas smo določili z naslednjimi metodami:

- Petrografska analiza po metodi SIST EN 923-3
- Mineraloška analiza z metodo rentgenske difrakcije (z aparaturom Philips – Norelco, CuK in Ni-filiter).
- Mehanske lastnosti: določitev vpijanjanja vode po metodi SIST EN ISO 10545-3, določitev zlomne sile in

upogibne trdnosti po metodi SIST EN ISO 10545-4, določitev globinske obrabe po SIST EN ISO 10545-6 in površinske obrabe po SIST EN ISO 10545-7.*

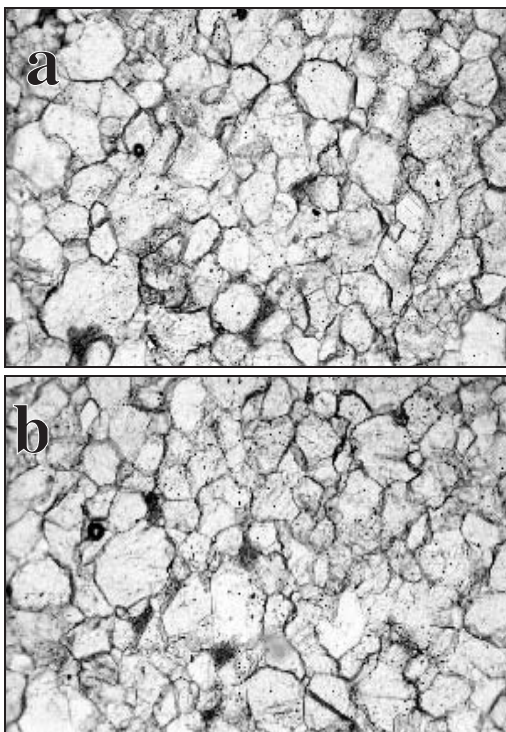
* Vzorce marmorjev sivcev in volakas smo vrednotili po metodah za keramične ploščice zaradi lažje primerjave procesov poliranja kamna in keramičnih ploščic (tema projekta "Polishcoverings").

V industrijskem procesu poliranja je marmor izpostavljen zaporedju različnih faz poliranja. Po vsaki fazi smo odvzeli vzorce, ki smo jih karakterizirali z različnimi metodami:

- Meritve sijaja smo izvedli po metodi ISO 2813/1994 pri treh različnih kotih 85°, 60°, 20°.
- Meritve hrapavosti smo izvedli z aparaturom Hommel Tester -T1000 C po metodi DIN 4768, DIN 4776. Topografijo smo določili na vzorcih iz druge polovice procesa poliranja (faze od 6 do 10). Določili smo jo iz 10 meritev na vsakem vzorcu, na površini s ploščino 16 mm × 16 mm.
- Strukturo površine in spremembe mikrostrukture smo opazovali z vrstičnim elektronskim mikroskopom JEOL 5500 LV z EDS z detektorjem odbitih elektronov BSE; uporabljena povečava je bila 50-kratna.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Marmor sivcev je bela metamorfna kamnina s posameznimi svetlosivimi vključki in pasovi. Na pogled je sveža, gosta in trdna, brez razpok in makroskopsko vidne poroznosti. V sestavi prevladujejo zrna rekristaliziranega dolomita, velika do največ 1 mm, povprečno 0,5 mm. Kot primes se pojavljajo zrna kalcita, velika do 0,7 mm. Ta zrna so neenakomerno razpršena v dolomitni osnovi oziroma se v posameznih delih kamnine združujejo v tanke žilice. Struktura je granoblastična. Kamnina ima rahlo izraženo plastovito teksturo, ki jo karakterizira usmerjena kristalizacija in rast mineralnih zrn. Akcesorna minerala sta fluorit in kremen. Ocenjena kvantitativna mineralna sestava v prostorninskih deležih je naslednja: dolomit 93 %, kalcit 6,5 %, fluorit in kremen 0,5 %. Mikrosnetek marmorja sivcev v presevani polarizirani svetlobi je na sliki 2a. Marmor volakas je drobno do srednjezrnata metamorfna kamnina, v osnovi bele barve, s posameznimi svetlorjavimi pasovi in žilami. Na pogled je sveža, gosta in trdna, brez razpok in makroskopsko vidne poroznosti. V mineraloški sestavi prevladujejo zrna rekristaliziranega dolomita, v manjši količini je prisoten tudi kalcit, posamezna zrna kremenca in kot akcesorna minerala sericit in apatit. Povprečna velikost zrn je 0,5 mm. Velikost in oblika mineralnih zrn je homogena. Struktura kamnine je granoblastična. Tekstura je zaradi usmerjene rasti mineralnih zrn plastovita. Ocenjena kvantitativna mineralna sestava v prostorninskih deležih je naslednja: dolomit 90 %, kalcit 7 %, sericit, apatit, in kremen 3 %. Mikrosnetek marmorja volakas



