

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Klemenčič, R., 2015. Vakuusko okno in problem anodno varjenega gibljivega roba. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Košir, M.): 82 str.

Datum arhiviranja: 06-11-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Klemenčič, R., 2015. Vakuusko okno in problem anodno varjenega gibljivega roba. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Košir, M.): 82 pp.

Archiving Date: 06-11-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

ROBERT KLEMENČIČ

**VAKUUMSKO OKNO IN PROBLEM ANODNO
VARJENEGA GIBLJIVEGA ROBA**

Diplomska naloga št.: 519/SOG

**VACUUM WINDOW AND THE PROBLEM OF ANODIC
BONDING OF FLEXIBLE EDGE SEAL**

Graduation thesis No.: 519/SOG

Mentor:

doc. dr. Mitja Košir

Ljubljana, 30. 10. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Robert Klemenčič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Vakuumsko okno in problem anodno varjenega gibljivega roba«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 14. 10. 2015

Robert Klemenčič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.6:692.82:699.86(043.2)
Avtor:	Robert Klemenčič
Mentor:	doc. dr. Mitja Košir
Naslov:	Vakuumsko okno in problem anodno varjenega gibljivega roba
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - visoki strokovni študij
Obseg in oprema:	82 str., 10 pregl., 28 graf., 45 sl.
Ključne besede:	zasteklitev, medstekelni prostor, koeficient toplotne prehodnosti, prepustnost sončnega sevanja, prepustnost svetlobe, vakuumska zasteklitev, gibljivi rob, anodno varjenje, interferometrija, mehansko injektiranje, lasersko varjenje

Izvleček

V diplomskem delu je predstavljena vakuumska izolativna zasteklitev v primerjavi z izolativno zasteklitvijo, polnjeno z žlahtnim plinom. Predstavljen je tudi največji problem zasteklitve z vakuumom in podana je rešitev tega problema. V prvem delu naloge so prikazani vsi sestavni elementi izolativne in vakuumske zasteklitve. Prikazani in opisani so načini prehoda energije skozi obe zasteklitvi. Na podlagi nabora različnih materialov za zasteklitve smo opravili študijo gradbeno-fizikalnih parametrov zasteklitev v računalniškem programu WINDOW 7.2. S programom se je primerjalo izračun koeficienta toplotne prehodnosti, prepustnost sončnega sevanja in prepustnost svetlobe med vakuumsko in izolativno zasteklitvijo. V drugem delu naloge je predstavljena inovativna metoda gibljivega roba vakuumske zasteklitve. Gibljivi rob vakuumske zasteklitve se je razvijal na švicarskem inštitutu EMPA kot del projekta Winsmart, ki je bil sprejet na podlagi razpisa Sedmega okvirnega programa oziroma s kratico FP7. Problem današnjih vakuumsko izolativnih zasteklitev na trgu je togi rob. Temperaturna razlika na notranji in zunanji šipi okna vodi k različnemu temperaturnemu raztezu stekla, katerega posledica je upogibanje in zlom vakuumske izolativne enote. Projekt Winsmart premaga težave z uporabo gibljivega spoja na robu. Diplomsko delo vsebuje rezultate različnih testiranj izdelave gibljivega roba ter povzročenih stresov na steklu zaradi postopka anodnega varjenja, ki je nujen za izdelavo gibljivega spoja. Izdelalo se je tudi tri vakuumske zasteklitve z inovativno metodo gibljivega roba, s predstavitvijo njihovih napak in pomanjklivosti.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	691.6:692.82:699.86(043.2)
Author:	Robert Klemenčič
Supervisor:	Assist. Prof. Mitja Košir, Ph.D.
Title:	Vacuum window and the problem of anodic bonding of flexible edge seal
Document type:	Graduation Thesis - Higher professional studies
Scope and tools:	82 p., 10 tab., 28 graph., 45 fig.
Keywords:	glazing, pane interspace, heat transfer coefficient, transmission of solar radiation, transmission of light, vacuum insulated glazing, flexible edge seal, anodic bonding, interferometry, mechanical injection, laser welding

Abstract

The thesis presents vacuum insulated glazing in comparison to the insulating glass unit filled with inert gas. It describes the biggest problem of vacuum insulated glazing and presents solution. The first part describes component elements of a vacuum insulated glazing and insulating glass unit. Presented are all of the modes of energy transition through the glazing unit. Using various of glazing materials, we perform the calculations of construction physical parameters of glazing units in computer program WINDOW 7.2. With the program we compare coefficient of heat transfer, the transmission of solar radiation and the transmission of light between vacuum insulated glass and insulation glass unit. Second part of the thesis presents the innovative method of flexible edge sealing for vacuum insulating glass. Flexible edge was developed in Swiss Federal Institute EMPA as a part of Winsmart project which was accepted inside the Seventh framework programme or short EP7. Today's vacuum insulated glass unit on the market contains rigid edge seal. The temperature differences between the inner and outer pane causes the problem of differential expansion of the panes, which with a large temperature differences leads to bending and also breaking vacuum insulated glass unit. Winsmart project overcomes these problems by using the flexible edge seal. The thesis contains results of various tests made by developing the method and also the problems that we encounter by anodic bonding which is crucial to the flexible edge. We made three vacuum insulating glass units containing the innovating flexible edge which are presented including with there problems and weaknesses.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Mitji Koširju za vso pomoč in podporo v času nastajanja diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi svoji družini in prijateljem za pomoč in podporo v času študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA.....	V
1. UVOD.....	1
2. ODKRITJE STEKLA.....	2
2.1. Lastnosti stekla	2
2.2. Delitev stekla v sedem večjih skupin	2
2.3. Izdelava stekla	4
2.4. Vrste stekla, ki sestavljajo okno	4
3. ZASTEKLITEV	7
3.1. Načini prehoda toplote skozi zasteklitev	7
3.2. Izolativne sposobnosti zasteklitve	9
3.3. Vakuumsko izolativna zasteklitev	10
4. OKNO.....	12
4.1. Prostor med stekli.....	12
4.2. Distančniki.....	12
4.3. Okensko krilo in okvir.....	15
4.4. Zakaj vakuumska zasteklitev (VIG).....	16
4.4.1. Prednosti vakuumske zasteklitve.....	16
4.4.2. Slabosti vakuumske zasteklitve.....	16
5. PRIMERJALNA ŠTUDIJA GRADBENO-FIZIKALNIH PARAMETROV ZASTEKLITEV V PROGRAMU WINDOW	18
5.1. Nabor materialov in izračun v programu Window	18
5.2. Razlaga rezultatov	19
5.3. Uporaba vakuuma v primerjalni študiji	20
6. PROJEKT WINSMART	21
6.1. Namen projekta	21
6.1.1. Naloge projekta.....	21
6.1.2. Partnerji pri projektu Winsmart.....	22
6.2. Winsmart zasteklitev	23
6.2.1. Gibljivi rob	23

6.2.2.	Priprava zlitine	24
6.2.3.	Varjenje stekla s steklom.....	26
6.2.4.	Varjenje stekla in kovine.....	27
6.3.	Vzorci za preizkus trdnosti zavara	28
6.3.1.	Izdelava vzorcev.....	29
6.3.2.	Ročno testiranje s postopkom lupljenja.....	30
6.3.3.	Mehansko testiranje strižne trdnosti.....	36
6.3.4.	Mehansko testiranje s postopkom lupljenja	43
6.4.	Stresi na stekleni površini	62
6.4.1.	Interferometrija.....	62
6.4.2.	Ponovna interferometrija.....	63
6.4.3.	Rezultati interferometrije	64
6.5.	Priprava šipe za vgradnjo zlitine	65
6.5.1.	Priprava šipe 500 mm x 500 mm.....	65
6.5.2.	Komora za vzdrževanje atmosfere zaščitnega plina.....	66
6.5.3.	Kontrola debeline zvara	66
6.6.	Vgradnja zlitine za postopek anodnega varjenja.....	68
6.6.1.	Uporaba žice.....	68
6.6.2.	Injektiranje s pomočjo hidrostatičnega tlaka.....	69
6.6.3.	Mehansko injektiranje	69
6.7.	Izdelava gibljivega roba	73
6.7.1.	Predpriprava vozička na postopek injektiranja.....	74
6.7.2.	Postopek gretja in mehanskega injektiranja	74
6.7.3.	Anodno varjenje in hlajenje vzorca.....	74
6.8.	Izdelava zasteklitve VIG z gibljivim robom	75
6.8.1.	Lasersko varjenje dveh kovinskih folij	75
7.	ZAKLJUČEK.....	79
	VIRI.....	81

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjalna študija različnih zasteklitev v programu WINDOW 7.2	18
Preglednica 2: Ročno testiranje (različno odstranjevanje oksidne plasti s kovinske folije)	31
Preglednica 3: Ročno testiranje (različni časovnimi intervali ogrevanja in pričetki varjenja)	32
Preglednica 4: Ročno testiranje (uporaba kovinske folije iz bakra)	34
Preglednica 5: Ročno testiranje (različen čas pričetka varjenja in konstantna dolžina ogrevanja)	34
Preglednica 6: Vzorci z uporabo kositrne prevleke na kovinski foliji Dilaton 51	38
Preglednica 7: Vzorci z uporabo nikljeve prevleke na kovinski foliji Dilaton 51	39
Preglednica 8: Vzorci z uporabo bakrene prevleke na kovinski foliji Dilaton 51	40
Preglednica 9: Najvišje dosežene sile, pridobljene s postopkom lupljenja za posamezni vzorec	61
Preglednica 10: Razlike v radijih za vzorce postopka lupljenja	64

