

SOLA-GĒLA PĀRKLĀJUMS UZ EMALJĒTA LEGĒTĀ TĒRAUDA

ILONA PAVLOVSKA^{1*}, GUNDARS MEŽINSKIS²,
LAIMONS-PAULIS BĪDERMANIS³

¹⁻³ *Silikātu materiālu institūts, Materiālzinātnes un
lietišķās ķīmijas fakultāte, Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija*

Kopsavilkums. Darbā aprakstītas jauna materiāla un tehnoloģijas izstrādes stadijas saules enerģijas kolektoriem. Augstas jaudas saules enerģijas kolektora (AJSEK) cauruļveida materiālam jāspēj ilgstoši izturēt augstas temperatūras, neizmainot savu mikrostruktūru un nezaudējot savus sākotnējos siltumtehnikos raksturlielumus. RTU Silikātu materiālu institūta zinātnieki sadarbībā ar LU Cietvielu fizikas institūta speciālistu izstrādājuši tehnoloģiju, kas ļauj iegūt AJSEK saules enerģiju uztverošu materiālu un spēj izturēt 600 °C temperatūru vismaz 250 dienas. Šī materiāla pamatā ir nerūsējošā tērauda cauruļveida izstrādājums, kuram uzklāts stiklkristālisks emaljas pārklājums. Ilgstošu augsttemperatūras izturību nodrošina ne vien emaljas pārklājuma frītei pievienotās specifiskās piedevas, bet arī emaljai uzklātais sola-gēla nanodaļiņu pārklājums.

Atslēgas vārdi – emaljas pārklājumi tēraudam, sola-gēla pārklājumi, termiskās īpašības, ķīmiskā izturība, mikrocietība.

I. Ievads

Sola-gēla tehnoloģija plaši tiek izmantota dažādu nanomateriālu sintēzē, savukārt ar tās palīdzību iegūtie plānie pārklājumi, kuru sastāvs un struktūra nosaka to izmantošanas jomas, plaši lietojami visdažādākajās nozarēs. Piemēram, antiatstarojošos pārklājumus izmanto displeju ekrāniem, saules elementiem un optiskajām lēcām [1], [2]. Augstas ķīmiskās izturības sola-gēla pārklājumi izmantojami metālu un to sakausējumu

* Korespondējošais autors.
E-pasts: ilona.pavlovska@rtu.lv

korozijas aizsardzībai [3]–[5]. Vēl būtu jāpiemin fotokatalītiski pašattīroši pārklājumi tekstilmateriāliem, plastmasas un stikla virsmām, kā arī celtniecības materiāliem un kultūras mantojuma pieminekļiem un celtnēm [6], [7]. Mūsdienās arvien vairāk pasaulē tiek domāts par “zaļo” enerģiju jeb enerģiju no neizsīkstošiem dabas resursiem. Arī Latvijā apstiprināti Ministru kabineta noteikumi Nr. 129 “Par enerģētikas attīstības pamatnostādņem 2016.-2020. gadam”, kas nosaka, ka, tāpat kā citām ES dalībvalstīm, arī Latvijai no 2020. līdz 2030. gadam jāpalielina atjaunojamās enerģijas īpatsvars kopējā enerģijas patēriņā vismaz 27 % apmērā [8].

Koncentrētas saules enerģijas (KSE) tehnoloģija tiek izmantota, lai ražotu ūdens tvaiku (siltumu), kā arī elektrību. KSE tehnoloģijā saules starojuma pārveides elements ir pārklājums uz siltumu vadošas virsmas, kura funkcija ir saules starojuma uztveršana [9]–[14].

Šis pārklājums ir daudzslāņu struktūra, kurā ietilpst slāņi ar augstu un zemu elektromagnētiskā starojuma absorbciju un atšķirīgiem gaismas laušanas koeficientiem.

KSE kolektora pārklājumam jāiztur 500–800 °C temperatūra un jābūt ar augstu korozijas izturību un minimālu degradāciju ekspluatācijas laikā. Minētās augstās prasības KSE kolektora pārklājumiem šobrīd gan tehnoloģiski, gan tehniski vienlaicīgi nav praktiski realizētas. Jaunākajā zinātniskajā literatūrā aprakstīti līdzīgu pētījumu rezultāti, kas liecina, ka emaljas stabilitāte saules kolektora materiāliem panākta darbam tikai līdz 450 °C [15].

Šādas prasības veido plašu problēmu loku zinātnē un pētniecībā, jo jebkurš no saules starojuma uztvērēju materiāliem ir selektīvs un ar atšķirīgām ekspluatācijas īpašībām. Pieejamie pārklājumi augstas jaudas saules kolektoru enerģijas uztvērēju caurulēm nespēj ilgstoši izturēt augstas temperatūras, jo skābekli saturošā atmosfēra intensīvi degradē pārklājumus. Bez tam to ieguvei tiek izmantotas komplicētas un dārgas tehnoloģijas [16], [17]. Minētie pārklājumi vienlaicīgi nenodrošina efektīvu saules starojuma absorbciju un zemu siltuma izstarošanu apkārtēja vidē. Nav izstrādāti emaljas pārklājumi, kas spētu ilgstoši (vismaz 1000 h) izturēt temperatūras līdz 700 °C.

Pētījuma mērķis bija saules siltuma enerģijas akumulējošu materiālu un uzlabotas tehnoloģijas izstrāde koncentrētas saules enerģijas kolektora pārklājuma slāņu iegūšanai.