Slika 2: Mikrosnetki marmorjev sivec (a) in volakas (b) v presewni polarizacijski svetlobi, povečava 80-kratna
 Figure 2: Micrograph of marbles Sivec (a) and Volakas (b) under polarising light, magnification 80x

v presewni polarizirani svetlobi je na **sliki 2b**. Mineraloška sestava je bila potrjena tudi z metodo rentgenske difrakcije. Rezultati so predstavljeni na **slikah 3a in 3b**.

V **tabeli 1** so predstavljene mehanske lastnosti izbranih marmorjev. Iz osnovnih fizikalnih lastnosti je razvidno, da je marmor sivec kompaktnjši in trdnjši, saj dosega višje upogibne trdnosti, je manj vpojen ter bolj odporen proti obrabi.

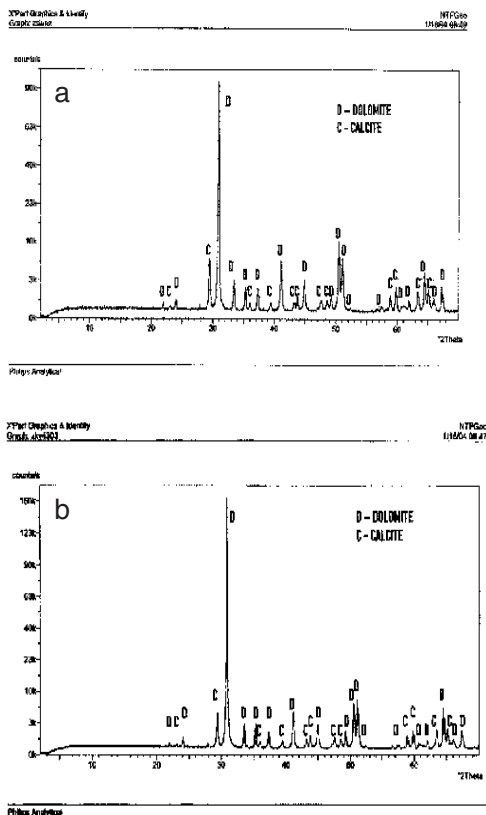
Tabela 1: Fizikalne lastnosti izbranih marmorjev sivec in volakas
 Table 1: Physical properties of selected marble stones Sivec and Volakas

Lastnost	Sivec	Volakas
Vpijanjanje vode pod vakuumom, W/%	0,16	0,42
Določitev upogibne trdnosti, F/MPa	11,7	7,0
Določitev globinske obrabe, V _g /mm ³	500	540
Določitev površinske obrab, S _p /(mg/mm ²)	0,14	0,20

Izbrana marmorja sivec in solakas sta bila izpostavljena industrijskemu procesu poliranja. Po vsaki fazi poliranja smo odvzeli vzorce, določili sijaj površine, hrapavost, strukturo površine in ugotavljali spremembe mikrostrukture.

Vrednosti parametra hrapavosti Ra in vrednosti sijaja za oba izbrana marmorja so predstavljene v **diagramu 1**.