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Toplotni prehod skozi VIG zasteklitev pri nižanju zračnega pritiska.....	20
Grafikon 2: Postopek anodnega varjenja za vzorec strižne trdnosti z vsebnostjo SnAl 0,2 %	30
Grafikon 3: Odpornost zvara glede na različne časovne intervale	33
Grafikon 4: Vzorci z 80-minutnim gretjem na temperaturi 300 °C, za zlitino z 0,005 % aluminija	35
Grafikon 5: Vzorci z 80-minutnim gretjem na temperaturi 300 °C, za zlitino z 0,01 % aluminija	35
Grafikon 6: Vzorci strižne trdnosti s kositrno prevleko	38
Grafikon 7: Vzorci strižne trdnosti z nikljevo prevleko	40
Grafikon 8: Vzorci strižne trdnosti z bakreno prevleko	41
Grafikon 9: Srednje vrednosti strižnih trdnosti za vse tri kovinske prevleke.....	42
Grafikon 10: Rezultat testa lupljenja za vzorec R210 z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	45
Grafikon 11: Rezultat testa lupljenja za vzorec R211 z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	46
Grafikon 12: Rezultat testa lupljenja za vzorec R212 z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	47
Grafikon 13: Rezultat testa lupljenja za vzorec R214 z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	48
Grafikon 14: Rezultat testa lupljenja za vzorec R200 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	49
Grafikon 15: Rezultat testa lupljenja za vzorec R201 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	50
Grafikon 16: Rezultat testa lupljenja za vzorec R225 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	51
Grafikon 17: Rezultat testa lupljenja za vzorec R226 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	52
Grafikon 18: Rezultat testa lupljenja za vzorec R202 z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	53
Grafikon 19: Rezultat testa lupljenja za vzorec R205 z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	54
Grafikon 20: Rezultat testa lupljenja za vzorec R206 z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	55
Grafikon 21: Rezultat testa lupljenja za vzorec R207 z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	56
Grafikon 22: Rezultat testa lupljenja za vzorec R219 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	57
Grafikon 23: Rezultat testa lupljenja za vzorec R221 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	58
Grafikon 24: Rezultat testa lupljenja za vzorec R223 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	59
Grafikon 25: Rezultat testa lupljenja za vzorec R224 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	60
Grafikon 26: Najvišje dosežene sile, pridobljene s postopkom lupljenja ter raztros podatkov.....	61
Grafikon 27: Anodno varjenje vzorca velikosti 500 mm x 500 mm (0,0075 % aluminija).....	75
Grafikon 28: Izguba podtlaka v VIG zasteklitvi z gibljivim robom.....	78

KAZALO SLIK

Slika 1: Prehod sončne energije skozi zastekljene površine.....	8
Slika 2: Mehanizmi prenosa toplote skozi zasteklitve.....	9
Slika 3: VIG okno s togim robom	10
Slika 4: Prerez okna pri IGU zasteklitvi.....	13
Slika 5: Prerez VIG zasteklitve z distančniki med obema steklenima površinama.....	14
Slika 6: Prerez lesenega krila in okvirja s trojno zasteklitvijo.....	15
Slika 7: Primerjava VIG zasteklitve s togim in gibljivim robom	17
Slika 8: Prerez gibljivega roba Winsmart okna	24
Slika 9: Vakuumska komora za taljenje kovine	25
Slika 10: Postopek anodnega varjenja stekla s steklom.....	26
Slika 11: Varjenja dveh steklenih površin z vmesnim medijem zlitine (SnAl 0,6 %)......	27
Slika 12: Postopek anodnega varjenja kovine s steklom	28
Slika 13: Grafični prikaz naprave za testiranje vzorcev strižne trdnosti	37
Slika 14: Vzorec R215 za postopek lupljenja (SnAl 0,02 %), s predhodno analizo interferometrije ...	43
Slika 15: Grafični prikaz naprave za testiranje vzorcev s postopkom lupljenja	44
Slika 16: Vzorec R210 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	45
Slika 17: Vzorec R211 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	46
Slika 18: Vzorec R212 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	47
Slika 19: Vzorec R214 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija.....	48
Slika 20: Vzorec R200 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	49
Slika 21: Vzorec R201 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	50
Slika 22: Vzorec R225 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	51
Slika 23: Vzorec R226 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija.....	52
Slika 24: Vzorec R202 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	53
Slika 25: Vzorec R205 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	54
Slika 26: Vzorec R206 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	55
Slika 27: Vzorec R207 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija.....	56
Slika 28: Vzorec R219 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	57
Slika 29: Vzorec R221 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	58
Slika 30: Vzorec R223 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	59
Slika 31: Vzorec R224 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija.....	60
Slika 32: Primer izmere radija na stekleni površini vzorca R210 (program μ Shape (TM) Profession .	62
Slika 33: Visoka refleksija na anodnem zvaru vzorca R211 (program μ Shape (TM) Professional)	63
Slika 34: Refleksija na premazu platine vzorca R211 (program μ Shape (TM) Professional)	64
Slika 35: Sestavljena komora za izdelovanje vzorcev velikosti 500 mm x 500 mm	66
Slika 36: Peč v vgrajeno komoro, ki omogoča injektiranje, ter napravo za spuščanje uteži	67
Slika 37: Kvadratasta utež znotraj komore s privitim vijakov v vogalu.....	67
Slika 38: Razlitje zlitine v vogalu iz oksidirane plašča žice	68

Slika 39: Voziček znotraj peči za mehansko injektiranje.....	70
Slika 40: Elektromotor z mehanizmom za premikanje vozička.....	71
Slika 41: Elektromotor za injektiranje zlitine.....	71
Slika 42: Izpopolnjevanje mehanskega injektiranja na vzorcu 500 mm x 500 mm.....	73
Slika 43: Postavitev distančnikov na spodnjo šipo Winsmart okna velikosti 500 mm x 500 mm.....	76
Slika 44: Prevelika oddaljenost laserskega varjenja od roba steklene površine.....	76
Slika 45: Zasteklitev okna Winsmart (500 mm x 500 mm) ter izmera tlaka v medstekelnem prostoru	77

----- Stran je namenoma prazna -----

1. UVOD

Okno je vizualni delilnik, ki povezuje notranjost z zunanostjo. Omogoča kontrolo in regulacijo pretoka svetlobe. Oblikuje se ga lahko tako, da se po želji odpira in zapira, ter tako tvori neodvisni gradbeni element. Njegova pozicija, velikost in oblika so ključni elementi oblikovanja notranjosti prostorov. Z njim lahko kontroliramo in reguliramo pretok svetlobe. V obliki sestavnega elementa zgradbe mora okno predstavljati uspešno ločitev notranjih klimatskih pogojev od zunanjih. Pri tem mora zagotavljati zvočne, toplotne in hidroizolacije lastnosti za udobje bivalnih prostorov. Zaradi tega pogoja enojne zasteklitve oken ne ustrezajo današnjim zahtevam. V zadnjih nekaj letih se je veliko raziskovalo na področju t. i. izolativnih zasteklitev oziroma z angleško kratico IGU (Isolation Glass Unit), kjer se uporablja dvojna ali večslojna zasteklitve. Pri tem je prostor med stekli zapolnjen z zrakom ali plinom, ki deluje kot toplotni izolator, na steklih pa so nanoseni razni kovinski nanosi (t. i. nizkoemisijski ali »low-e« nanosi), ki prav tako izboljšajo izolativne lastnosti zasteklitve (Deplazes A. 2008). Z vsebnostjo plina kot toplotnega izolatorja okna še vedno dosegamo slabo izolativno sposobnost v primerjavi z ostalimi deli stavbnega ovoja. Prihodnost izolacije okna je vakuum, ki deluje kot izjemno dober toplotni izolator v primerjavi z izolacijskimi materiali na trgu. Prednost ključnega pomena vakuumske izolacije je izjemno majhna širina ter nizka teža, kar je za zasteklitve izjemno pomembno.

V prvem delu naloge bom izpostavil prednosti in slabosti vakuumskega okna ter ga primerjal z obstoječimi tehnologijami z gledišča gradbeno-fizikalnih lastnosti (U, g in LT vrednosti). Izdelal bom tudi parametrično študijo med obstoječimi produkti v primerjavi z vakuumsko izolativnim oknom s pomočjo programa WINDOW 7.2 (Lawrence Berkley National Laboratory, 2014). V drugem delu naloge bom predstavil primer inovativnega stika, ki sestavlja gibljivi rob t. i. vakuumsko izolativnega okna oziroma z angleško kratico VIG (Vacuum Insulating Glass), kateri je bil del projekta Winsmart (Evropska unija v okviru programa Seventh Framework Programme 2012). Ta del projekta, pri katerem sem sodeloval, je potekal na inštitutu EMPA (Swiss Federal Laboratories for Material Science and Technology) v Švici. Podal bom rezultate, ki smo jih pridobili pri testiranju vzorcev ter opisal njihove pomankljivosti. Posvetil se bom začetnim problemom, s katerimi sem se soočal pri izdelavi roba, ter predstavil končni avtomatizirani postopek izdelave gibljivega roba VIG okna.

