

KARAKTERIZACIJA DOTRAJANE MINERALNE VOLNE IZ BAZALTNIH VLAKEN

CHARACTERIZATION OF DEGRADED MINERAL WOOL FROM BASAL FIBERS

izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si

asist. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

gregor.kravanja@um.si

izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si

Univerza v Mariboru,

Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 677.522

Povzetek | Vpliv kemičnega staranja zaradi visoke vlažnosti in prisotnosti vode, ki so mu izpostavljena bazaltna vlakna kamene volne, smo proučevali z uporabo vrstične elektronske mikroskopije (SEM) in energijsko disperzivne spektrometrije ter površinske kemične mikroanalize (EDS in XRM). Rezultati teh raziskav potrjujejo, da vpliv visoke vlažnosti okolice ter povišane temperature lahko povzročijo kemične spremembe, ki zelo spremenijo morfologijo površine bazaltnih vlaken, kar posledično pomeni tudi slabše mehanske lastnosti.

Ključne besede: bazaltna vlakna, mineralna volna, degradacija, vrstična elektronska mikroskopija (SEM), energijsko disperzivna spektrometrija (EDS), površinsko kemična mikroanaliza (XRM)

Summary | The impact of chemical aging in high humidity and water, to which basalt glass fibers of stone wool are exposed, has been studied using scanning electron microscopy (SEM) and electron dispersive spectrometry (EDS), as well as X-ray mapping (XRM). The results show that the interaction between the fibers and the surrounding media (high humidity and temperature) leads to chemical changes strongly affecting the surface morphology. This is the reason for the deterioration of mechanical properties.

Key words: basalt fibers, mineral wool, degradation, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray mapping (XRM)

1 • UVOD

Za zagotavljanje boljše energetske učinkovitosti se v zadnjih desetletjih pogosto v obodne konstrukcijske zgradbe vgrajujejo polistiren (EPS), ekstrudirani polistiren (XPS) in mineralna volna iz bazaltnih vlaken (Ivanič, 2020). Slednjo uvrščamo med vlaknaste kompozitne materiale, saj jo sestavljata utrjevalna faza (vlakna) in povezovalna faza (vezivo). Bazaltna vlakna se proizvajajo s postopkom razvlaknenja bazaltne taline pri temperaturi približno

1450 °C. Vlakna se nadalje impregnirajo z vezivom, s katerimi se dosežeta vodoodbojnost in trdnost. Hidrofobna impregnirana vlakna se nato z utrjevanjem veziva združujejo in oblikujejo v kompozit.

Iz gradbene prakse je poznano, da se kljub deklarirani obstojnosti številnim toplotnoizolacijskim materialom – vlaknastim kompozitom, ki so dalj časa izpostavljeni vplivu difundirajoče vodne pare, poslabšajo mehanske

lastnosti (Alessandro, 2018). Za preprečitev poslabšanja toplotnih in hidrometričnih lastnosti izolacije je zelo pomembno, da je kemijsko obstojna, kar je odvisno od tipa veziva. Kamena volna za izolacijo ravnih streh ima večjo gostoto kot izolacijski materiali te vrste za druge namene, zaradi tega je tveganje za elucijo veziva večje (Vrána, 2007).

Voda lahko obstaja v treh agregatnih stanjih, v trdnem (led), tekočem (voda) in plinastem (para). V naravnih pogojih, ki so jim gradbeni objekti navadno izpostavljeni, lahko nastopijo vsi trije naštet primeri. Vse tri faze so za gradbene materiale lahko nevarne, če v času

izgradnje objekta ne izberemo ustrezne tehnologije, ki onemogoči vstop vode v material (Hagentoft, 2001).

Transport vode v poroznih materialih, kar kamena volna je, je možen z:

- difuzijo,
- kapilarnostjo in
- kot kombinacija difuzije in kapilarnosti.

Zelo pomembno je tudi, da je gradbena konstrukcija gradbeno-fizikalno zasnovana tako, da zaradi difuzije vodne pare v njej ne nastaja škodljivi kondenz in da zaradi izvedbenih

napak ni možno zamakanje. Najpomembnejša lastnost, ki določa dolgotrajno energijsko učinkovitost izolacijskih materialov, je sposobnost, da se onemogoči vdor vlage v porozno strukturo materiala. Vlaga lahko v porozne izolacijske materiale prodira skozi življenjski cikel, če pa se v material uspe absorbirati, se zelo poveča toplotna prevodnost (Fabian, 2004). V suhem okolju znaša toplotna prevodnost mineralne volne približno 0,035 W/mK, pri 90 % relativni vlažnosti pa lahko naraste do 0,9 W/mK, kar znatno zmanjša energetska učinkovitost stavb (Jerman, 2012).

Dolga prisotnost vlage v kameni volni lahko vpliva na oslabeitev vezi med vlakni in vezivom, kar lahko povzroči bistveno zmanjšanje tlačne in natezne trdnosti (Chadiarakou, 2007). Izolacijski materiali, kot je na primer kamena volna, ki je vgrajena v gradbene objekte, se v svojem življenjskem ciklu starajo. Staranje pod vplivom zračne vlage in vode ter ob prisotnosti temperature, ki na površini ravne strehe lahko doseže tudi več kot 70 °C, privede do kemičnih sprememb v materialu, predvsem pa se spremeni morfologija površine vlaken (Lund, 2008).