Kot je bilo že predhodno ugotovljeno za poliran granit^{2,3}, so rezultati meritev hrapavosti do določene mere nezanesljivi, kar je posledica naravnih defektov materiala, ki so se razvili pri geološkem nastanku. Parameter Ra, ki pomeni razmerje med celotno površino reliefa na merilni poti ter dolžino merilne poti, se je pokazal kot primeren za opis povprečne hrapavosti posameznih faz poliranja. Parameter Ra se med izbranimi marmorjema v začetnih fazah poliranja precej razlikuje. Do faze 320 grit so vrednosti Ra za marmor sivec precej nižje in so med 1,1 μm in 0,75 μm, za marmor volakas pa med 2,5 μm in 1 μm. Ta razlika se močno zmanjša v drugi polovici procesa poliranja, ko za marmor sivec dosežemo vrednosti Ra od 0,75 μm do 0,5 μm in za volakas od 1 μm do 0,5 μm.



Slika 3: Rentgenska difrakcija marmorjev sivec (a) in volakas (b)
 Figure 3: X-ray diffractometry of marbles Sivec (a) and Volakas (b)

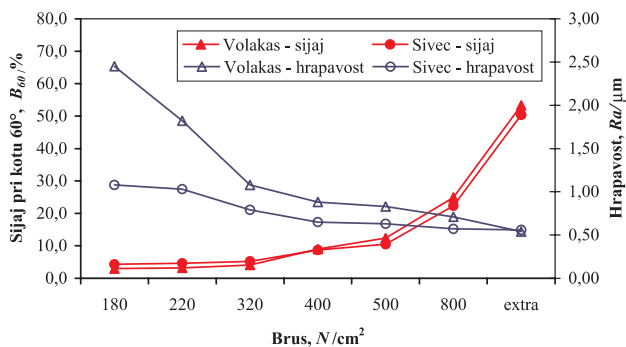


Diagram 1: Rezultati meritev sijaja in hrapavosti v odvisnosti od faze poliranja za marmor sivec in marmor volakas
 Graph 1: Gloss and roughness measurement results versus polishing phase for marbles Sivec and Volakas

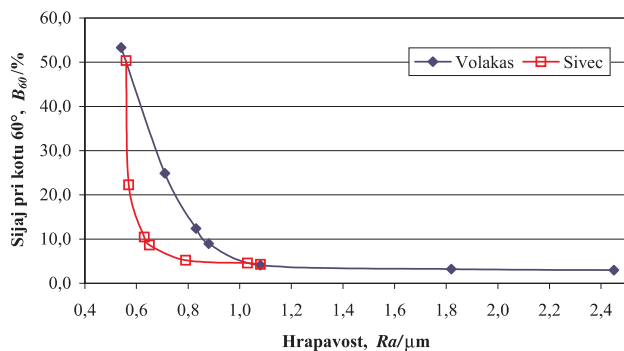


Diagram 2: Medsebojna odvisnost meritev sijaja in hrapavosti med procesom poliranja za marmorja sivec in volakas