2. ODKRITJE STEKLA

Prvo odkritje stekla naj bi pripisali pomorskim trgovcem na ozemlju reke Belus na današnji obali Sirije. Zgodba pravi, da je ladja polna nitruma (boraks) pristala na obali. Pri tem so pomorščaki želeli pripraviti jed, vendar niso našli kamnov za podporo loncev med kuhanjem, zato so prinesli kepe nitruma z ladje. Kepe so bile izpostavljene vročini ognja in v kombinaciji s peskom z obale so ustvarile prosto iztekanje prozorne neznane tekočine. Tako naj bi iznašli prvo steklo (Rasmussen S. C. 2012).

Prvo razmeroma čisto steklo so izdelovali Rimljani. Prve ravne steklene plošče so poskušali narediti s pomočjo kamnitih valjev, posutih s peskom, kar je na površini stekla ustvarjalo značilne vzorce. Tovrstno steklo še ni bilo primerno za zasteklitev oken. Po propadu Rimskega cestarstva se je razvoj stekla nadaljeval v islamskem svetu. Okoli leta 1000 so začeli izdelovati barvano prozorno steklo za cerkve, po katerem so bili znani zlasti bizantinski mojstri. Pred tem so v Siriji iznašli v 7. stoletju n. š. enostaven in cenen način izdelave okenskih stekel. Na drugo stran napihnjene steklene balona so pritaknili palico imenovano puntil, odlomili balon od pihalke in ga hitro vrteli okoli puntila. Tako se je ustvarila ploščica v obliki prozornega krožnika, ki je na mestu odstranitve puntila imel "krono". Tako oblikovano okensko steklo so imenovali "kronsko steklo". Večina okenskih stekel do 19. stoletja je narejenih na podoben način. Metoda je kasneje doživela izpopolnitev. Namesto kronskega stekla v obliki "krožnika" so izdelali stekleno cev z dnem, na katerem je bil puntil. Dno so odrezali, plašč pa prerezali po dolgem in izravnali. Tako so iztočasno dobili krožno kronsko ploščico in pravokotno ploščico. Obe sta bili uporabni za zasteklitev oken (Žarnić R. 2005).

2.1. Lastnosti stekla

Steklo je superviskozna tekočina, ki vsebuje predvsem kremen in enega ali več kovinskih oksidov v amorfem oz. nekristalnem stanju. Steklo se običajno mehča pri temperaturi 700 °C. Zaradi amorfnosti zgradbe je steklo značilno prozorno in svetlikavo. Ojači se lahko z vstavljanjem kovinskih mrežic in polimernih folij ter s toplotno in kemično obdelavo. Značilna lastnost stekla je lomni količnik, ki je razmerje sinusov vpadnega in odbojnega kota svetlobe. Osnovna surovina stekla je kremenčev pesek (SiO_2) okoli 74 %, sode (Na_2CO_3) 12 %, apnenec (CaCO_3) 8 % ter 6 % drugih snovi (Žarnić R. 2005).

Steklo ima gostoto okoli 2500 kg/m³. Tlačna trdnost stekla je zelo visoka, okoli 950 MPa, upogibna trdnost pa znaša okoli 40 Mpa. Trdota stekla se giblje okoli 400–600 kg/mm². Natezna trdnost znaša od 30 do 70 MPa za palico premera 10 mm. Koeficient toplotnega raztezka je v primerjavi s kovinami zelo nizek $\alpha_t = 0,5$ do $9 \cdot 10^{-6}$ °C. V zadnjih letih se steklo v gradbeništvu uporablja tudi kot nosilni material.

2.2. Delitev stekla v sedem večjih skupin

Stekla se delijo v sedem večjih skupin glede na njihovo sestavo in lastnosti:

- natrij-kalcijevo
- borosilikatno

- aluminosilikatno
- kremenčevo
- svinčeno
- čisto kremenčevo
- pirokeramično steklo

Natrij-kalcijevo

Tako steklo vsebuje natrijeve in kalcijeve okside, ki znižujejo tališče in ovirajo kristalizacijo. Znižanje tališča bistveno pripomore k proizvodnji stekla iz osnovnih surovin.

Borosilikatno

Pri tovrstnih steklih je večji del apna in sode zamenjan z borovim oksidom (B_2O_3) in zato imajo ta stekla majhen toplotni raztezek. Stekla so notranje zelo krhka, a se dajo ojačiti s površinskimi utrditvami.

Aluminosilikatno

Je kot lahek in močan kompozitni material – angl. Fiberglass, ki se uporablja predvsem za rezervoarje, čolne, ribiške palice itd.

Kremenčevo

Pri izdelavi stekla so pričeli dodajati kremen v prahu. S tem so močno izboljšali lomne lastnosti stekla.

Svinčeno

Kremenčevemu steklu so kasneje pričeli dodajati tudi svinec, ki je še dodatno izboljšal kvaliteto stekla. Tako steklo ima tudi veliko elastičnost in se lahko obdeluje, vendar ni odporno proti segrevanju.

Čisto kremenčevo

Je sestavljeno iz čistega kremenca. Od drugih stekel se razlikuje po tem, da ne vsebuje sestavin, ki se običajno dodajajo v proizvodnji stekla.

Pirokeramično steklo

To steklo ni povsem amorfno kot ostala stekla, temveč ga sestavljajo fini skupki kristalov, ki se tvorijo s kontrolirano kristalizacijo stekla. Značilna je skoraj popolna neporoznost in zaradi tega tudi visoka odpornost na udarce.

Vsa stekla so zelo dober električni izolator. Odporna so na večino lugov in kislin ter so zelo higijenična. Zaradi teh lastnosti se uporabljajo v laboratorijih, raziskovalnih inštitutih in zdravstvu. Steklo kot snov nima dobrih toplotnoizolativnih lastnosti. Koeficient toplotnega prehoda (U) za steklo debeline 4 mm znaša okoli $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.3. Izdelava stekla

Leta 1675 je George Ravenscroft iznašel kristalno steklo, izdelano s pomočjo svinčevega oksida. Ta steklu daje izredno mehko ter lažjo obdelavo. Leta 1688 so izpopolnili metodo ravnega stekla, tako da so ga zlivali na železno površino. Ravnali pa so ga s posebnimi valji. Končni izdelek je imel grobo neravno površino, katero so naknadno brusili in polirali.

Osnova za izdelavo vseh vrst sodobnih stekel je float steklo. Angleška beseda 'float' pomeni v slovenščini 'plavati' in dobro opisuje osnovni princip tovrstne izdelave. Za izdelavo float stekla se ustrezno pripravljene surovine (čistost, granulacija) v natančno določenih utežnih razmerjih z mešanjem pripravi za vsip v talilno peč. Dnevno je treba zmešati (odvisno od kapacitete peči) od 300 do 850 ton surovin. Celoten proces doziranja, mešanja in vsipanja je povsem avtomatiziran. V prvem delu talilne peči, kjer znaša temperatura 1560 °C, se surovine stalijo. V zadnjem delu peči, kjer je temperatura 1100 °C, se steklena talina (v talilni kadi je običajno do 1900 ton taline) bistri. V naslednji, najpomembnejši fazi, stekleno maso v obliki neskončnega traku prelijemo v kad s tekočim kositrom. Gre za izjemno pomemben fizikalni pojav, da se idealno ravni površini najbolj približa površina mirujoče tekočine. Zaradi površinske napetosti se steklo razlije po tekočem kositru in s spodnjo površino prilagodi površini kositra. Hkrati se s plamenskim poliranjem toplotno obdela tudi zgornja stran steklenega traku. Če bi tok stekla prepustili fizikalnim zakonitostim (površinska napetost, viskoznost, gostota), bi samodejno nastalo 5,5 mm debelo steklo. Debelejše ali tanjše steklo dobimo tako, da z zobatimi kolesi, ki na robovih segajo v stekleni trak, povečamo ali zmanjšamo hitrost toka stekla. Rezultat opisanega postopka je neskončen stekleni trak z enako planparalelnostjo, kot jo ima kristalno steklo. V zadnji, najbolj kritični fazi, stekleni trak zapusti kad s tekočo kovino in nadaljuje pot prek valjev v hladilnem kanalu. Za proizvodnjo steklenih plošč brez notranjih napetosti je treba hitrost ohlajanja skrbno nadzirati. Drugi del ohlajanja poteka na zraku. V tej fazi steklenemu traku odrežemo robove. Na koncu transporta, ko je temperatura steklenega traku enaka temperaturi okolice, steklo prečno razrežemo na standardne pravokotnike, ki merijo 600 x 321 cm (Hajdinjak R. 2009).

2.4. Vrste stekla, ki sestavljajo okno

Različna stekla so se razvijala postopoma, glede na razvoj in potrebe. V gradbeništvu so začeli uporabljati stekla, ko so razvili tehniko izdelave ravnega stekla. Pred tem se je steklo uporabljalo bolj za okrasne namene ter ornamentne posode. Po dosegu višje kakovosti pa se je steklo začelo uporabljati tudi kot konstrukcijski material. Poznamo več vrst zasteklitve, ki se delijo glede na način uporabnosti.