2 • VZORČENJE MATERIALA IN KARAKTERIZACIJSKE METODE

2.1 Vzorčenje mineralne volne

Za ugotovitev vzrokov sprememb trdnostnih lastnosti toplotne izolacije smo opravili vzorčenje zgornje plasti mineralne kamene volne Termotervol DDP (Knauf Insulation) iz neprezračevanih ravnih streh (slika 1a). V praksi se mineralna volna vgrajuje v dveh slojih različnih gostot in trdnosti. Predmet naših raziskav je bila samo kvaliteta zgornje plasti, ki je DDP. V obeh primerih je vzdrževalec oziroma upravitelj objektov na strehah opazil izrazito zmanjšanje trdnostnih lastnosti – zmeščanje vgrajene toplotne izolacije. Preučevani strešni kritini sta bili v sestavi: na zgornji strani 1,2 mm debela hidroizolacijska membrana iz mehkega polivinil klorida (PVC-P), pod njo 200 mm debela toplotna izolacija mineralne

volne, položena v dveh slojih z zamaknjenimi stiki, ki ji sledita 0,3 mm debela parna zapora z lepljenimi stiki in strešna trapezna pločevina 165/250 debeline 1,25 mm, sidrana v AB- in jeklene nosilce ostrešja. Iz dokumentacije o gradnji smo ugotovili, da so bile vgrajene izolacijske plošče z gostoto, večjo od 150 kg/m³. Na 4200 m² strehe deset let starega trgovsko-poslovnega objekta smo opazili več poškodb hidroizolacije, ki so nastale zaradi vgradnje neustreznih pritrdil (vijakov) hidroizolacije. Na teh mestih je v streho dalj časa tudi zamakalo. Za kontrolo kvalitete izolacijskih materialov smo opravili na prvem objektu tri sondažna odpiranja v velikosti 1000 x 500 mm, v medsebojni oddaljenosti minimalno 30 m. Vzorec iz prvega merilnega mesta je

bil vzorčen na mestu z velikim številom gub in izpuljenim vijakom ob strešni atiki. Vzorec mineralne volne, odvzet z drugega merilnega mesta, je bil vzorčen na omehčanem mestu. Vzorčili smo tudi vzorec iz tretjega merilnega mesta, ki ni kazal izrazitih sprememb mehanskih lastnosti. Drugi objekt je industrijska hala s površino strehe 7600 m², ki je razdeljena v dva dela: višji del, ki je orientiran proti zahodni strani, in nižji del, ki je orientiran proti vzhodni strani. Na tej strehi je bilo že po sedmih letih opazno izrazito poslabšanje lastnosti kritine – hidroizolacije, ki je bila lokalno razpokana in stanjšana. Tudi ta streha je na več mestih zamakala. Na višjem delu smo opravili dve vzorčenji ob robnem pasu montažne stene, kjer so koncentrirano nameščena postrojenja klimatov oziroma prezračevalnih sistemov. Na tem mestu smo predhodno ugotovili izrazito zmeščana mesta toplotne izolacije ter izpuljenje sider PVC-hidroizolacije. Na nižjem delu



Slika 1 • Vzorec mineralne volne iz ravnih neprezračevanih streh (a) in testiranje trdnostnih lastnosti z uporabo univerzalnega preskusnega stroja Zwick/Roell 2010 (b).

smo opravili vzorčenje v območju strešne- ga preboja prezračevalnega izpuha. Na tem mestu ni bilo opaznega izrazitega zmanjšanja trdnosti toplotne izolacije. Tudi v tem primeru je bila površina sodažnih mest cca 1000 x 500 mm. Vzorce mineralne volne, ki so bili odvzeti iz obeh objektov, smo takoj po vzorčenju zapakirali v polietilenske vreče ter jih odpeljali v laboratorij za nadaljnjo analizo. Novi t. i. etalonski vzorci, vzorci, ki niso bili vgrajeni, so bili primerjani s starani vzorci iz strehe objektov.

2.2 Laboratorijske metode

Na odvzetih vzorcih mineralne kamene volne smo z gravimetrično metodo izmerili količino vsebovane vode, predpisano s standardom

UNI EN ISO 12570. Vsebnost vode (w) smo izračunali s pomočjo enačbe (1):

$$w = m_w - m_0 / m_0 \times 100, \quad (1)$$

kjer je m_w masa odvzetega vzorca iz zme- hčanega strešnega območja in m_0 masa istega vzorca, ki je bil osušen v ventilacijski komori pri 105 °C do konstantne mase. Mehanske lastnosti – tlačno trdnost pri 10 % deformaciji – smo določili po metodi, predpisani s standardom SIST EN 826, z uporabo univerzalnega preskusnega stroja Zwick/Roell Z010 (slika 1b). Za vsako mesto vzorčenja smo izdelali pet vzorcev dimenzij 100 x 100 mm, na katerih smo najprej opravili standardni tlačni preizkus. Iz sredine

teh vzorcev smo odvzeli kosme vlaken ter jih pregledali z vrstičnim elektronskim mikrosko- pom Quanta 3D in Sirion 400 NC. Rezultati pregleda z elektronskima mikroskopoma so SEM-SEI-posnetki (Scanning Electron Mi- croscopy – Secondary Electron Imaging) in mikrokemijska analiza vsebovanih kemijskih elementov EDS (Energy Dispersive Spec- trometry) oziroma XRM (X-Ray Mapping), ki podaja razporeditev kemijskih elementov po površini. Površinsko EDS-analizo preiskovanih vzorcev, ki smo jih predhodno očistili v 95 % alkoholu ter osušene neparili z zlatom, smo opravili z elektronskim mikroskopom Sirion 400 NC.