II. Metodiskā daļa

Emalju un sola-gēla pārklājumu rentgenfāžu analīze tika veikta ar rentgedifraktometru *Rigaku Ultima +*, izmantojot $\text{CuK}\alpha$ starojumu un goniometra rotācijas ātrumu 1 °/min.

Emalju ar un bez sola-gēla pārklājuma ķīmiskā izturība pret skābes un sārmu iedarbību tika pētīta saskaņā ar ISO 28706-2:2008 un ISO 28706-4:2008 standartiem, attiecīgi.

Paraugu mikrocietība tika noteikta, izmantojot Vikersa dimanta piramīdu un iekārtu *LOMO-PMT-3MT*.

Optiskās īpašības tika pētītas ar UV/VIS spektrofotometru (*Shimadzu Solidspec-3700*) gaismas viļņu diapazonā 300–2500 nm. Sola-gēla pārklājumu rezultātā izveidotās kompozīto emaljas-sola-gēla pārklājumu fotokatalītiskās īpašības tika izvērtētas, nosakot metilēnoranža (MO) ūdens šķīduma ($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) sadalīšanās ātrumu UV starojuma ietekmes rezultātā (125 W UV lampa).

Siltumvadāmību mērija atklātā vidē pie 25 °C. To fiksēja ar infrasarkanā termometru *CEM DT-8863*. Termiskās emisijas koeficients sola-gēla emaljas pārklājumiem tika noteikts, izmantojot termiskā starojuma termometru *Peak Tech 4975*.

Sola-gēla pārklājumu pagatavošanai tika izmantots titāna(IV) izopropoksīds (TTIP, *Sigma-Aldrich*), tetraetilsilikāts (TEOS, *Sigma-Aldrich*), propanols-2 un kā katalizators – sālskābe (HCl, *Sigma-Aldrich*). Komponentu molārā attiecība bija TTIP:TEOS:Propanols:HCl 1:4:179:2,85.

Trīs slāņu sola-gēla pārklājums (~470 nm) tika uznešts ar iemērkšanas-izvilkšanas paņēmieni (*KN 4002 KSV NIMA Dip Coater Single Vessel System Small* ar programnodrošinājumu *KSV NIMA DC software 3.00*) uz emaljētā tērauda ar ātrumu $220 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Pārklājums tika žāvēts 200 °C un tad apdedzināts 500 °C [18].

III. Eksperimentālā daļa

A. Emaljas pārklājumu izstrāde

ERAF projekta “Saules siltuma enerģijas akumulējošu materiālu izstrāde, izmantojot sola-gēla un vakuuma pārklājumu tehnoloģijas” ietvaros tika veikti pētījumi, lai izstrādātu masas sastāvu melnas krāsas mazatstarojošiem emaljas tipa pārklājumiem ar izvērstu virsmas struktūru uz legēta hromniķeļa tērauda izstrādājumiem, kuriem savukārt raksturīga paaugstināta termiskā izplešanās.

Uzsākot pētījumus, bija zināms, ka legēto un augsti legēto tēraudu emalju masas sastāvā līdzās emaljas fritei ievada grūti kūstošos oksīdus – hroma, cērija, alumīnija u. c. [19]. Taču šī tipa emaljas klājumi ir ar samērā nelielu termiskās lineārās izplešanās koeficientu (TLIK).

Vairāk kā 40 gadus atpakaļ tika izstrādāta masa emaljas pārklājumam, kura nodrošināja emaljas slāņa nepieciešamo TLIK, pateicoties tam, ka termiskās apstrādes laikā pārklājumā rodas kristāliskās

fāzes – kristobalīts un tridimīts. Bet šo kristālisko fāžu rašanās tika panākta tikai speciālas termiskās apstrādes rezultātā – izturot 900 °C 2 h [20].

Darba pirmā etapa mērķis bija izstrādāt emaljas masas sastāvu, kas nodrošinātu kristobalīta un tridimīta rašanos pārklājumā tā uzkausēšanas laikā.

Šis mērķis tika sasniegts, izmantojot emaljas friti (E1) ar augstu SiO₂ saturu un masas sastāvā ievadot pigmentu K6038 (hroma-dzelzs oksīdu maisījums), 40 līdz 100 svara daļas uz 100 svara daļām frites [21]. Pigmenta K6038 apzīmējums: *Cr-Fe tiefshwarz (deep black) Reibold-strick (CHEMISCH-KERAMISCHE WERKE)*.

Pirmā etapa noslēgumā tika izstrādāta masa stikla-emaljas pārklājumam ar saīsinātu kristalizācijas laiku, kura rezultātā uzkausēšanas laikā pārklājumā izkristalizējas kristobalīts un tridimīts. Tas nodrošināja nepieciešamo emaljas pārklājuma termisko izplešanos. Bet šo mērķu sasniegšanai masas sastāvā bija jāievada liels daudzums pigmenta – 40 līdz 100 masas daļas.

Nākamā etapa (E2) mērķis bija izstrādāt emaljas masas sastāvu ar samazinātu nepieciešamā pigmenta daudzumu, vienlaicīgi saglabājot saīsinātu kristalizācijas laiku. Mērķis tika sasniegts, izmantojot emaljas friti ar augstu SiO₂ saturu un masas sastāvā papildus pigmentam ievadot kristalizācijas veicinātāju, 30 līdz 70 masas daļas uz 100 masas daļām frites [21], [22]. Kā kristalizācijas veicinātāju izmantoja maisījumu no 100 masas daļām maltu smilšu un 3 masas daļas bezūdens sodas, kuru 1–2 h izkarsēja 1000–1200 °C un papildus sasmalcināja. Iegūtais masas sastāvs nodrošināja paātrinātu emaljas pārklājuma kristalizāciju un kristobalīta un tridimīta rašanos tajā.