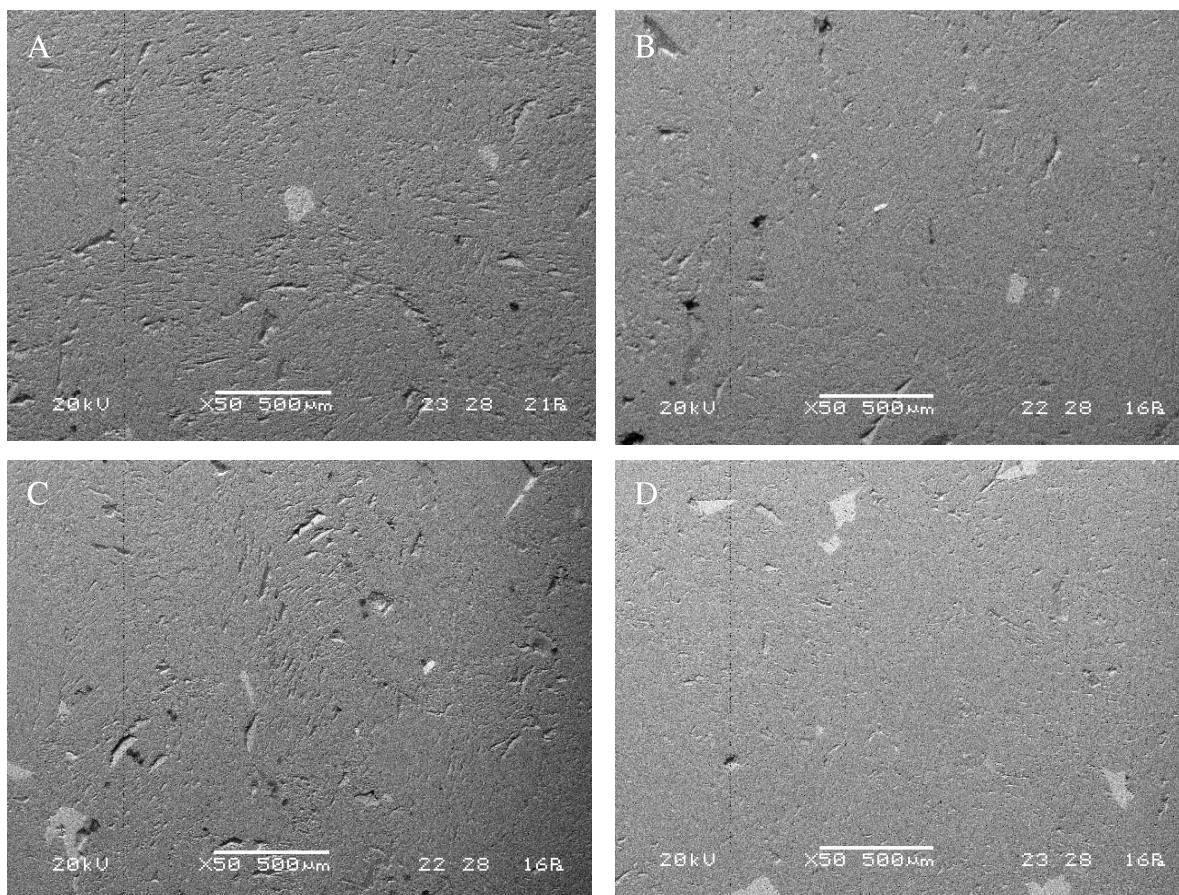
Graph 2: Gloss readings versus roughness during polishing proces for marbles Sivec and Volakas

Sijaj površine je delež odbite svetlobe od vzorca, ki ga osvetljujemo pri različnih kotih (85° , 60° , 20°) v primerjavi z odbito svetlobo od referenčne (črne, polirane) površine pri enakih pogojih. V primeru marmorja, so se rezultati, dobljeni pri kotu osvetljevanja 60° , izkazali za najprimernejše. Vrednosti meritev sijaja za oba marmorja so skoraj identične v vseh fazah procesa

poliranja. V začetnih fazah poliranja so vrednosti sijaja nizke, in v fazi 320 grit dosežejo vrednost 5 %, potem pa se začnejo močno večati in in v zadnji fazi poliranja dosežejo vrednost 55 %.