3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Vsebnost vlage in mehanske lastnosti vzorcev kamene volne

Vsebnost vlage v vzorcih kamene volne s strešnih kritin je zanašala od 0,48 mas. % do 4,13 mas. %. Vsebnost vlage smo izmerili na petih vzorcih mineralne volne za vsako mesto vzorčenja. V novih, etalonskih vzorcih

je bila v laboratoriju izmerjena nižja vlaga pri 90 % relativni vlažnosti (manj kot 0,4 mas. %) zaradi prisotnosti nedegradirane smole in drugih hidrofobnih dodatkov. Prisotnost višje količine vlage v odvzetih strešnih vzorcih je tako lahko vzrok za delno razgradnjo veziva iz fenol-formaldehidne smole, ki ščiti in povezuje

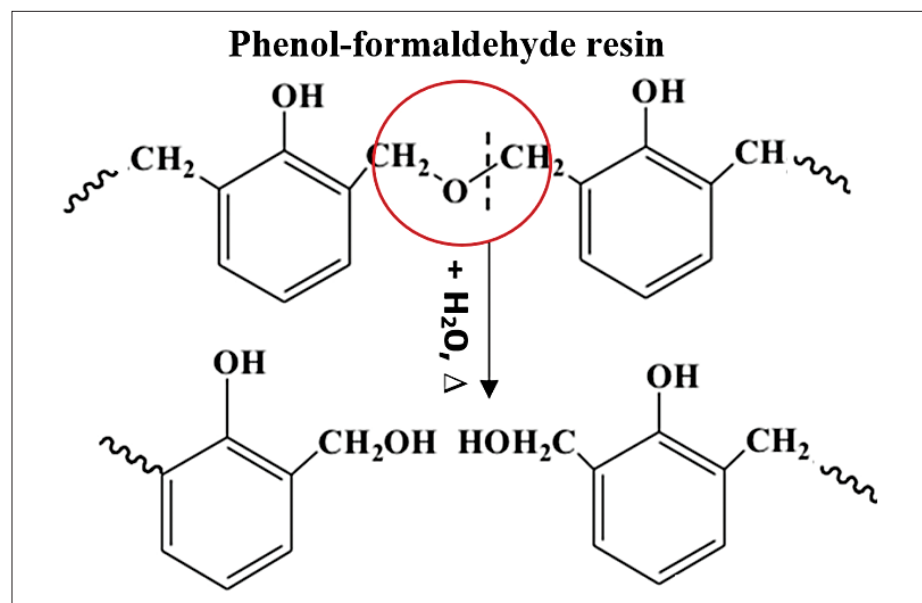
vlakna mineralne volne (Yu, 2018). Preostala voda, ki poleti ni izhlapela iz strešnih objektov, je povzročila delno razgradnjo formaldehidne smole z reakcijo depolimerizacije (slika 2). Bazaltna vlakna so v splošnem zelo odporna proti vplivu alkalnih raztopin, odpornost v kislinskih raztopinah pa je razmeroma majhna (Militky, 2010).

Rezultati izmerjenih vlažnosti (w) in tlačnih trdnosti (σ) iz objektov 1 in 2 so podani v preglednici 1. Deklarirana tlačna trdnost po standardu SIST EN 826 pri 10 % deformaciji ($\sigma_{10,dek}$) je bila 70 kPa.

Prisotnost vlage v izolacijskem materialu sča- soma močno vpliva na poslabšanje mehan- skih lastnosti. Če bazaltna vlakna potopimo v vodo brez zaščite s smolo, se poslabšajo njihove natezne lastnosti (Li, 2012). Iz rezul- tatov preizkušanja, ki so zbrani v preglednici 1, je razvidno, da se je » $\sigma_{10,sred}$ « v povprečju zmanjšala od » $\sigma_{10,dek}$ « na prvem referenčnem objektu za 64 % oz. 67 % na drugem referenčnem objektu. Mehanska trdnost vlaken je tesno povezana z morfologijo površine, ki ne sme biti heterogena, ne sme vsebovati struk- turnih napak in nečistoč. Z namenom preuči- ti morfologijo površine vlaken smo opravili nadaljnjo podrobno mikroanalizo z uporabo elektronskega mikroskopa.

3.2 Pregled vzorcev mineralne volne z elektronskim mikroskopom

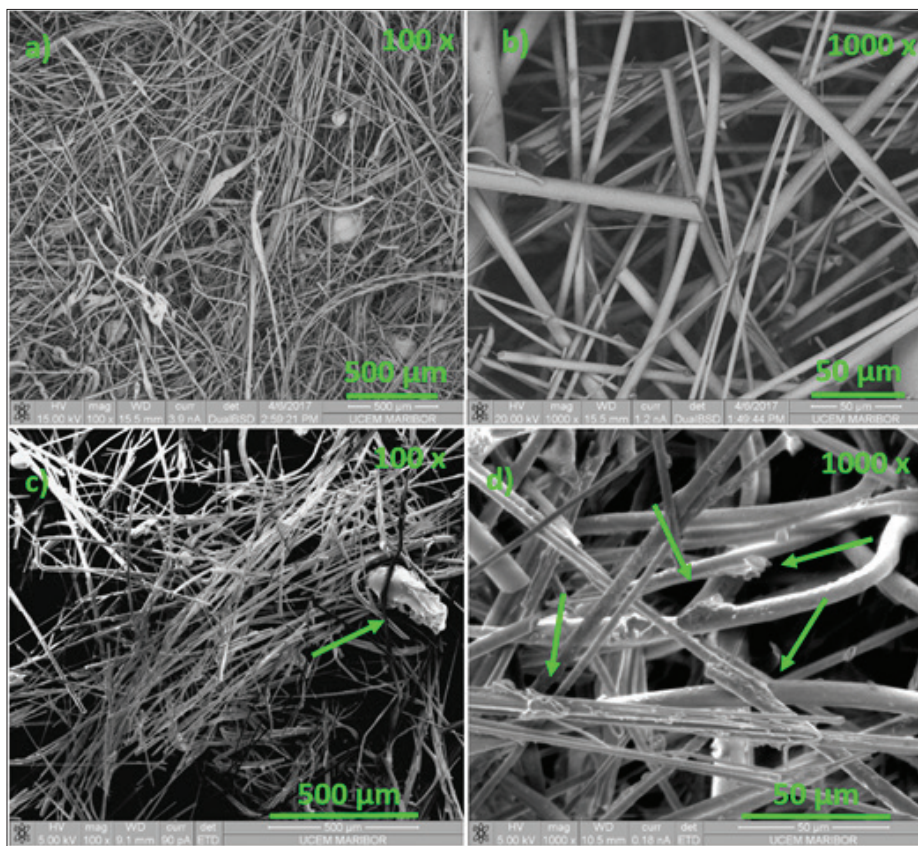
Mikroskopski pregled vzorcev kamene volne je pokazal, da je na vseh staranih vzorcih prišlo do sprememb na površini vlaken. Oblika izboklin in razjed ni nujno sferične oblike, njihova površina je zelo različna. Kamena volna, ki smo jo preiskovali, je sestavljena iz kratkih bazaltnih vlaken, ki so naključno orientirana in medsebojno povezana z vezivom. Slika



Slika 2 • Delna razgradnja fenol-formaldehidne smole z reakcijo depolimerizacije kot posledica pri- sotnosti vode in povišane temperature, ki lahko poleti na strešnih objektih preseže 70 °C.