Nākošā etapa (E3) mērķis bija izstrādāt emaljas masas sastāvu bez speciālā kristalizācijas veicinātāja, kā arī izslēgt emaljētā parauga lēnās atdzesēšanas nepieciešamību, kas būtiski vienkāršotu emaljas uzkausēšanas un kristalizācijas procesu. Mērķis tika sasniegts, izmantojot emaljas friti ar augstu SiO₂ saturu (80–88 masas%) un masas sastāvā papildus pigmentam ievadot maltas smiltis, 30–70 masas daļas uz 100 masas daļām frites [23].

Noslēdzošā etapa mērķis bija izstrādāt masas sastāvu mazatstarojamam silikātemaljas pārklājumam (sauļes starojumam ar viļņu garuma diapazonu 300–2500 nm) uz leģētā hromniķeļa tērauda, kuram savukārt raksturīga paaugstināta termiskā izplešanās.

Trešajā etapā izstrādātā masa melnas krāsas emaljas pārklājumam (E3) raksturojama ar izvērstu virsmas struktūru, kura nodrošina emaljas pārklājuma paaugstinātu termisko izplešanos. Tādējādi tā tika uzskatīta par piemērotu augstāk minētajam nolūkam. Bet emaljas klājumam

Emaljas pārklājumu E1, E2, E3 un E4 atstarošana (%)

Emaljas pārklājums	Starojuma viļņu garuma diapazoni, nm			
	300–400	400–700	700–2500	300–2500
	Atstarošana (α) attiecīgajā starojuma viļņu garuma diapazonā, %			
E1	4,94	4,83	55,73	44,96
E2	4,72	4,98	52,55	41,68
E3	3,26–5,28	4,11–6,65	41,31–56,90	34,52–47,66
E4	4,95–5,69	4,37–4,80	7,43–7,58	6,96–7,02

uz šīs masas bāzes raksturīga palielināta (virs 30 %) atstarošana starojuma viļņu diapazonā 300–2500 nm.

Turpmākā darba mērķis bija izstrādāt emaljas pārklājuma masas sastāvu, kurš nodrošinātu pazeminātu atstarošanu augšminētajā starojuma viļņu diapazonā. Mērķis tika sasniegts (I. tabula), komplektējot silikātemaljas masas sastāvu (E3) no emaljas frites ar augstu SiO₂ saturu, pigmenta, malta SiO₂ un masas sastāvā papildus ievadot speciālās piedevas (E4) [24].

II. tabulas rezultāti liecina, ka termiskā emisija 300–2500 nm viļņu garuma diapazonā palielinās, pieaugot darba temperatūrām. Vismazākā emisija ir emaljas pārklājumam E4, kuram ir viszemākā gaismas atstarošana, savukārt vislielākā ir emaljas pārklājumam E1. Jo zemāka atstarošana, jo augstāka kolektora efektivitāte, tādēļ ka apkārtējā vidē netiek emitēts absorbētais saules siltums. KSE materiālu efektivitāti un selektivitāti nosaka attiecība starp gaismas absorbciju un atstarošanu. Ja attiecība ir mazāka par 1, tad pārklājums ir neselektīvs. Bet ja attiecība ir lielāka vai vienāda ar 1, tad pārklājums ir selektīvs vai daļēji selektīvs. II. tabulā redzams, ka visas emaljas ir daļēji selektīvas. Vislabākā selektivitāte ir emaljas pārklājumam E4, kuram ir visaugstākā gaismas

II. tabula

Emaljas pārklājumu emisija un selektivitāte

Emaljas pārklājums	ϵ (20 °C)	ϵ (100 °C)	ϵ (300 °C)	ϵ (500 °C)	ϵ (600 °C)	α jeb absorbcija (%)	ϵ jeb emisija (600 °C)	α/ϵ
E1	0,39	0,41	0,44	0,47	0,49	0,68	0,49	1,39
E2	0,35	0,37	0,41	0,45	0,47	0,68	0,47	1,46
E3	0,27	0,28	0,30	0,33	0,35	0,70	0,35	2,00
E4	0,18	0,19	0,21	0,23	0,25	0,93	0,25	3,71

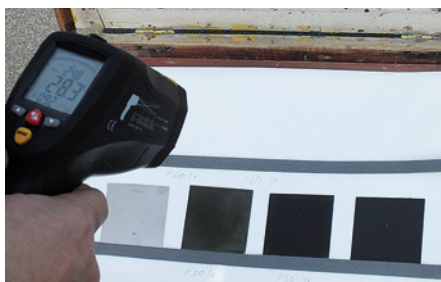


1. att. Caurules pārklātas ar E4 silikātemaljas pārklājumu.