Barvna stekla

Ta stekla so razvili predvsem v srednjem veku. Uporabljala so se za okrasne namene, predvsem kot barvna zasteklitve oken cerkva. Izdelavo takih stekel se doseže z dodajanjem različnih kovinskih oksidov, ki steklu dajo značilno barvo. Z dodajanjem bakra tekočemu steklu se pridobi zelena barva, z zlatom pridobimo na steklu rdečo barvo, z manganom škrlatno, kobalt poda modro barvo ter srebro rumeno. S takimi stekli so sestavljali vitražne zasteklitve na oknih cerkva.

Ornamentna stekla

V ta stekla se vtiska vzorec, ko je steklo še v mehkem stanju. Značilno je vtiskovanje vzorcev s posebnimi valji. Bolj gost je vzorec, bolj motno steklo pridobimo na koncu. Značilna ornamentna stekla so tudi peskana ter jedkana stekla. Pri prvem postopku se z visokim pritiskom odstrani zgornjo površino stekla. Pri tem dobimo motno steklo. Z jedkanjem pa se ena stran stekla pomoči v kislino, katera odstrani zgornjo plast. Pri obeh postopkih pridobimo motno steklo.

Ogledala

Izdelujejo se s postopkom nanosa tanke kovinske plasti na eno izmed strani stekla. Nekdaj so uporabljali amalgam oziroma zmes kositra in živega srebra. Taka ogledala so bila seveda strupena. V današnjem času pa se uporablja srebrni nitrat.

Varnostna stekla

Varnostna stekla se delijo na več vrst. Njihova uporaba je v današnjem času zelo razširjena. Uporabljajo se tako za varovanje premoženja kot tudi za varnost ljudi, ki so v neposredni bližini takih stekel. Poznamo več vrst varnostnih stekel.

- **Žična**

Takšnih stekel se skoraj ne uporablja več. V steklo, ki je še v tekočem stanju, se vstavi tanko žico. Žica ne prispeva bistveno k njegovi nosilnosti. Namenjena je predvsem zadrževanju stekla na mestu po razbitju, ter preprečuje izpadanje večjih steklenih površin. V današnjem času jih vse bolj nadomeščajo kaljena ali lamelirana stekla.

- **Lamelirana**

Med dve stekleni površini se ustavi dodatno plast, ki je po navadi iz polivinil butila. Ta deluje kot dodatna ojačitev, stekleni plošči pa se obnašata, kot da bi imeli armirano sredino. Lamelirana stekla lahko sestavlja več plasti stekel ter vmesnih ojačitvenih plasti. Taka stekla so zelo odporna na udarce, saj vmesni del deluje kot armatura. Po razbitju stekla ostanejo v enem kosu zaradi ojačitvene plasti, ki preprečuje izpadanje posameznih delov.

- **Kaljena**

Kaljenje stekla se doseže po dveh značilnih postopkih. Pri prvem se steklo segreje malo nad 600 °C, da ne pride do izgube predhodne oblike. Nato se steklo hladi z oljem ali hladnimi curki zraka. Pri tem se obe zunanji površini stekla naglo ohlajata brez ohladitve notranje plasti. Notranjost steklene površine se ohlaja počasi ter privede do velikih tlačnih napetosti na zunanjem ter nateznih napetosti na notranjem delu takega stekla. Drugi način se izvaja s kemičnim postopkom. Steklo se pomaka v kemijsko raztopino iz kalijevega klorida. Kalijeve atomi zamenjajo natrijeve na površini takega stekla. Ker so kalijeve atomi večji, pride do podobnega učinka tlačnih napetosti na zunanji površini stekla. Kaljena stekla so delno odporna na udarce ter bolj žilava od običajnih stekel. Problem se pojavi, če se tako steklo opraska ali kakor koli drugače poškoduje. Majhne praske na steklu pa zaradi velikih napetosti v samem steklu privedejo do popolnega razpada, ki pa se razleti na zelo majhne koščke. Koščki niso tako ostri kot pri navadnih steklih ter so značilne zaobljene oblike. Na takem steklu kasnejših sprememb ni mogoče opravljati, zato je potrebno predhodno izvrtati oziroma izrezati

potrebne dele stekla pred postopkom kaljenja. Taka stekla se uporabljajo predvsem v avtomobilski industriji, očalih, ograjah, vratih, varnostnih steklih in tuš kabinah.

Nizkoemisijška stekla

Da bi združili enkratno transparentnost stekla z odlično emisijško spodobnost kovin, se na steklo nanašajo tanke kovinske plasti. Na ta način steklo ohrani visoko prepustnost za svetlobo in energijo sončnega sevanja, hkrati pa se zaradi njegove nizke emisijške spodobnosti močno zmanjšajo toplotne izgube.

Poznamo dve osnovni vrsti izdelovanja nizkoemisijških oziroma angleško Low-e stekel. Pri prvi se steklo prevleče z izredno tanko funkcionalno plastjo. Ker je nanos neparjen, je zelo občutljiv in njegovo površino zelo hitro mehansko poškodujemo, zaradi vlage v okolju pa bi na poškodovanih mestih kovine v nanosu takoj oksidirale. Take premaze imenujemo nizkoemisijško steklo z mehkim nanosom in jih ni mogoče uporabljati za enojne zasteklitve, temveč le za nadaljno sestavo za toplotno zaščitno izolacijsko zasteklitev. Nizkoemisijško steklo s trdim nanosom je druga vrsta low-e zasteklitve. Pri tem postopku se med proizvodnjo float stekla, in sicer na delu, kjer vroč stekleni trak zapusti kad s tekočim kostirom, nanj enakomerno razprši kositrni prah. Zaradi toplotne energije stekla se prah razgradi in s kisikom iz ozračja ustvari polprevodno plast kositrovega oksida, ki se kot emajl trdno veže s površino stekla. Taka izdelava nizkoemisijškega premaza omogoča, da se stekla naknadno kalijo, upogibajo ali vgrajujejo kot enojno steklo.

Sončnozaščitna stekla

So po konceptu enaka kot nizkoemisijška stekla, s tem da so namenjena povečani zaščiti pred IR delom spektra sonca. Na stekla se nanašajo sloji, ki odbijajo sončne žarke. Sodobne visoke selektivne zasteklitve imajo na notranji strani zunanega stekla mehki večpastni nanos različnih kovin. Z ustreznim kombiniranjem teh plasti se lahko doseže, da nanos deluje sončno in toplotnozaščitno ter ima željeno barvo. Vsa sončnozaščitna stekla imajo slabost, da se jim z manjšanjem prepustnosti sončne energije manjša tudi prepustnost vidne svetlobe.

3. ZASTEKLITEV

V stanovanjske objekte vgrajujemo toplotnozaščitne zasteklitve, s čimer zmanjšamo toplotne izgube skozi steklo, hkrati pa si želimo čim večje prepustnosti za sončno sevanje, s čimer je omogočeno pasivno izkoriščanje sončne energije v zimskem času. Zasteklitve, za katere je značilna visoka prepustnost za sončno sevanje, pa lahko v poletnem času privedejo do pregrevanja stavb, zato je ključnega pomena uporaba različnih senčil na zunanji strani. Pri zastekljevanju velikih površin, pri katerih se srečujemo pri gradnji poslovnih prostorov in industriskih objektov, bi z uporabo toplotnozaščitnih stekel tako dosegli veliko pregrevanje bivalnih prostorov. Ker uporaba senčil na zunanji strani teh objektov ni mogoča, moramo zato uporabiti stekla, ki prepuščajo manj sončne energije.

3.1. Načini prehoda toplote skozi zasteklitve

Koeficient toplotnega prehoda

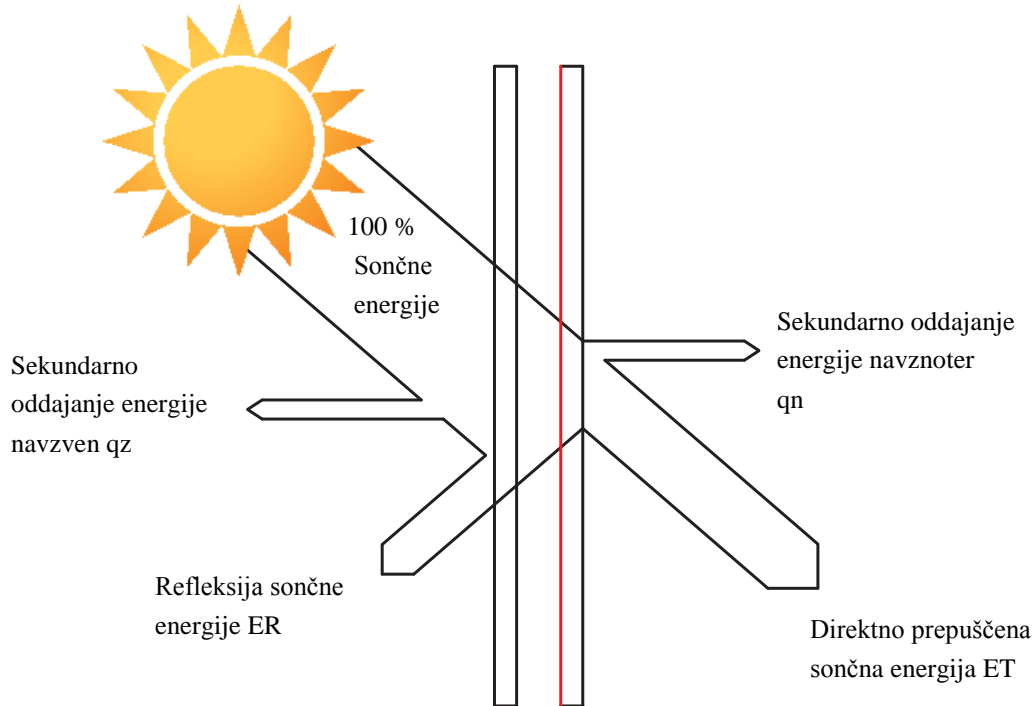
Koeficient toplotnega prehoda skozi različne dele okna je osrednja fizikalna količina, katero označujemo z U-vrednostjo ter predstavlja prehod toplotne energije skozi različne gradbene elemente. Z upoštevanjem toplotnega prehoda skozi celotno okno koeficient označujemo z U_w . Označuje količino toplote, ki prehaja skozi 1 m^2 površine okna, pri temperaturni razliki 1°K . Čim manjša je vrednost U, tem boljša je toplotna izolativnost. Fizikalna enota za merjenje U-vrednosti je $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Koeficient toplotnega prehoda skozi zasteklitve okna označimo z U_g , skozi okenski okvir pa z U_f .