VZOREC	W_{min} (ut. %)	W_{sred} (ut. %)	W_{max} (ut. %)	$\sigma_{10,min}$ (kPa)	$\sigma_{10,sred}$ (kPa)	$\sigma_{10,max}$ (kPa)	$\sigma_{10,dek}$ (kPa)
objekt 1	0,71	0,83	0,97	11	25	38	70
objekt 2	0,48	1,71	4,13	9	23	57	70

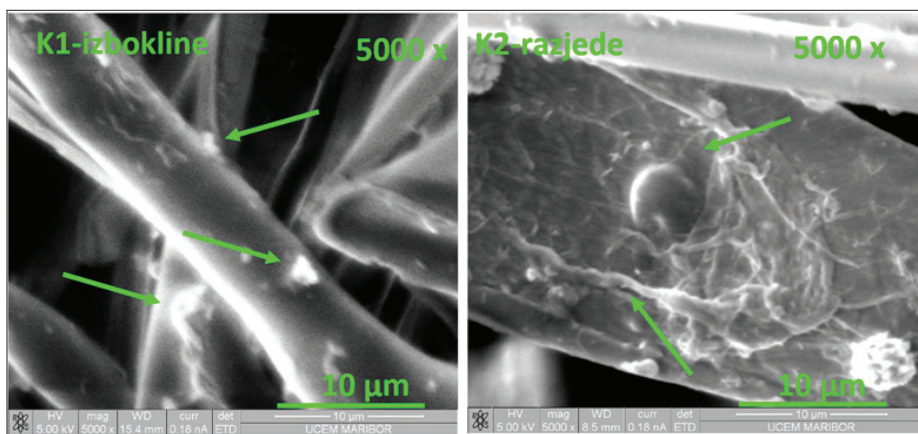
Preglednica 1 • Rezultati izmerjenih mehanskofizikalnih lastnosti.



Slika 3 • SEM-, SEI-posnetek novih (a, b) in postaranih (c, d) bazaltnih vlaken pri 100- in 1000-kratni povečavi.

3a-b predstavlja mikrostrukturo nove kamene volne, ki prikazuje vlakna z gladkimi površinami. Slika 3d-f pa prikazuje starane vzorce

difuzije vodne pare. Pri 100-kratni povečavi je viden degradiran skupek formaldehidne smole (PF), ki se uporabila kot utrjevalna



Slika 4 • SEM-, SEI-posnetek bazaltnih vlaken – vzorca mineralne volne, ki je bil očiščen v 95 % alkoholu pri 5000-kratni povečavi s karakterističnima spremembama – K1-izboklinami in K2-razjedo.

pri 100- in 1000-kratni povečavi, odvzete z omehčanega strešnega območja, katerih površine so obdane s slojem nečistoč, ki so nastale zaradi stalnega zamakanja in kondenzacije vode na poroznih mestih kot posledica

faza pri proizvodnji kamene volne (slika 3d). Lokalno prisotne vložke PF je mogoče razložiti z neenakomerno porazdelitvijo veziva že med proizvodnim postopkom. Za izboljšanje koherentnosti med vlakni in formaldehidnim

vezivom se v zaključni fazi vlakna pogosto poškopirajo še s silanom (SiH_4) (Moseguard, 2005). Dobra medsebojna povezanost veziva in bazaltnih vlaken je tesno povezana z mehanskimi lastnostmi (Lund, 2008).

Nadalje smo starani vzorec kamene volne očistili v 95 % alkoholu. Tako očiščene vzorce vlaken smo pregledali z elektronskim mikroskopom pri 5000-kratni povečavi. Na površini vlaken smo opazili dve karakteristični obliki sprememb: izbokline (K1-izbokline) in razjede (K2-razjede) (slika 4). Isti tip poškodb se pojavlja na vseh vzorcih, ki smo jih pridobili iz obeh objektov.

Vzrokov, ki so razlog za nastanek takšnih sprememb površine bazaltnih vlaken, je več:

- raztezek bazaltnih vlaken in otrdele fenol-formaldehidne smole, ki obdaja površino bazaltnih vlaken, je zelo različen (Ducman, 1998) ($\alpha_{\text{bazalt.vlakna}} = 8 \times 10^{-6}/\text{K}^{-1}$ in $\alpha_{\text{PF smola}} = 30 - 45 \times 10^{-6}/\text{K}^{-1}$), kar pri cikličnih temperaturnih obremenitvah, ki na strehah predstavljajo interval od -10°C do 70°C privede do tega, da film iz PF-smole na mestih s slabo adhezijo nabrekne.
- PF-smole so krhke in odporne proti vodi; izbokline in razjede na vlaknih predstavljajo mesta slabe adhezije med vezivom in vlakni, temperaturno delovanje in vpliv vlage na teh mestih povzročita poškodbe vlaken, ki brez hidrofobne zaščite niso več odporna proti vplivu vlage.

3.3 Mikrokemijske lastnosti vzorcev kamene volne

Za določanje relativnih količin kemijskih elementov na površini novih in dotrajanih vzorcev kamene volne smo uporabili SEM-EDS-tehniko, za ugotavljanje elementarne porazdelitve pa XRM-analizo.