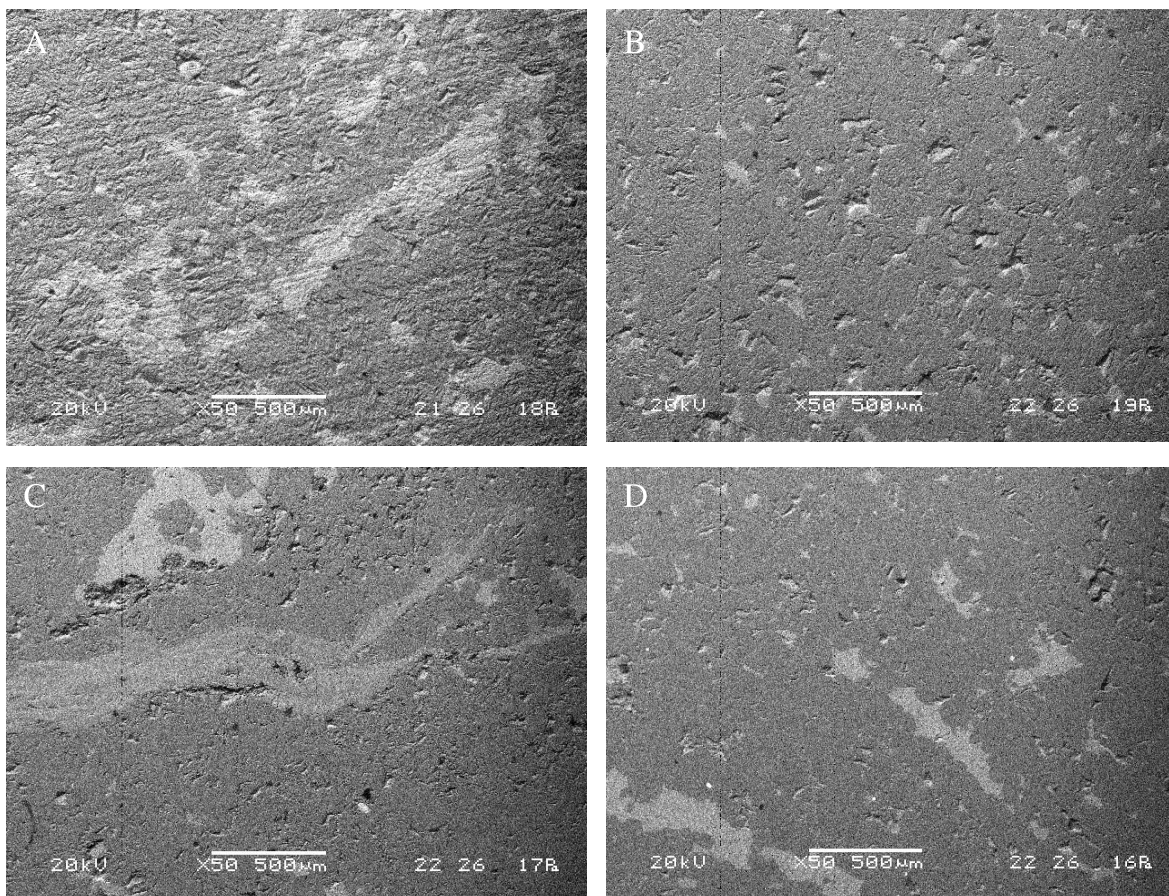
Diagram 2 prikazuje medsebojno odvisnost sijaja površine in parametra hrapavosti Ra za marmorja sivec in volakas. Opazili smo, da sijaj in hrapavost površine povezuje eksponentna krivulja. Čeprav se krivulji ne skladata popolnoma, lahko opazimo, da se nad vrednostjo parametra hrapavosti $0,9 \mu\text{m}$ v nobenem primeru sijaj površine ne spreminja več. V nasprotnem primeru že majhne spremembe hrapavosti pod $0,75 \mu\text{m}$ pomenijo velik skok v sijaju površine. Podobne ugotovitve o kritični vrednosti hrapavosti oz. kritični fazi poliranja so že predhodno opazili pri poliranju granita² in porcelanskih ploščic⁴.

Površine poliranih vzorcev smo opazovali tudi z grobovakuumskim vrstičnim elektronskim mikroskopom. Razlike v sestavi med marmorjema sivec in volakas in različne topografije površin, vzetih iz več faz poliranja, so predstavljene na **slikah 4 a-d** za marmor sivec in **5 a-d** za marmor volakas. Posnetki marmorja sivec v različnih fazah poliranja kažejo, da se topografija med



Slika 4: SEM posnetki marmorja sivec pri 50-kratni povečavi; A) Sivec – faza 4 (180), B) Sivec – faza 6 (320), C) Sivec – faza 8 (500), D) Sivec – faza 10 (extra)

Figure 4: SEM images of marble Sivec, magnification 50x; A) Sivec – phase 4 (180), B) Sivec – phase 6 (320), C) Sivec – phase 8 (500), D) Sivec – phase 10 (extra)



Slika 5: SEM posnetki marmorja volakas pri 50-kratni povečavi; A) Volakas – faza 4 (180), B) Volakas – faza 6 (320), C) Volakas – faza 8 (500), D) Volakas – faza 10 (extra)

Figure 5: SEM images of marble Volakas, magnification 50x; A) Volakas – phase 4 (180), B) Volakas – phase 6 (320), C) Volakas – phase 8 (500), D) Volakas – phase 10 (extra)

procesom bistveno ne spreminja. Že v začetnih fazah poliranja površina postane dobro zglajena. Posnetki marmorja volakas pa kažejo na velike topografske razlike med začetnimi in končnimi fazami poliranja. Največje spremembe so vidne do faze 320 grit. Nad fazo 500 grit površina doseže že konstantno hrapavost, topografija se bistveno ne spremeni.