Prepustnost za celotno sončno sevanje

Prepustnost sončnega sevanja (EN 410:2011) se deklarira z g-vrednostjo, katera podaja vrednost skupnega prehoda sončne energije skozi zasteklitve. Vrednost g se podaja v odstotkih. Pri upoštevanju skupnega prehoda sončne energije skozi steklo upoštevamo sevanje celotnega sončnega spektra (sončni žarki z valovnimi dolžinami od 300 do 2500 nm). Obsevano steklo del sončne energije odbije, ta del imenujemo refleksija energije ter ga označujemo z ER; del jo absorbira (absorpcija energije) – EA; preostanek pa direktno prehaja skozi kot transmisija energije – ET. Absorbirana energija ogreje steklo, to pa pri ohlajanju omenjeno energijo odda deloma navzven – q_z , preostanek pa v notranjost – q_n (Slika1).

V poslovnih zgradbah želimo torej doseči čim nižjo g-vrednost zaradi velike zasteklitvene površine, pri individualnih zgradbah pa čim višjo vrednost, za izkoriščanje pasivne sončne energije. Vrednost g sestavljata direktno prepuščena energija (ET) ter sekundarno oddana energija q_n .

$$g = ET + q_n$$



Slika 1: Prehod sončne energije skozi zastekljene površine

Vir: <http://www.reflex.si>

Prepustnost svetlobe

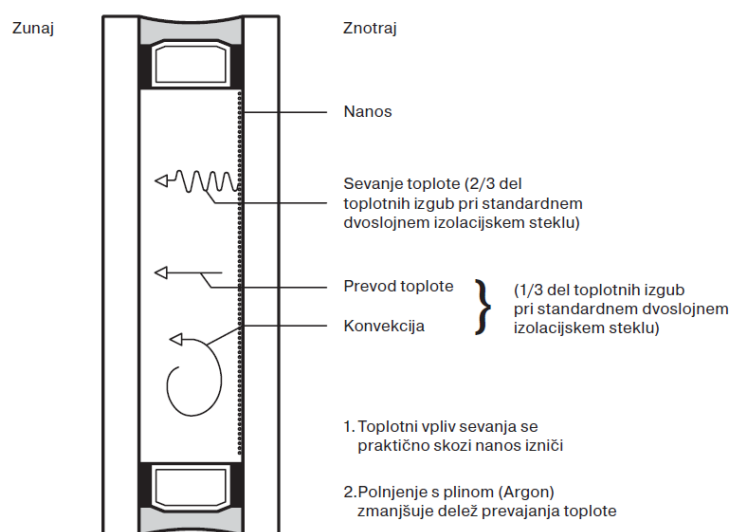
Stopnja prepustnosti svetlobe je definirana v odstotkih. Ta vrednost nam pove, koliko odstotkov vidnega dela sončnega sevanja (od 380 do 780 nm) prodre skozi določeno zasteklitev. Prepustnost svetlobe označujemo z LT , je odvisna od debeline stekla, njegove kemijske sestave, v primeru nanosa na steklu pa tudi od njegovih lastnosti. Osnovna velikost 100 % prepustnosti ustreza nezastekljeni gredbeni odprtini.

Emisijska vrednost

Emisijsko vrednost (ϵ) običajnega stekla je zelo visoka ter znaša okoli 0,84. Koeficient nam pove, da običajno steklo s sevanjem odda približno 84 % prejete energije. Čim nižja je emisijska sposobnost stekla, tem boljša je U -vrednost. Znižujemo jo s kovinskimi premazi oziroma nanosi na stekleni površini. Nekatera toplotnozaščitna in sončnozaščitna stekla dosežejo zaradi nanosov emisijsko sposobnost med 0,1 ter 0,02. Taka stekla imenujemo z angleško kratico Low-e stekla (nizkoemisijnsko steklo – angl. Low-Emissivity Glass). Upoštevati je potrebno, da z nižanjem nizkoemisijnske vrednosti zmanjšujemo prepustnost sončnega sevanja v notranjost prostorov.

Konvekcija

To je način prenosa toplote skozi tekočine ali pline, kateri omogočajo izmenjavo molekul. Ko se molekule zraka segrejejo, postanejo lažje ter obratno – hladne postanejo težje, kar povzroči hitrejši prenos toplote. Pri IGU oknih se s tem problemom srečujemo pri prostoru med stekli, ta je razviden na spodaj prikazani sliki 2. Tak način prenosa toplote preprečujemo z izolativnimi plini. Težji je plin po molekulski masi, težje ga je pripraviti do konvekcijskega gibanja, kar pomeni težji prenos toplote skozi takšno okolje.



Slika 2: Mehanizmi prenosa toplote skozi zasteklitve

Vir: <http://www.reflex.si>

Kondukcija

Pri kondukciji se srečujemo s prenosom načina toplote skozi material. Torej se nam toplota materiala dvigne, tudi če je samo del materiala izpostavljen toploti. Ta način prenosa toplote bi lahko opisali, da molekule v samem materialu prenašajo toploto druga na drugo. Pri oknu se srečujemo s to težavo predvsem na delu distančnika, ki omogoča stikovanje dveh steklenih površin. Zaradi tega izdelujemo distančnik v majhnih dimenzijah ali za njegovo izdelavo uporabimo izolativne materiale.

3.2. Izolativne sposobnosti zasteklitve

Novejše zgradbe strmijo k čim večji zasteklitvi površine, k prepuščanju naravne svetlobe v prostor ter stiku z zunanostjo. Obenem pa to predstavlja zelo veliko slabost v toplotni izolaciji take zgradbe. Novejše zgradbe dosegajo skozi stene fasade, ki vsebujejo 200 mm ali več toplotnoizolativnega materiala, vrednosti U okoli $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pri oknih, ki so trenutno na trgu, se še vedno srečujemo s slabo toplotno izolacijo v primerjavi s preostalim delom hiše. Kakovostna okna na trgu dosegajo vrednost U_w okoli $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vendar okno ne moremo obravnavati kot steno, saj predstavlja pomemben člen pri osvetljevanju in distribuciji svetlobe v notranjost stavbe. Večanje zastekljenih površin na južnem delu hiše je zelo ugodno, saj zaradi solarnih pritokov zmanjšujemo porabo energije za ogrevanje. Seveda z večanjem zastekljenih površin povečujemo transmisijske izgube, vendar so v primerjavi s solarnimi dobitki manjše. Enak ukrep na severni strani hiše pomeni povsem obraten učinek. Na tem delu namreč ne prihaja do direktnega sončnega sevanja, tu se nam pojavlja samo difuzna svetloba. S tem povečamo transmisijske izgube skozi zastekljene površine. Torej z zasteklitvijo na severni strani povečujemo izgube energije za ogrevanje.

3.3. Vakuumsko izolativna zasteklitev

Zgodba z vakuumsko izolativnimi zasteklitvami se je začela že leta 1913, ko je prišlo do zamisli VIG okna. Nato pa je trajalo skoraj 80 let, da je profesor Richard E. Collins iz univerze v Sydneyu izdelal VIG okno, ki se je pojavilo tudi na trgu. Takoj ko je bilo prvo okno na trgu, pa je več raziskovalnih inštitucij iz Rusije, Japonske, Švice, ZDA, Francije in Nemčije začelo razvijati svoje postopke izdelave VIG zasteklitev. Pri visokem vakuumu dobimo odlične temperaturno-izolativne lastnosti ter lahko za VIG zasteklitev dosegamo celo vrednosti U_g nižje od $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, vendar tako velik podtlak povzroča velike obremenitve ter posledično velike težave pri izdelavi. Mnogi so v razvoju naleteli na slepe ulice ter ga zato prekinili.

Vakuum omogoča izjemno dobre zvočne kot toplotno-izolativne lastnosti. Pri visokemu podtlaku se približujemo obremenitvi 10 t/m^2 stekla. Torej je za tako okno potrebno uporabiti steklo visoke kakovosti, že majhna poškodba pa lahko privede do popolne porušitve. Dodatni problem pri takšni zasteklitvi je toplotni raztezek stekla. Tega povzroča velika temperaturna razlika na obeh šipah sestavljenega okna, ki je posledica izjemno dobrih toplotno-izolativnih lastnosti vakuumu.