3.3.1 Mikrokemijska EDS-analiza vzorcev

Mikrokemijska analiza vzorcev je bila narejena z energijsko disperzijskim spektrometrom (EDS). Analizirali smo dva vzorca s karakterističnimi poškodbami. Preučili smo etalonski vzorec (slika 5) in vzorec z oznako K1, kjer prevladujejo spremembe v obliki izboklin (slika 6a), na vzorcu z oznako K2 pa prevladujejo spremembe v obliki razjed (slika 6b). EDS-penetracija elektronskih žarkov je omejena na detekcijo $1 \mu\text{m}$ v globino, kar zajema večinski zgornji sloj vlaken, ki je okopana s plastjo veziva formaldehidne smole. V primeru poškodovanih (razjed, izboklin) vzorcev lahko pričakujemo drugačen zajem elementov kot v primeru novih. Razjede in izbokline omogočajo drugačno penetracijo elektronskih žarkov,

Spojina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	K ₂ O
ut. %	51,6-57,5	16,9-18,2	1,3-3,7	5,2-7,8	2,5-6,4	0,8-4,5	4,0-9,5

Preglednica 2 • Kemična sestava mineralne volne iz bazaltnih vlaken (9).

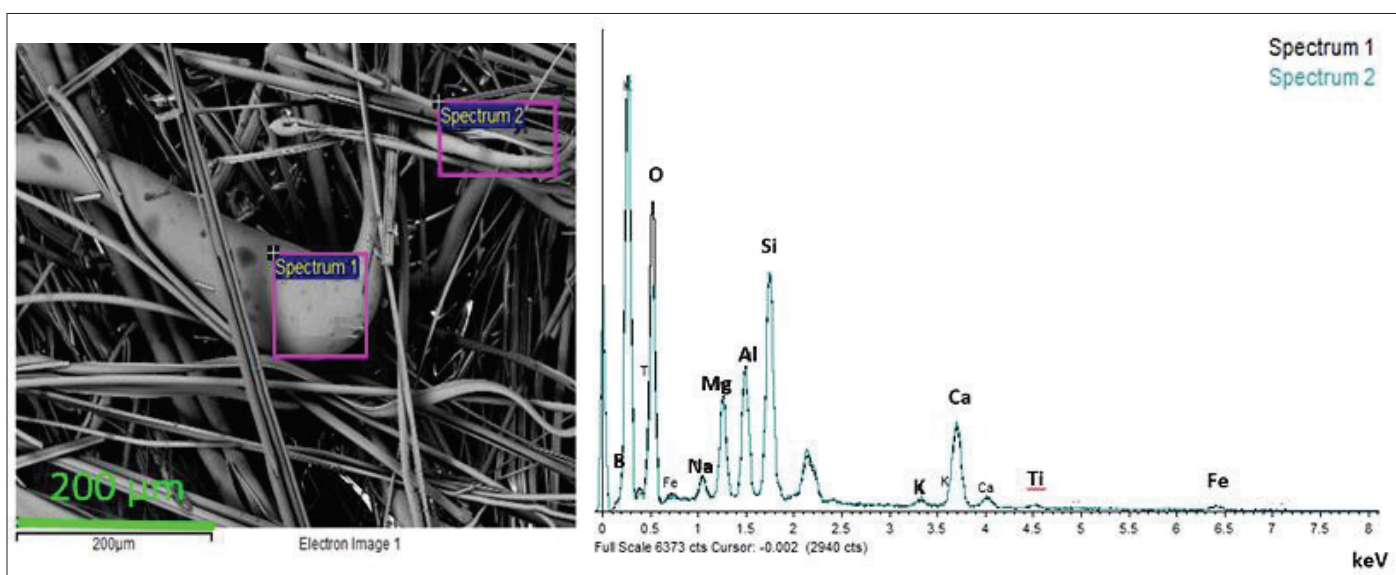
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Etalon (nov)	26.35	39.40	0.71	3.16	4.22	9.71	0.11	6.44	0.36	2.41
K1-izboklina	35.93	31.55	0.82	3.53	4.74	9.52	0.62	10.09	0.69	1.90
K2-razjeda	17.98	34.38	1.22	4.50	5.98	12.37	0.88	13.57	0.91	3.04

Preglednica 3 • Rezultati povprečne vrednosti EDS-analiz po površini vzorca.

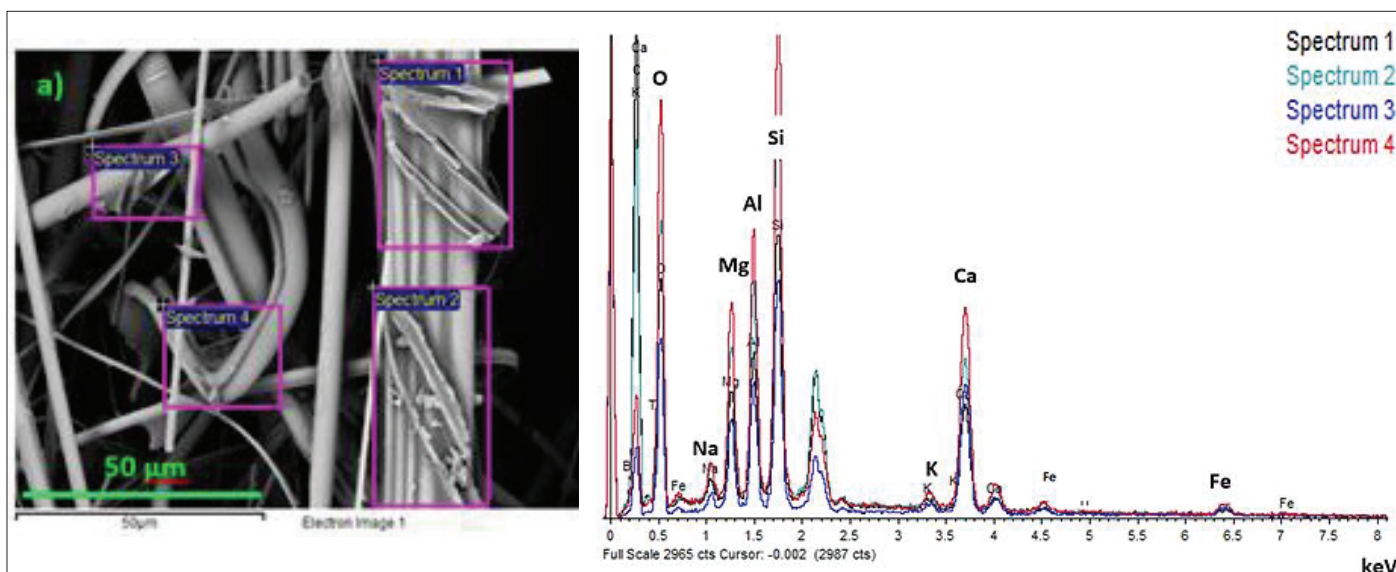
saj lokalno na površini bazaltnih vlaken primanjkuje sloj veziva, ki je degradiral zaradi vpliva visoke vlage in toplotnih nihanj. V preglednici