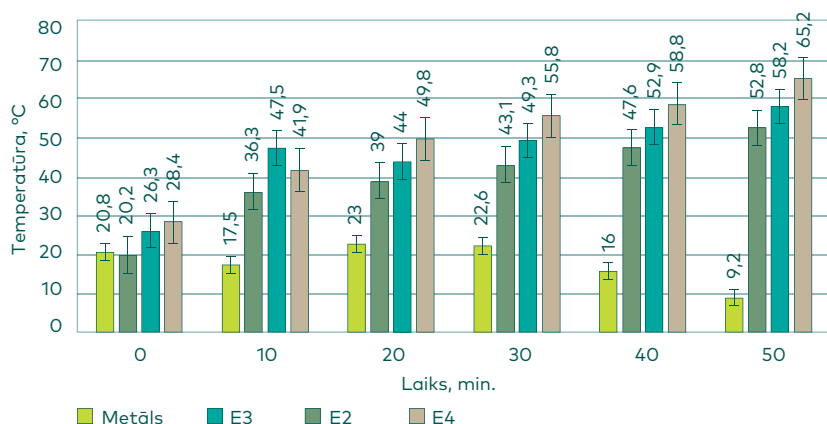
Sola-gēla pārklājums uz emaljēta leģētā tērauda

absorbciņa 300–2500 nm viļņu garuma diapazonā, savukārt zemākā selektivitāte ir emaljas pārklājumam E1.

Piedāvātais silikātemaljas pārklājuma masas sastāvs E4 (1. att.) nodrošina samazinātu atstarošanu starojuma viļņu diapazonā 300–2500 nm. Caurules ar šāda tipa pārklājumu domātas kolektoriem saules starojuma akumulācijai un ūdens uzsildīšanai. Materiāls nodrošina arī



paraugu novietojums testēšanas modulī



2. att. Emaljas pārklājumu siltumefektivitātes testa rezultāti.

efektīvāku pārklājuma saules radiācijas absorbciju un zemu siltuma izstarošanu apkārtējā vidē.

Emaljas pārklājumiem Fizikāli enerģētiskā institūta (FEI) vadošais pētnieks J. Kalnačs veica siltumvadāmības pētījumus [25]. Paraugi ar izmēriem 10 cm × 10 cm tika ievietoti speciāli izgatavotā modulī (2. att.). Lai salīdzinātu emaljas pārklājumu efektivitāti, paralēli tika testēts metāla paraugs bez pārklājuma. Pēc attēlā redzamajiem rezultātiem var spriest par E4 emaljas pārklājuma efektivitāti. Šī materiāla virsma 10 min laikā spēj uzkarst līdz 41,9 °C, bet 50 min laikā – līdz 65,2 °C temperatūrai.

B. Sola-gēla pārklājuma uz emaljētā legētā tērauda izstrāde

Nākamais pētījumu solis bija uzlabot jau esošās emaljas ķīmiskās, mehāniskās un termiskās īpašības, izmantojot sola-gēla tehnoloģiju.

Pielietojot TiO₂ un SiO₂ oksīdu vienkomentu un divkomentu sola-gēla sistēmas, tika pagatavoti vairāki sola-gēla sastāvi ar dažādām molārajām attiecībām, kurus pēc pārklājumu uznešanas novērtēja ar optiskās mikroskopijas palīdzību. Ņemot vērā, ka pārklājumu pielietošana saistīta ar koncentrētas saules enerģijas absorbcijas kolektoriem, ar UV-VIS spektroskopiju tika pētītas pārklājuma optiskās īpašības un noteikts optimālais sastāvs "S" (sola-gēla pārklājums) [18], [26]–[31].

Rentgenfāžu analīze tika veikta emaljām (E1, E2, E3 un E4) un arī ar solu-gēlu pārklātām emaljām (E1S, E2S, E3S un E4S) pirms un pēc termiskās apstrādes 600 °C temperatūrā.

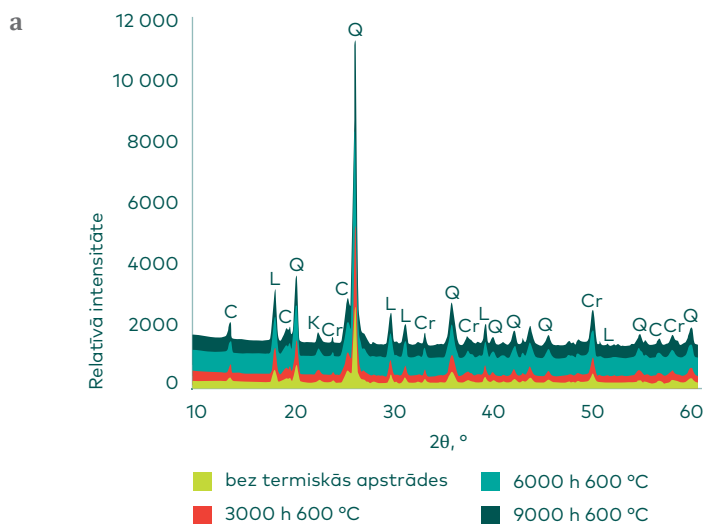
Jāatzīmē, ka rentgenogrammas neuzrādīja atšķirības starp paraugiem (bez un ar sola-gēla pārklājumu), kas izturēti 600 °C temperatūrā (3. b att.).

Emalju pārklājumos E1 un E1S konstatētas četras kristāliskās fāzes: kristobalīts, tridimīts, egirīns LiFe(Si₂O₆). Egirīns veidojas no sastāvā esošā SiO₂, litija un nātrija oksīdiem, kā arī no hroma dzelzs oksīda (pigments). Emalju pārklājumiem E2 un E2S arī raksturīgas četras galvenās kristāliskās fāzes – kvarcs, kristobalīts, tridimīts un hroma dzelzs oksīds CrFeO₃. Atšķirībā no E1 un E1S, šo pārklājumu rentgenogrammas neuzrāda egirīna fāzi. Tas varētu būt saistīts ar samazināto pigmenta daudzumu emaljā.