Slika 3: VIG okno s togim robom

Vir: www.pilkington.com

Pred leti sta pričeli izdelovati VIG zasteklitve dve podjetji. Prvo podjetje je Beijing Synergy Vacuum Glazing Technology Co. iz Kitajske, drugo je Pilkington iz Velike Britanije, čigar lastnik je podjetje Nippon Sheet Glass Spacia Co. iz Japonske. Na zgornji sliki 3 je prikazano VIG okno podjetja Pilkington, ki ima tako imenovano okno Spacia na trgu že nekaj let. Iz slike je razvidna šoba za izsesavanje zraka ter distančniki med obema šipama.

Na današnjem trgu lahko od obeh podjetij kupimo razmeroma velika VIG okna dimenzij tudi do $2,400 \text{ mm} \times 1,350 \text{ mm}$, ki pa ne vsebujejo zelo velikega vakuumu. Koeficient U_g tako dosega vrednosti okoli $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ali celo višje. To pa pomeni zelo slabe izolativne sposobnosti glede na uporabo vakuumu.

Obe podjetji izdelujeta okno po podobnem postopku. Sprva s steklom nizkega tališča zavarijo oziroma vakuumsko zatesnijo rob obeh stekel, ki sestavlja okno. Nato čez posebno sesalno šobo – angl. pump-out tube, ki je predhodno izvrtana v steklo, izsesajo zrak ter ustvarijo visok vakuum. Šobo zavarijo oziroma zalijejo s steklom nizkega tališča, ki ima dobre kohezijske lastnosti z ostalim steklom, ki sestavlja zasteklitev. Pri takem postopku nam ostane vidna okrogla deformacija velikosti okoli 1,2 cm, ki zastira pogled skozi okno.

4. OKNO

Okno je element, sestavljen iz zasteklitve in okvirja z dodatnimi elementi pritrjevanja in odpiranja. Okvir sestavlja podboj in krilo. Zasteklitve bivalnih in delovnih prostorov so sestavljene iz dveh ali več stekel. Enojna zasteklitve pa ne ustreza današnjim standardom in zahtevam glede izolativnih lastnosti ter ni namenjena uporabi za zasteklitve bivalnih prostorov. Uporabljajo se okna z dvojno ali večslojno zasteklitvijo.

4.1. Prostor med stekli

Medstekelni prostor se zapolni z enim izmed žlahtnih plinov, ki zmanjša konvekcijske izgube skozi zasteklitve. Zaradi cenovne ugodnosti se ponavadi za žlahtni plin uporablja argon, ki ima 34 % boljšo toplotno izolativnost v primerjavi z zrakom. Na trgu se lahko dobi tudi okna, ki vsebujejo kripton ali celo ksenon, ki omogočata veliko boljšo toplotno izolacijo, vendar sta plina v primerjavi z argonom tudi veliko dražja.

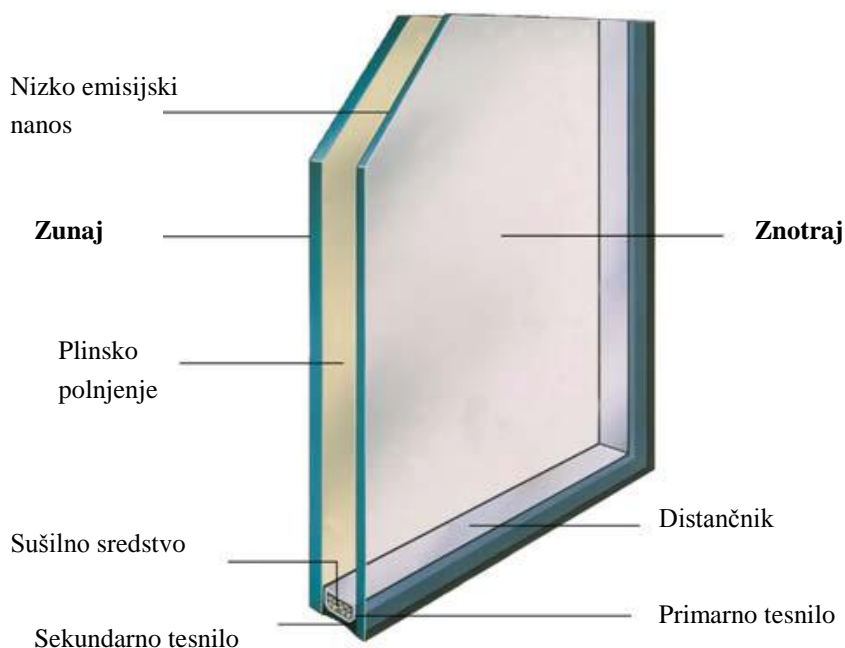
VIG okno je sestavljeno iz dveh steklenih površin, ki sta med seboj na robu zatesnjeni s posebnim postopkom varjenja stekla z nižjim tališčem. Pri takih oknih iz vmesnega prostora izsesamo zrak na zračni pritisk nižji od 10^{-3} mbar. Na ta način v vmesnem prostoru skoraj ni več delcev zraka, ki bi prenašali toploto preko konvekcije in kondukcije, ter pridobimo izjemno dobre toplotno izolativne lastnosti skozi zastekljeni del takšnega okna.

4.2. Distančniki

Vmesni medstekelni prostor ločuje distančnik z namenom razporeditve steklenih plošč na določeno razdaljo, obenem pa preprečuje izmenjavo zraka med zunanostjo in medstekelnim prostorom. Pri kakovostnih oknih na trgu se uporablja distančnik iz plemenitega jekla ter izolativnega materiala (t. i. TGI distančniki). Slednji se uporablja samo za IGU okna, kjer distančnik poteka po robu stekla. Plemenito jeklo ima manjšo toplotno prevodnost v primerjavi z ostalimi kovinami, zaradi njegovih izjemnih fizikalnih lastnosti pa se lahko izdeluje v veliko manjši izvedbi v primerjavi z ostalimi distančniki. Še vedno pa stikovanje obeh steklenih površin povzroča toplotni most, katerega želimo preprečiti. Najbolj enostaven način preprečitve toplotnega mostu pri IGU oknih se preprečuje z okenskim okvirjem, ki sega preko distančnika.

Distančnik pri IGU zasteklitvah

Slika 4 prikazuje distančnik pri IGU oknih, ki ima nalogo preprečevati uhajanje izolativnega plina, kateri zapolnjuje medstekelni prostor. Distančnik preprečuje tudi dostop vlage v medstekelni prostor. Za čim boljše tesnenje je distančnik sestavljen z upogibanjem enega kosa. Notranjost votlih distančnikov se zapolni s sušilnim sredstvom (molekularna sita), ki učinkovito odstrani vlago v medstekelnem prostoru takoj po vgraditvi.



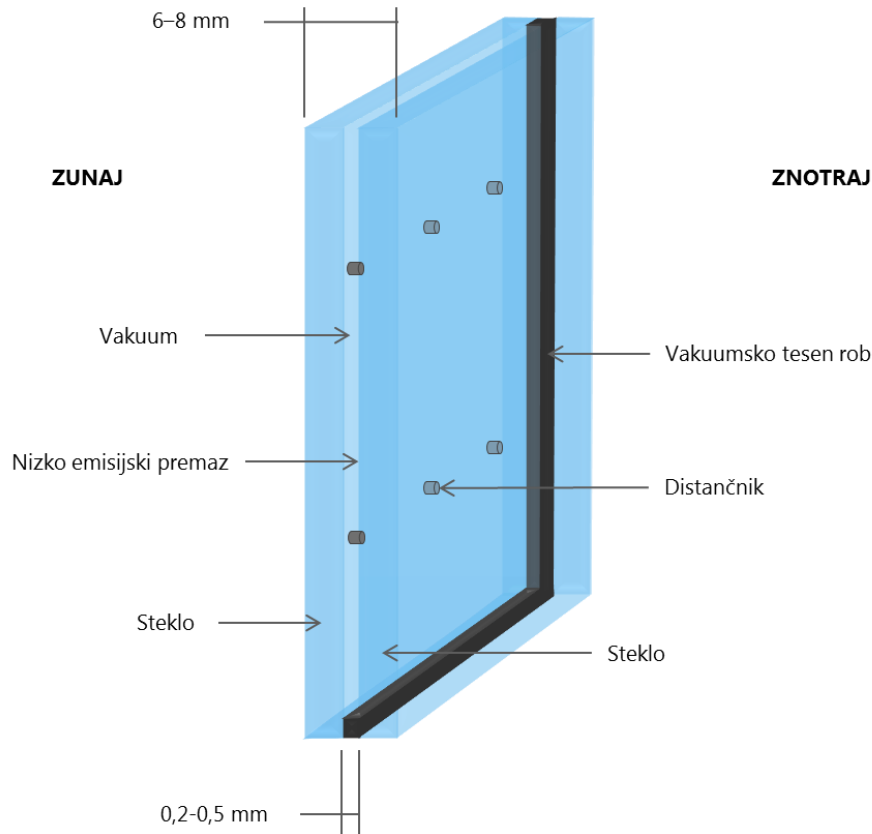
Slika 4: Prerez okna pri IGU zasteklitvi

Vir: <http://www.reflex.si>

Distančnik pri VIG zasteklitvah

Pri VIG oknu imamo velike pritiske, ki delujejo na samo steklo. Zato se v vmesni del med obema stekloma po celotni površini razporedi distančnike – angl. Spacers. Pri IGU oknih seveda tega koncepta ne uporabljamo, saj nam na stekleno površino ne deluje tako velika obtežba.