2 podajamo splošne kemične lastnosti bazaltnih vlaken, ki so jih podali raziskovalci K. Van de Velde et al. (Van de Velde, 2003).

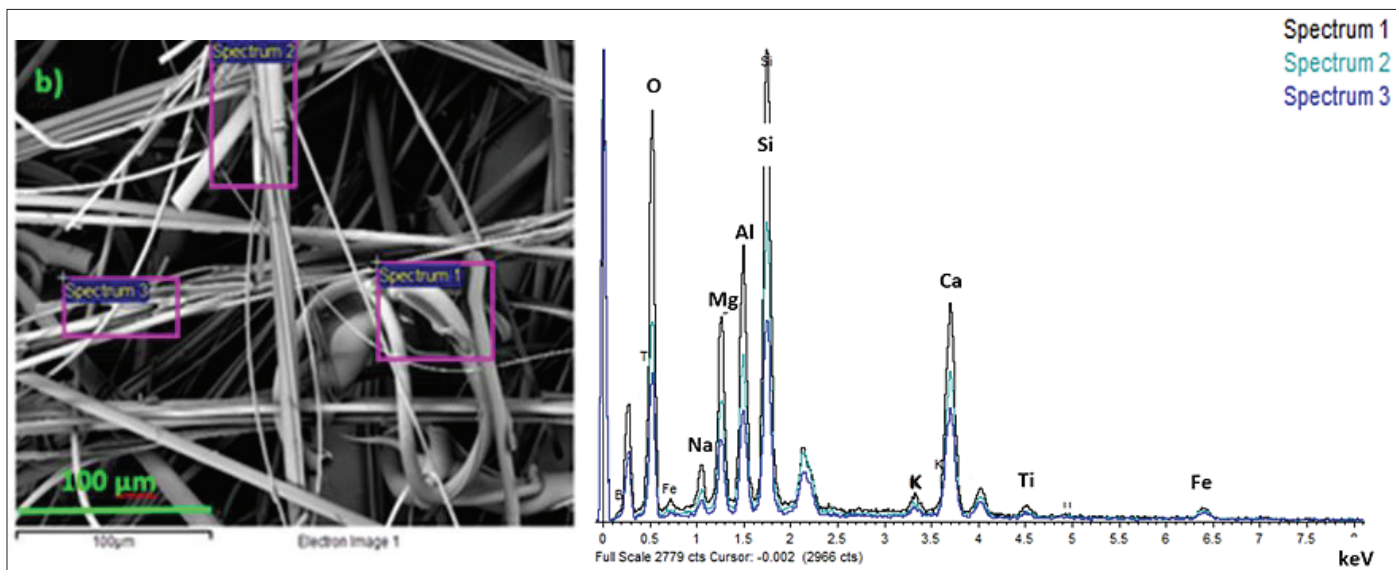
Dominantna oksida sta SiO₂ in Al₂O₃, vsi ostali naštetih oksidi se vedno pojavljajo v vrednostih, ki so manjše od 10 ut. %.



Slika 5 • Področji EDS-analize na novem vzorcu in rezultati EDS-spektrov.



Slika 6a • Področja EDS-analize na vzorcih s steh s karakteristično spremembo površine: K1-izboklina in rezultati EDS-spektrov.



Slika 6b • Področje EDS-analize na vzorcih s streh s karakteristično spremembo površine: K2-razjeda (b) in rezultati EDS-spektrov.