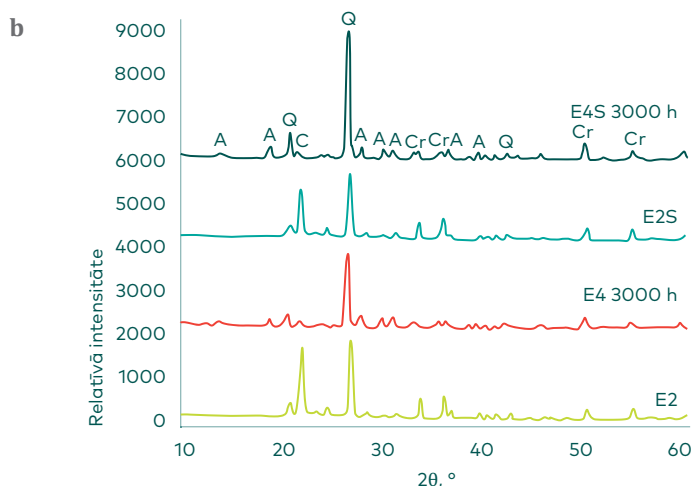
Emalju pārklājumu E3 un E3S rentgenogrammas uzrāda kvarcu, egirīnu, hroma dzelzs oksīdu un litija silikātu Li₂SiO₃.

E3 (3. a att.) emaljas pārklājumu gadījumā rentgenogrammas uzrādīja SiO₂ kvarca formā, pat paraugiem, kuri bija termiski apstrādāti 9000 h 600 °C, bet tajos sākot ar 3000 h parādās klinopiroksēns un litija silikāts.

Emaljas sola-gēla pārklājumu mikrocietības pētījuma rezultāti (III. tabula) parāda, ka sola-gēla pārklājumi būtiski neietekmē emaljas pārklājumu mikrocietību. Tas ir skaidrojams ar plāno sola-gēla pārklājuma kārtiņu (~ 470 nm).



Sola-gēla
pārklājums uz
emaljēta legētā
tērauda



3. att. Rentgenfāžu analīzes rezultāti: a – E3 emaljās pārklājums gan termiski neapstrādāts, gan apstrādāts (3000 h, 6000 h vai 9000 h 600 °C temperatūrā; b – ar (E2S) un bez (E2) sol-gēla emaljās pārklājumu bez termiskās apstrādes, kā arī ar (E4S) un bez (E4) sola-gēla emaljās pārklājumu pēc termiskās apstrādes 3000 h 600 °C temperatūrā.

Ar un bez sola-gēla pārklājuma emalju ķīmiskā izturība pret skābes un sārmu iedarbību tika pētīta saskaņā ar ISO 28706-2:2008 un 28706-4:2008 standartiem, attiecīgi. Masas zudumi skābā vidē ar un bez sola-gēla pārklājumiem bija ne vairāk par 1 %, jo emalju un sola-gēla pārklājumu sastāvā ietilpst skābes izturīgas komponentes. Ķīmiskās izturības pārbaudes

Emaljas pārklājumu mikrociētība

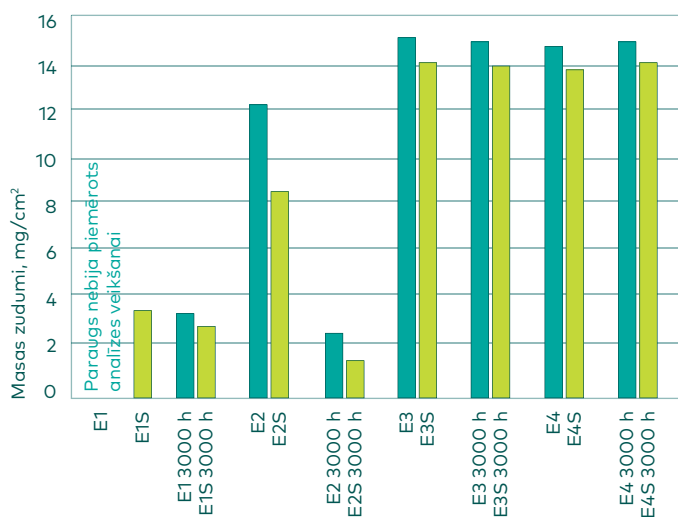
Paraugs	E1	E1S	E2	E2S	E3	E3S	E4	E4S
Pirms termiskās apstrādes (GPa)	2,13	2,19	2,82	2,81	2,62	2,59	2,75	2,76
Pēc termiskās apstrādes 3000 h 600 °C (GPa)	-	1,09	2,04	2,35	2,53	2,58	2,71	2,74

rezultāti (4. att.) sārmainā vidē (1 N NaOH) liecina, ka sola-gēla pārklājumi samazina emaljas pārklājumu masas zudumus par 7 %.