4 SKLEPI

Končni sijaj polirane površine marmorjev sivec in volakas je rezultat mehanskega procesa poliranja z zaporedjem brusov od grobe do najfinejše sestave abrazivnega materiala.

Ugotovili smo, da so rezultati meritev hrapavosti površine zaradi naravne strukture kamna z prisotnimi defekti do določene mere nezanesljivi, le parameter Ra se je izkazal kot primeren za ovrednotenje hrapavosti.

Med rezultati meritev sijaja in vrednostmi parametra hrapavosti Ra obstaja eksponentna soodvisnost spreminjanja omenjenih lastnosti. Hrapavost površine marmorja se zmanjšuje do določene vrednosti Ra , nato se vrednosti hrapavosti ne spreminjajo več bistveno, vrednosti sijaja

pa začnejo takrat močno naraščati. Ugotovitve potrjujejo tudi posnetki z vrstičnim elektronskim mikroskopom SEM-LV.

Dobljeni rezultati nakazujejo, da je meritev hrapavosti merodajna v prvih fazah poliranja, medtem ko je v zadnjih fazah merodajnejše spremljanje sijaja površine v kombinaciji z elektronskim mikroskopom SEM. Čeprav razlike v sijaju površine med obema izbranimi marmorjema niso velike, posnetki z elektronskim mikroskopom razkrijejo mikrostrukturne razlike, ki jih lahko delno pripišemo posledicam trganja mineralnih zrn pri postopku poliranja, delno pa ostankom genetskih značilnosti kamna. Prav prepoznavanje teh mikrorazlik končno obdelane površine različnih marmorjev nam lahko rabi pri modificiranju industrijskega procesa poliranja.

Kombinacija izbranih metod je dober način za študij in optimiziranje procesa poliranja v industriji naravnega kamna.

Zahvala

Raziskovalno delo je bilo opravljeno v sklopu Evropskega projekta **POLISHCOVERINGS – Devel-**

opment of an efficient and environmentally friendly polishing process for floor and wall coverings (Številka projekta: CRAFT-1999-70904, Številka pogodbe: GIST-CT-2002-50190)

5 LITERATURA

- ¹ X. P. Xu, H. Huang, Y. Li, Material removal mechanisms in the diamond grinding of granite, Part 1: The morphological changes of granite from sawing to grinding, *Key Engineering Materials*, 250 (2003), 215–221
- ² H. Huang, X. P. Xu, Material removal mechanisms in the diamond grinding of granite, Part 2: Formation of gloss on granite surface, *Key Engineering Materials*, 250 (2003), 222–227
- ³ H. Huang, X. P. Xu, Material removal mechanisms in the diamond grinding of granite, Part 3: Factors influencing the formation of surface gloss, *Key Engineering Materials*, 250 (2003), 228–232
- ⁴ E. Sanchez, J. Garcia-Ten, M. J. Ibanez, M. J. Orts, V. Cantavella, J. Sanchez, C. Soler, Polishing porcelain tile, Part 1: Wear mechanism, *American Ceramic Society Bulletin*, 81 (2002), 9, 50–54
- ⁵ E. Sanchez, J. Garcia-Ten, M. J. Ibanez, M. J. Orts, V. Cantavella, J. Portoles, J. Sales, Polishing porcelain tile, Part 2: Influence of microstructure and microhardness, *American Ceramic Society Bulletin*, 81 (2002), 12, 57–61
- ⁶ I. M. Hutchings, K. Adachi, Y. Xu, E. Sanchez, M. J. Ibanez, Laboratory simulation of the industrial ceramic tile polishing process, *Qualicer 2004 – Proceedings*, vol. I, P.GI-19 – P.GI-30