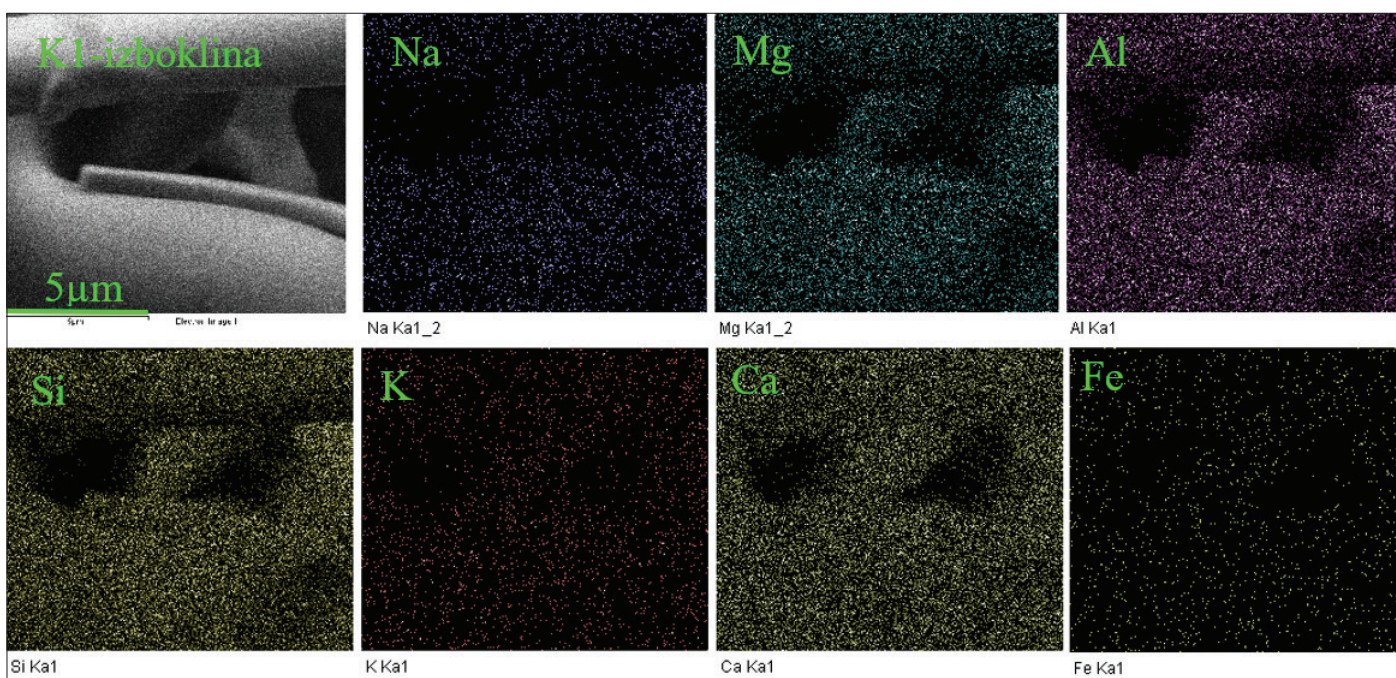
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Etalon (nov)	2.72	4.06	0.07	0.33	0.43	1.00	0.01	0.66	0.04	0.25
K1-izboklina	2.71	3.10	0.09	0.37	0.50	1.00	0.07	1.11	0.08	0.22
K2-razjeda	2.34	2.77	0.10	0.36	0.48	1.00	0.07	1.09	0.07	0.24

Preglednica 4 • Rezultati relativnih količin elementov Na, Mg, Al in K v primerjavi s Si.

Rezultati EDS-analize, s katero smo ugotavljali prisotnost kemijskih elementov, ki tvorijo okside, podane v preglednici 2, so prikazani v preglednici 3. Razvidno je, da je element Si manj prisoten v novem vzorcu, ki je pre-

vlečen s smolo, v primerjavi z degradiranim, kjer razjede omogočijo globljo penetracijo elektronskih žarkov do bazaltne površine, bogate s SiO₂ oksidom. Prav tako so se vzorcem na mestih razjed na površni pov-

ečale relativne količine elementov Na, Mg, Al, Ca K in Ti v primerjavi s Si (preglednica 4). Do podobnih ugotovitev sta prišla Lund in Yue, ki sta preučevala površino bazaltnih vlaken, ki je bila več tednov potopljena v



Slika 7 • Razporeditev kemijskih elementov za vzorec s karakteristično poškodbo K1-izboklina.

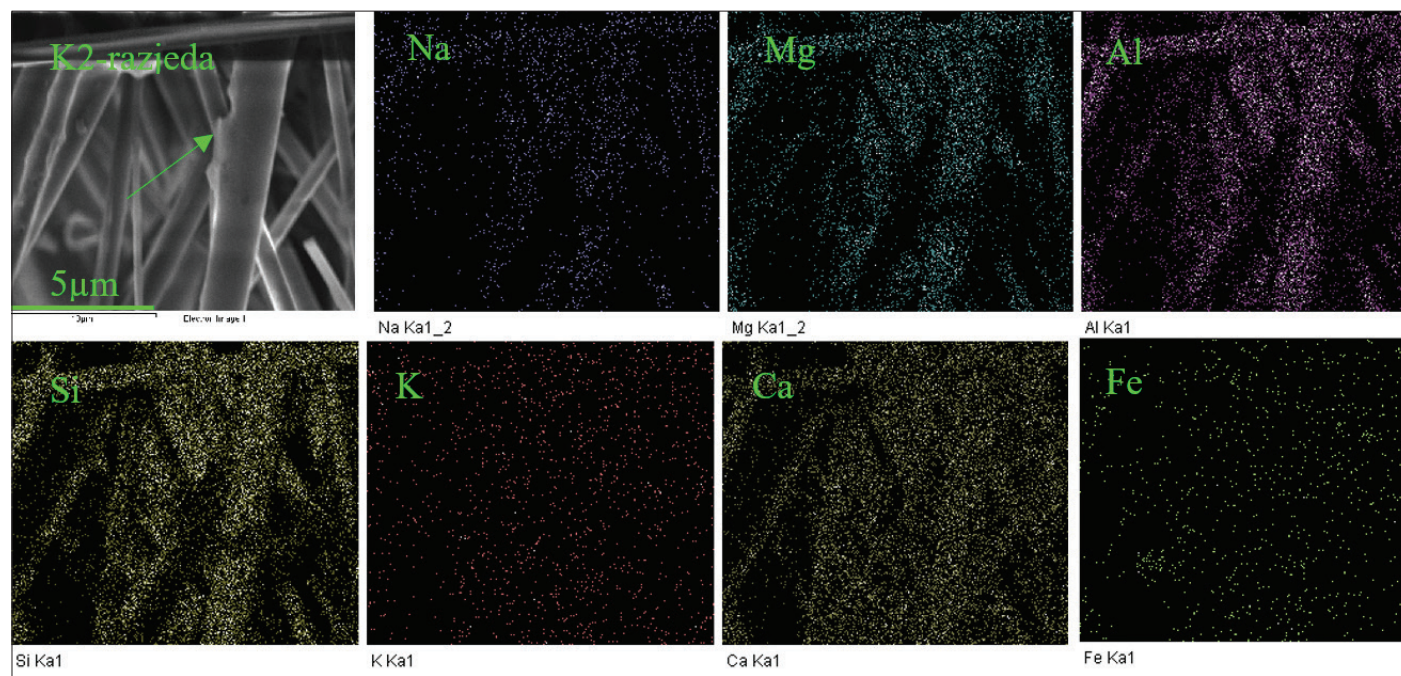
deionizirano vodo pri 70 °C (Lund, 2008). Ker je vzorčenje dotrajanih strešnih vzorcev pokazalo sorazmerno povečanje elementov Al in Ca, lahko domnevamo, da so se na površini oblikovale usedline Al_2O_3 in CaO. Višja raven CaO v starih vzorcih kaže na to, da je prišlo do bazaltne korozije (Lehuede, 1994). Predvidevamo, da je pod vplivom vlage in vode prišlo do kemijskih reakcij med površino bazaltnih vlaken in vlažnim okoljem (Lund, 2008).