Distančniki imajo pri VIG oknih nalogo podpirati oziroma držati dve stekleni površini, ki sestavljata okno na določeni razdalji, kot prikazuje slika 5. Pomembno je, da podpirajo steklo kot nekakšni podporni stebri, ki omogočajo steklu prenašati velike tlačne obremenitve zaradi vakuuma. Ohranjati je potrebno natančno določeno razdaljo med obema stekloma, kajti samo na ta način dosežemo izjemno dobre toplotno izolativne lastnosti VIG zasteklitve.



Slika 5: Prerez VIG zasteklitve z distančniki med obema steklenima površinama

Distančniki predstavljajo toplotni most med obema stekloma ter s tem nižajo U-vrednost celotne zasteklitve. Seveda tak toplotni most poizkušamo v največji meri minimalizirati z minimalnim številom ter pametno izbiro materiala. Pri običajnih VIG oknih z negibljivim robom je moč uporabiti distančnike iz keramike. Pri VIG oknu z gibljivim robom, kjer stekleni površini konstantno drsita po površini distančnikov, bi jo lahko le-ti zaradi svoje izjemne trdote sčasoma poškodovali ter je zato potrebno uporabiti nerjavo jeklo. Uporabljajo se distančniki valjaste oblike, za kakovostna okna pa cilindrične oblike. Distančniki iz nerjavega jekla so velikosti okoli 0,5 mm, razporejeni pa so na razdalji od 20 mm do 40 mm. Take razdalje se upošteva za steklo debeline 3–4 mm. Pri uporabi stekla večje debeline pa se njihovo število lahko tudi zmanjša.

Distančniki se nahajajo med obema steklenima površinama ter morajo biti zato čim manjših dimenzij, da ne zastirajo pogleda skozi tako okno. Do sedaj so se uporabljali distančniki cilindrične oblike, ki so točkovno zelo obremenjeni, zato je potrebno uporabljati večje dimenzije. Nove raziskave so pokazale, da se veliko bolje obnesejo distančniki polžaste oblike, ki so tanjši ter so zaradi te lastnosti tudi manj vidni. Dodatno pa so polžasti distančniki manj podvrženi prevrnitvi zaradi premikov, steklo pa podpirajo na veliko večji površini.

4.3. Okensko krilo in okvir

Okensko krilo ima večnamensko funkcijo, ker podpira oziroma drži okensko steklo na svojem mestu, obenem pa omogoča odpiranje okna na predelu krila in okvirja. Z odpiranjem okna seveda omogočamo zračenje bivalnih prostorov, še posebej novejših zgradb, ki so veliko bolj zatesnjene v primerjavi s starejšo gradnjo.

Okensko krilo in okvir, ki sta kot prerez dela okna prikazana na spodnji sliki 6, naj bi imela vsaj tako dobre izolacijske sposobnosti kot zasteklitev, ki je vgrajena v okvir. Koeficient U_f se razlikuje glede na material, debelino, razporeditev prekatov (pri plastičnem ali kovinskem okvirju) v okvirju in dodatno zapolnitvijo le-teh z izolativnimi materiali. Problem se pojavi s tesnjenjem okna na predelu odpiranja ter seveda prehod toplote na predelu stikovanja stekla in okenskega okvirja. Upoštevati moramo toplotni prehod čez celotno okno, ki zaradi omenjenega toplotnega mostu pogosto dosega veliko slabše izolativne lastnosti v primerjavi s posameznimi deli okna.



Slika 6: Prerez lesenega krila in okvirja s trojno zasteklitvijo

Vir: www.jelovica-okna.si

Poznamo več vrst okenskih okvirjev, ki pa imajo isti namen uporabe. Sestavljajo jih lahko različni materiali. Glede na vrsto materiala, ki sestavlja okenski okvir, delimo:

- lesene,
- PVC,
- aluminijaste,
- kombinacija aluminija in lesa,
- kombinacija aluminija in PVC.

Okvirji iz PVC-ja ali aluminija vsebujejo prekate, ki izboljšajo njihovo toplotno izolativnost. Take prekate pa se lahko dodatno zapolni z različnimi izolativnimi materiali. Aluminijasti okvirji so značilni po vmesnem prekinitvenem elementu. Toplotna prehodnost je zaradi uporabe aluminija predvsem odvisna od izvedbe detajla prekinitve toplotnega mostu. Tega se preprečuje oziroma omejuje z uporabo prekinitvenega elementa. Prekinitveni element je lahko votel ali pa zapolnjen s poliuretanskimi penami, kjer je najbolj pomembna širina elementa ter prostor znotraj elementa. Aluminijasti okvirji se uporabljajo predvsem pri poslovnih in industrijskih objektih.

4.4. Zakaj vakuumska zasteklitev (VIG)

Pri sedanji gradnji smo se veliko posvetili izolativnosti fasade, mansarde ter tudi podkletenih prostorov, še vedno pa nam ostaja problem zastekljenih delov objekta. Po trditvah Natural Resources Defense Council izgubljammo še vedno tretjino vse energije skozi okna (<http://www.nrdc.org/living/energy>). Na podlagi tega se je Evropska unija odločila investirati ter odpreti projekt Winsmart (EU v okviru Sedmega okvirnega programa – angl. Seventh Framework Programme, 2012) za izvedbo boljše zasteklitve.

4.4.1. Prednosti vakuumske zasteklitve

Pri prvih testiranjih VIG okna se je izkazalo, da dobimo približno petkrat boljšo toplotno izolativnost v primerjavi z okni, ki so sedaj na trgu. IGU okna z uporabo kriptona ali celo ksenona lahko dosegajo zelo dobre izolativne sposobnosti, vendar taka okna za splošno uporabo ne pridejo v poštev. Problem se pojavi pri izjemno visokih stroških izdelave. Večslojna IGU okna pa ne izpodbija samo cenovna razlika, vendar tudi velikost in teža. Za dobro izolativnost pri standardnih oknih se uporablja troslojno ali celo mnogoslojno zasteklitev z uporabo nizkoemisijjskih premazov. Taka okna imajo posledično zaradi premazov majhno prepustnost za naravno svetlobo, kar ima vpliv na psihofizično počutje ljudi (Košir M. 2011). Njihova ogromna teža pa dodatno povzroča probleme pri odpiranju zastekljenih površin. V primerjavi z IGU zasteklitvijo lahko pri VIG zasteklitvi dosegamo U_g vrednost manjšo od $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pri VIG zasteklitvi se namreč uporablja dvoslojna zasteklitev ter zelo majhen vmesni prostor. Glede na te karakteristike uporabljenega materiala je teža okna ter sama debelina (med 0,5 cm do 1 cm) v primerjavi z IGU neprimerljiva.

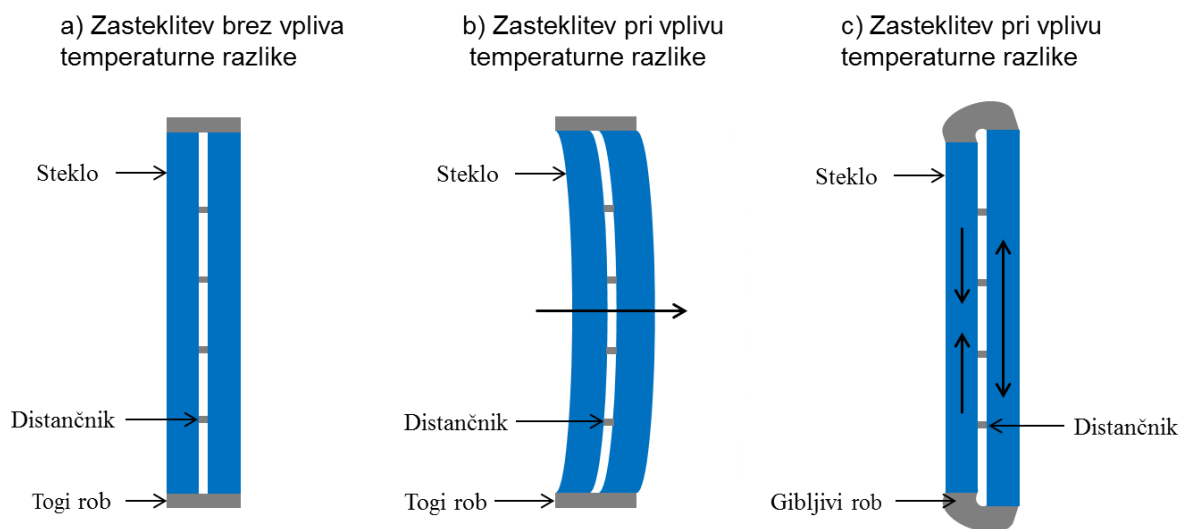
Kot že omenjeno, je zaradi redkosti kriptona in ksenona cena zelo visoka. Problem pri IGU oknih, zapolnjenih s plinom, pa je tudi distančnik, kateri drži steklo na določeni razdalji ter tesni oziroma preprečuje iztekanje plina. Čeprav se v zadnjem času uporablja zelo kakovostna tesnila, proizvajalci zatrjujejo, da izgubimo do 1 % izolativnega plina na leto v taki zasteklitvi, kar posledično s časom doprinese k veliko manjši U_g vrednosti.