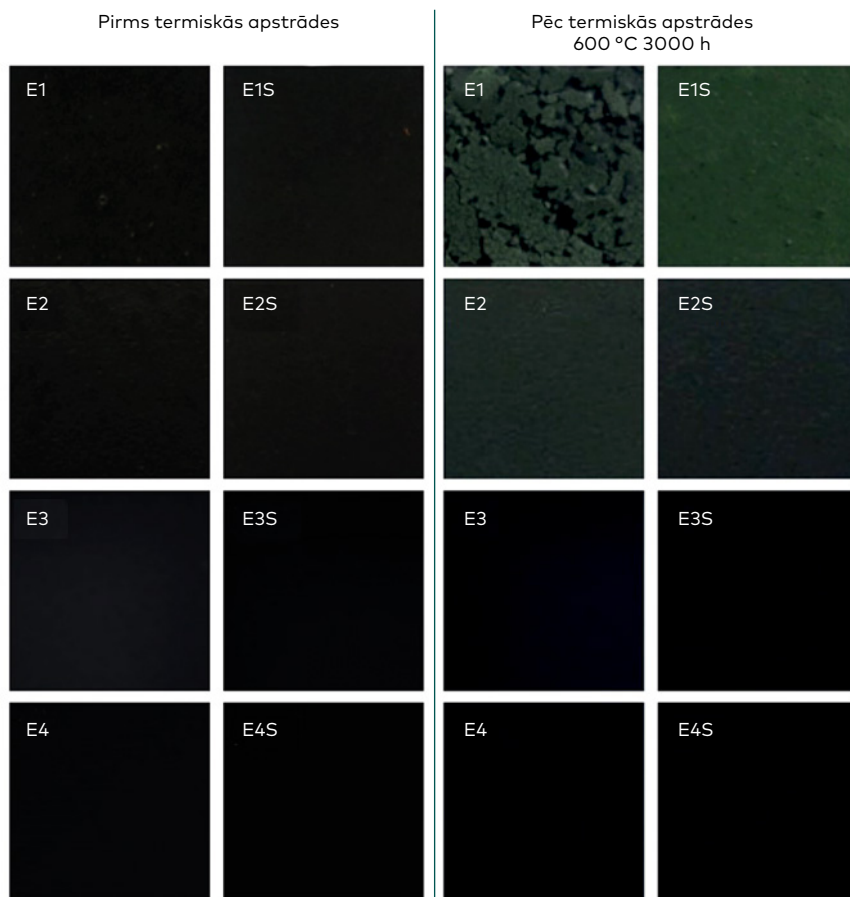
Kā redzams 4. att., sola-gēla pārklājums pēc termiskās apstrādes emaljas pārklājumam E2 paaugstina ķīmisko izturību par aptuveni 30 % un E2S 3000 h – par aptuveni 40 %. Savukārt emaljas pārklājumiem E3 un E4 sola-gēla pārklājums ķīmisko izturību uzlabo par aptuveni 7 %.

Paraugiem ar un bez sola-gēla pārklājumiem tika noteikta termiskā izturība 600 °C (5. att.). Ik pēc 1000 h termiskās apstrādes pārklājumiem tika noteikta gaismas atstarošana. No iegūtajiem rezultātiem redzams, ka emaljas ar sola-gēla pārklājumu saglabā emaljas sākotnējās spektrālās īpašības (IV. tabula).

Emaljas un sola-gēla kompozītpārklājumi uzrādīja ievērojamu fotokatalītisko aktivitāti. Tomēr pēc ilgstošas pārklājumu termiskās apstrādes 600 °C tā samazinājās. E4S kompozītpārklājums pēc 6 h izturēšanas pie 600 °C degradēja MO 87 % apjomā, pēc 3000 h izturēšanas 38 %, bet pēc 6000 h izturēšanas – 33 % apjomā.



4. att. Ar un bez sola-gēla emaljas pārklājumu ķīmiskā izturība (masas zudumi, mg/cm²) pirms un pēc termiskās apstrādes 3000 h 600 °C.



Sola-gēla
pārklājums uz
emaljēta leģētā
tērauda

5. att. Fotoattēli ar un bez sola-gēla emaljas pārklājumiem pirms un pēc termiskās apstrādes 3000 h 600 °C.

IV. tabula
Emaljas pārklājumu gaismas atstarošana 300–2500 nm diapazonā

Paraugs	E1	E1S	E2	E2S	E3	E3S	E4	E4S
Pirms termiskās apstrādes (%)	29,96	31,84	30,68	31,18	29,7	29,95	7,01	7,03
Pēc termiskās apstrādes 3000 h 600 °C (%)	38,53	36,33	37,16	31,64	33,06	32,72	8,56	7,54

IV. SECINĀJUMI

Izmantojot tradicionālo emaljēšanas tehnoloģiju iespējams iegūt emaljas pārklājumu nerūsējošam hroma-niķeļa tēraudam. Caurules ar izstrādāto silikātemaljas pārklājumu izmantojamas kolektoriem saules starojuma akumulācijai un ūdens uzsildīšanai. Izstrādātais materiāls nodrošina pārklājuma saules radiācijas absorbciju un zemu siltuma izstarošanu apkārtējā vidē, kā arī 9000 h iztur augsttemperatūras koroziju 600 °C temperatūrā.

TiO₂-SiO₂ sola-gēla pārklājums izstrādātajai silikāststikla emaljai nodrošina augstu ķīmisko izturību sārmainā vidē, saglabājot emaljas sākotnējo mikrociētību un zemu gaismas atstarošanu. Pateicoties augsttemperatūras korozijas un ķīmiskajai izturībai, kā arī kompozītpārklājuma fotokatalītiskajai aktivitātei legētā tērauda izstrādājumi ar šādu pārklājumu izmantojami ne vien saules enerģijas kolektoriem, bet arī pārtikas rūpniecības un plaša patēriņa iekārtu elementiem (žāvētavās, kūpinātavās, grilos).

Pētījumu rezultātu novitāte apstiprināta ar trīs Latvijas Republikas patentiem un vienu Eiropas Savienības patentu.