Slika 6a: Področja EDS-analize na vzorcih s streh s karakteristično spremembo površine: K1-izboklina in rezultati EDS-spektrov

3.3.2 Površinsko kemična mikroanaliza (XRM)

XRM-analizo (X – Ray Mapping) smo uporabili za ugotavljanje elementarne porazdelitve kemijskih elementov na področjih K1 – izboklina in K2 – razjeda. Razporeditev kemijskih elementov Na, Mg, Al, Si, K, Ca in

Fe je za vsak dotrajani vzorec s karakterističnimi napakama K1-izboklina in K2-razjeda podan na slikah 7 in 8. Kot dejstvo, ki je razvidno iz opravljene XRM-analize, pa lahko navedemo, da degradacije površine nimajo vzroka v nečistočah materiala, saj je razporeditev kemijskih elementov – reaktantov, predvsem Fe, tudi na teh mestih enakomerna.



Slika 8 • Razporeditev kemijskih elementov za vzorec s karakteristično poškodbo K2-razjeda.

4 • ZAKLJUČEK

Na osnovi opravljenih raziskav menimo, da je vzrok poslabšanja mehanskih lastnosti plošč iz mineralne volne – vlaknastega

kompozita iz bazaltnih vlaken in veziva iz fenol-formaldehidne smole – degradacija strukture. Zaradi prisotne vode in povišane

temperature se površina bazaltnih vlaken morfološko spremeni. Morfološke spremembe na površini vlaken so vzrok za poslabšanje mehanskih lastnosti. Te spremembe pa so posledica kemičnega staranja zaradi prisotne vode.

5 • LITERATURA

Chadiarakou, S., Papadopoulos, A. M., Karamanos, A., Aravantinos, D., The impact of moisture on the thermal conductivity value of stone wool based insulating materials, Proc. of 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 27–29, 2007.

D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., Sambuco, S., Rufini, A., Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials, Construction and Building Materials 158, 264–274, 2018.

De Rosa, I. M., Marra, F., Pulci, G., Santulli, C., Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Post-impact mechanical characterisation of E-glass/basalt woven fabric interply hybrid laminates, Express Polymer Letters 5(5), 2011.

- Ducman, V., Apih, V., Kovačević, M., Sever-Škapin, A., Vpliv pospešenega staranja na mehanske lastnosti plošč iz mineralnih vlaken, Kovine, zlitine tehnologije, 32(3–4), 1998.
- Fabian, B. A., Herrenbruck, S., Hoffee, A., The Environmental and Societal Value of Extruded Polystyrene Foam Insulation, Earth Tech Forum 200; April 15, 2004.
- Hagentoft, C. E., Introduction to Building Physics, Lund: Studentlitteratur, 87–149, 2001.
- Ivanič, A., Kravanja, G., Kidess, W., Rudolf, R., Lubej, S., The Influences of Moisture on the Mechanical, Morphological and Thermogravimetric Properties of Mineral Wool Made from Basalt Glass Fibers, Materials, 13, 2392, 2020.
- Jerman, M., Cerný, R., Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials, Energy Build., 53, 39–46, 2012.
- Li, H., Xian, G., Ma, M., Wu, J., Durability and fatigue performances of basalt fiber/epoxy reinforcing bars, Proc., 6th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012), Univ. of Rome La Sapienza, Rome, 2012.
- Lehuede, P., De Meringo, A., SEM-EDS analysis of glass fibers corroded in physiological solutions by dynamic tests with variable flow rates, Environ. Health Perspect. 102, 73–75, 1994.
- Lund, M. D., Yue, Y. -Z., Influences of chemical aging on the surface morphology and crystallization behavior of basaltic glass fibers, Journal of Non-Crystalline Solids, 354, 1151–1154, 2008.
- Militký, J., Zeisbergerová, J., Kovačič, V., Chemical degradation of basalt fibers, Textile industry technology (3), 317, 2009.
- Mosegaard, M., Pedersen, H., Investigation of the Crystallization Process occurring in Stone Wool Fibres during High Temperature treatments, Project Paper, Aalborg University, Denmark, 2005.
- Steponaitis, L., Vėjelis, S., Vaitkus, S., Analysis of structure and deformation mechanisms of mineral wool slabs under compression, Materials Science 18(2), 192–196, 2012.
- Van de Velde, K., Kiekens, P., Van Langenhove, L., Basalt fibres as reinforcement for composites, Proceedings of 10th international conference on composites/nano engineering, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA, Citeseer, 2003.
- Vrána, T., Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool, KTH, 2007.
- Yu, Y., Xu, P., Chang, M., Chang, J., Aging Properties of Phenol-Formaldehyde Resin Modified by Bio-Oil Using UV Weathering, Polymers, 10, 1183, 2018.