REFERENCES

- [1] W. GlauBitt and P. LöBmann, "Antireflective coatings prepared by sol-gel processing: Principles and applications," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, no. 11, pp. 2995-2999, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.02.032>
- [2] J. Wang, J. Ge, H. Hou, M. Wang, G. Liu, G. Qiao, and Y. Wang, "Design and sol-gel preparation of SiO₂/TiO₂ and SiO₂/SnO₂/SiO₂-SnO₂ multilayer antireflective coatings," *Applied Surface Science*, vol. 422, pp. 970-974, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.133>
- [3] D. Wang and G. P. Bierwagen, "Sol-gel coatings on metals for corrosion protection," *Progress in Organic Coatings*, vol. 64, no. 4, pp. 327-338, Mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.010>
- [4] R.-G. Hu, S. Zhang, J.-F. Bu, C.-J. Lin, and G.-L. Song, "Recent progress in corrosion protection of magnesium alloys by organic coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 73, no. 2-3, pp. 129-141, Feb. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.10.011>
- [5] R. Figueira, I. Fontinha, C. Silva, and E. Pereira, "Hybrid Sol-Gel Coatings: Smart and Green Materials for Corrosion Mitigation," *Coatings*, vol. 6, no. 4, p. 12, Mar. 2016. <https://doi.org/10.3390/coatings6010012>
- [6] L. Pinho, F. Elhaddad, D. S. Facio, and M. J. Mosquera, "A novel TiO₂-SiO₂ nanocomposite converts a very friable stone into a self-cleaning building material," *Applied Surface Science*, vol. 275, pp. 389-396, Jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.142>
- [7] F. Gherardi, A. Colombo, M. D'Arienzo, B. Di Credico, S. Goidanich, F. Morazzoni, R. Simonutti, and L. Toniolo, "Efficient self-cleaning

- treatments for built heritage based on highly photo-active and well-dispersible TiO₂ nanocrystals," *Microchemical Journal*, vol. 126, pp. 54–62, May 2016. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.006>
- [8] Ministru kabineta rīkojums Nr. 129. Par Enerģētikas attīstības pamatnostādņēm 2016.-2020. gadam. "Latvijas Vēstnesis", 32 (5604), 16.02.2016. OP numurs: 2016/32.1
- [9] D. A. Baharoon, H. A. Rahman, W. Z. W. Omar, and S. O. Fadhl, "Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 996–1027, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.008>
- [10] Å. Andersson, O. Hunderi, and C. G. Granqvist, "Nickel pigmented anodic aluminum oxide for selective absorption of solar energy," *Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 1, pp. 754–764, Jan. 1980. <https://doi.org/10.1063/1.327337>
- [11] K. Vignarooban, X. Xu, A. Arvay, K. Hsu, and A. M. Kannan, "Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review," *Applied Energy*, vol. 146, pp. 383–396, May 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.125>
- [12] C. Atkinson, C. L. Sansom, H. J. Almond, and C. P. Shaw, "Coatings for concentrating solar systems – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 113–122, May 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.015>
- [13] C. A. Arancibia-Bulnes, C. A. Estrada, and J. C. Ruiz-Suárez, "Solar absorptance and thermal emittance of cermet with large particles," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 33, no. 19, pp. 2489–2496, Sep. 2000. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/19/320>
- [14] R. Karmhag, T. Tesfamichael, G. A. Niklasson, E. Wäckelgård, and M. Nygren, "Oxidation kinetics of nickel solar absorber nanoparticles," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 34, no. 3, pp. 400–406, Jan. 2001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/3/325>
- [15] H. J. Brown-Shaklee, W. Carty, and D. D. Edwards, "Spectral selectivity of composite enamel coatings on 321 stainless steel," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 8, pp. 1404–1410, Aug. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.03.009>
- [16] K. Valleti, D. M. Krishna, P. M. Reddy, and S. V. Joshi, "High temperature stable solar selective coatings by cathodic arc PVD for heat collecting elements," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 145, pp. 447–453, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.11.012>
- [17] H. D. Liu, Q. Wan, Y. R. Xu, C. Luo, Y. M. Chen, D. J. Fu, F. Ren, G. Luo, X. D. Cheng, X. J. Hu, and B. Yang, "Long-term thermal stability of CrAlO-based solar selective absorbing coating in elevated temperature air," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 134, pp. 261–267, Mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.12.009>
- [18] K. Malnieks, G. Mezinskis, I. Pavlovska, L. Bidermanis, and A. Pludons, "Optical, photocatalytical and structural properties of TiO₂ – SiO₂ sol-gel coatings on high content SiO₂ enamel surface," *Materials Science*, vol. 21, no. 1, Mar. 2015. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.1.5188>

- [19] А. Петцольд, Г. Пешманн, Эмаль и эмалирование. Москва, СССР: Металлургия, 1990.
- [20] L. Bīdermanis, J. Eiduks, P. Paukšs, "Emalja tēraudam," PSRS aut.apl. Nr. 391082, MKL C03C 704, 1973.
- [21] L. Bīdermanis, J. Liepiņš, G. Mežinskis, A. Cimmers, I. Pavlovskā, "Masa emalju tipa pārklājumam uz tērauda," LR Patents LV14401 B.Int.Cl.C03C 8/00, C23D 5/00, 2011.
- [22] J. Liepiņš, L. Bīdermanis, G. Mežinskis, I. Pavlovskā, A. Cimmers, L. Lindiņa, "Masa stikla-kristāliskas emaljas pārklājumam uz tērauda," LR Patents LV14504 B.Int.Cl C03C 8/00, C2390 1/00, 2012.
- [23] L. Bīdermanis, J. Liepiņš, G. Mežinskis, I. Pavlovskā, A. Cimmers, L. Lindiņa, "Masa kristāliskas emaljas pārklājumam uz tērauda," LR Patents LV14646A. Int.Cl C03C 8/00, 2013.
- [24] Eiropas patents EP 2 871 168 (B1) Mass of silicate enamel coating on steel. G. Mezinskis, L. Bidermanis, I. Pavlovskā, A. Cimmers, J. Liepins, K. Malnieks, J. Gabrusenoks. Publ. 21.12. 2016.
- [25] J. Kalnačs, V. Grehovs, G. Mežinskis, and L. Bidermanis, "A Calorimetric Method for Determination of Heat Capacity of Ceramics for Concentrated Solar Thermal Systems / Skenējošās Kalorimetrijas Metode Siltumietilpības Noteikšanai Saules Kolektoru Keramikā," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 50, no. 5, Jan. 2013. <https://doi.org/10.2478/lpts-2013-0034>
- [26] I. Pavlovskā, K. Malnieks, G. Mezinskis, L. Bidermanis, and M. Karpe, "Hard TiO₂-SiO₂ sol-gel coatings for enamel against chemical corrosion," *Surface and Coatings Technology*, vol. 258, pp. 206-210, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.027>
- [27] K. Malnieks, G. Mezinskis, and I. Pavlovskā, "Effect of Different Dip-Coating Techniques on TiO₂ Thin Film Properties," *Key Engineering Materials*, vol. 721, pp. 128-132, Dec. 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.721.128>
- [28] G. Mezinskis, I. Pavlovskā, K. Malnieks, L. Bidermanis, A. Cimmers, and P. Onufrijevs, "Sol-gel coated enamel for steel: 250 days of continuous high-temperature stability," *Ceramics International*, vol. 43, no. 3, pp. 2974-2980, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.060>
- [29] G. Mezinskis, L. Bidermanis, I. Pavlovskā, K. Malnieks, D. Larionova, and A. Zukuls, "High Silica Containing Enamels with Sol-Gel Films for Stainless Steel," In 7th Baltic Conference on Silicate Materials BaltSilica Book of Abstracts, 2016, p. 40.
- [30] K. Malnieks, G. Mezinskis, I. Pavlovskā, and L. Bidermanis, "Enamel as High Temperature Solar Light Receiver," In 6th Baltic Conference on Silicate Materials BaltSilica Book of Abstracts, 2014, p. 45.
- [31] K. Malnieks, G. Mezinskis, I. Pavlovskā, L. Bidermanis, and A. Pludons, "Black enamel for concentrated solar-power receivers," *Ceramics International*, vol. 40, no. 8, pp. 13321-13327, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.05.046>

Ilona Pavlovska, inženierzinātņu doktore (2007. g.), vadošā pētniece, docente. Baltijas valstu Silikātu materiālu konferences “BaltSilica” organizācijas komitejas un redkolēģijas locekle. Starptautiskās zinātniskās konferences “Inter-Academia” organizācijas komitejas locekle. Apbalvota ar Latvijas ZA prezidenta pateicības rakstu par 2016. g. sasniegumu lietišķajā zinātnē – jauna materiāla un tehnoloģijas izstrādi saules enerģijas kolektoriem.

E-pasts: ilona.pavlovska@rtu.lv
ORCID: 0000-0002-9295-6768

Gundars Mežinskis, *Dr. habil. sc. ing.* (1998. g.), Rīgas Tehniskās universitātes profesors (2000. g.), RTU Silikātu materiālu institūta direktors (2000. g.) un Silikātu augsttemperatūras un neorganisko nanomateriālu katedras vadītājs (2007. g.). 2017. g. 14. februārī apbalvots ar Latvijas ZA prezidenta pateicības rakstu par 2016. g. sasniegumu lietišķajā zinātnē – jauna materiāla un tehnoloģijas izstrādi saules enerģijas kolektoriem.

E-pasts: gundars.mezinskis@rtu.lv
ORCID: 0000-0002-6030-4247

Laimons-Paulis Bīdermanis, inženierzinātņu doktors (1977. g.), vadošais pētnieks. Apbalvots ar Latvijas ZA prezidenta pateicības rakstu par 2016. g. sasniegumu lietišķajā zinātnē – jauna materiāla un tehnoloģijas izstrādi saules enerģijas kolektoriem. Pēdējo 5 gadu laikā publicējis 6 zinātniskās publikācijas (SCOPUS), ieguvis 5 Latvijas Republikas patentus un viens Eiropas Savienības patentu.

E-pasts: laimons.bidermanis@rtu.lv
ORCID: 0000-0002-9141-1280

Gundars Mežinskis, Ilona Pavlovska, Laimons-Paulis Bīdermanis.

Sol-gel coating on enamelled alloy steel.

Keywords – enamel coatings for steel, sol-gel coatings, thermal properties, chemical properties, microhardness.

The stages of development of a new material and a technology for solar collectors are described. Pipes for parabolic-trough solar collectors (PTSC) must be able to withstand high temperatures for a long time without changing their microstructure and losing their original thermal characteristics. The scientists from the Institute of Silicate Materials (Riga Technical University) together with a specialist from the Institute of Solid State Physics (University of Latvia) have developed a technology that allows the production of PTSC solar-absorbing materials capable of withstanding 600 °C temperatures for at least 250 days. This material is based on glass-crystalline enamel coating on tubular stainless steel pipes. The high-temperature resistance was ensured not only by specific additives added to the frit of enamel coating, but also by a nanosized sol-gel coating over the enamel.