4.4.2. Slabosti vakuumske zasteklitve

Zavedati se moramo, da že majhna poškodba na zvaru steklenih površin oziroma odprtina, ki se pojavi, privede do izgube vakuuma oziroma do vdora zraka v medstekleni del. Pri pojavu poškodbe, ki bi povzročila izgubo vakuuma, bi pripeljalo do izjemno slabega koeficienta U_g . Ogromni pritiski niso

edina težava, s katero se soočamo pri konceptu VIG okna. Zaradi dobrih izolativnih lastnosti se nam pojavijo velike temperaturne razlike stekla na zunanji in notranji strani. Pri tem pride do velikih deformacij stekla, ki so posledica toplotnega raztezka ($\alpha_t = 0,5 \text{ do } 9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$). Ta pojav privede do velikih napetosti v steklu zaradi togega roba, ki ne dopušča pomikov. Prikaz na sliki 7 a.

Zaradi temperaturnih razlik na notranji in zunanji strani okna se pojavijo natezne obremenitve ene in tlačne obremenitve druge šipe okna. Zaradi negibljivega roba se nam sile ne morejo izničiti, zato se zasteklitev prične upogibati, kot prikazuje slika 7 b. Pri višjih temperaturnih razlikah deformacija privede do tako velikega upogiba, da nam steklo počne. Upoštevati moramo, če se taka zasteklitev uporablja pri višjih zgradbah, lahko razbito steklo poškoduje ljudi ne samo v notranjosti bivalnih prostorov, temveč tudi v njegovi neposredni okolici.



Slika 7: Primerjava VIG zasteklitve s togim in gibljivim robom a) Togi rob brez razlike v temperaturi, b) Togi rob pri spremembi temperature, c) Gibljivi rob pri spremembi temperature

To nas privede do gibljivega roba, kateri dopušča pomike obeh steklenih površin okna. Rob mora biti dovolj močan, da prenaša velike obremenitve zaradi visokega zračnega podtlaka, ter dovolj popoln, da preprečuje vdor zunanjega zraka. Gibljivi rob bi moral v idealnem oknu dopuščati zelo velike premike steklenih površin. Steklene površine se bi namreč pri gibljivem robu premikale ob vsaki spremembi temperature kot prikazuje zgornja slika 7 c. Torej bi morali upoštevati, da bi se steklene površine premikale tudi večkrat dnevno. Tako okno naj bi imelo življenjsko dobo več kot 30 let, kar privede do velikega problema pri načrtovanju.

5. PRIMERJALNA ŠTUDIJA GRADBENO-FIZIKALNIH PARAMETROV ZASTEKLITEV V PROGRAMU WINDOW

Primerjalno študijo smo izvedli z računalniškim programom WINDOW 7,2 (Lawrence Berkeley National Laboratory 2014), kjer smo za izračunanje vrednosti uporabili nabor podatkov, ki jih podaja program. Obravnavali smo različne zasteklitve velikosti 1000 mm x 1000 mm. Postopek izračuna je potekal tako, da smo izbrali in sestavili različne zasteklitve. Za zasteklitve smo uporabili različna stekla ter različne polnitve medstekelnega prostora. Iz izbranih vrst zasteklitvev sem nato uporabil za izračun toplotnega prehoda skozi zasteklitve (U_g), prepustnost sončnega sevanja (g) ter prepustnost vidne svetlobe (LT).

5.1. Nabor materialov in izračun v programu Window

V izračunu smo uporabili stekla proizvajalca Pilkington, ki je tudi izdelovalec vakuumske zasteklitve. Tako smo za zasteklitve brez premaza uporabili šipo (OptifloatClear.NSG) debeline 4 mm. Pri zasteklitvi z uporabo nizkoemisijskega premaza pa smo uporabili dve različni šipi z različno nizko emisijsko vrednostjo. Prva šipa (EclAdvClr6.LOF) vsebuje emisijsko vrednost 0,209 ter sem jo v preglednici označil NESa (nizkoemisijsko steklo a) in je debeline 5,9 mm. Drugo šipo (LOW-E_5.LOF) z emisijsko vrednostjo 0,158 sem označil NESb (nizkoemisijsko steklo b) debeline 4,7 mm.

Za izračun smo v programu za vse vrste zasteklitvev upoštevali standarde po Evropskem komiteju za standardizacijo (CEN) ter vpadni kot sončnega sevanja 90° . Pri sestavljenih zasteklitvah (IGU) sem za medstekelni prostor uporabil velikost 15 mm z izolativnim plinom argon, ki vsebuje 5 % zraka. Pri zasteklitvah, navedenih v preglednici 1 pod točkami 6–9, se je za izolacijo uporabil vakuum, kjer je medstekelni prostor velikosti 0,2 mm. Pri zasteklitvi 6 in 7 se je za vakuumsko izolacijo uporabila velikost 10^{-3} mbar oziroma 0,001 normalnega zračnega pritiska. Pri takem podtlaku dosežemo toplotno prevodnost v velikosti $0,1068 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pri zasteklitvah, navedenih pod točkama 8 in 9, se je za vakuumsko izolacijo uporabila velikost 10^{-5} mbar, ki je enakovredna toplotni prevodnosti $0,001068 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Preglednica 1: Primerjalna študija različnih zasteklitvev v programu WINDOW 7.2

	Zasteklitvev	Sestava [mm]	Skupna debelina [mm]	Emisijski premaz na steklu	MSP	Emisijski premaz na steklu	MSP	Emisijski premaz na steklu	U_g [$\text{W/m}^2\text{K}$]	g [%]	LT [%]
1	Brez premaza	4/15/4	23,00	0,84	zrak	0,84	-	-	2,753	79	82
2	NESa	5,9/15/4	24,92	0,209	argon	0,84	-	-	1,635	58	62
3	NESb	4,7/15/4	23,72	0,158	argon	0,84	-	-	1,519	66	75
4	NESa 3	5,9/15/4/15/4	43,92	0,209	argon	0,84	argon	0,84	1,205	53	57
5	NESb 3	4,7/15/4/15/4	42,72	0,158	argon	0,84	argon	0,84	1,138	60	69
6	NESa (10^{-3} mbar)	5,9/0,2/4	10,12	0,209	vakuum	0,84	-	-	1,229	57	62
7	NESb (10^{-3} mbar)	4,7/0,2/4	8,92	0,158	vakuum	0,84	-	-	1,078	65	75
8	NESa (10^{-5} mbar)	5,9/0,2/4	10,12	0,209	vakuum	0,84	-	-	1,165	57	62
9	NESb (10^{-5} mbar)	4,7/0,2/4	8,92	0,158	vakuum	0,84	-	-	1,009	65	75

V prvem stolpcu preglednice 1 je pri prvi zasteklitvi pod točko 1 navedena opomba »Brez premaza«, kar pomeni, da je taka zasteklitev brez nizkoemisijskega premaza. Ostale zasteklitve vsebujejo premaz na notranjem steklu, na površini, ki se nahaja v medsteklenemu prostoru. Pri trojni zasteklitvi se premaz nahaja na notranjem steklu zunanje površine, sredinsko in zunanje steklo pa ne vsebujeta premaza. Oznaka z imenom zasteklitve, ki vključuje številko 3 v stolpcu »Zasteklitev«, pomeni trojno zasteklitev okna.

5.2. Razlaga rezultatov

Iz preglednice je razvidno, da se vrednosti U_g , g in LT zelo razlikujejo glede na vrsto zasteklitve. Faktor U_g se izjemno zniža z uporabo plina namesto zraka v medstekelnem prostoru, ter z dodatno uporabo nizkoemisijskih premazov. Prav tako se vrednost U_g zniža z uporabo trojne zasteklitve.

Primerjava zasteklitev, polnjenih z argonom

Trojna zasteklitev ne glede na višino nizkoemisijskega premaza v primerjavi z dvojno zasteklitvijo, polnjeno z argonom, podaja najboljše U_g vrednosti. Tako ima trojna zasteklitev NESa 3 v primerjavi z dvojno zasteklitvijo NESa za 26 % boljše vrednosti U_g , v primerjavi z zasteklitvijo NESb 3 ter NESb pa za 25 % boljše vrednosti.

Pri trojni zasteklitvi opazimo spreminjanje prepustnosti svetlobe (LT), ki se spreminja z različnimi nizkoemisijskimi premazi. Nižanje koeficienta emisijske sposobnosti na steklu ne pogojuje nižanje vrednosti LT , kot je to očitno s primerjavo med zasteklitvijo NESa in NESb, kjer sta se uporabili zasteklitvi z različnimi premazi. Prav tako se posledično ne nižajo vrednosti g z nižanjem vrednosti emisijskih premazov.

Primerjava vakuumske zasteklitve in zasteklitve, polnjene z argonom

Velika razlika se pojavi pri vrednosti U_g , kjer pridejo do izraza dobre izolativne sposobnosti vakuumu. Tako se nam z enako dvojno zasteklitvijo NESa v primerjavi med argonom in vakuumom velikosti 10^{-3} mbar spremeni U_g za vrednost $0,406 \text{ W/m}^2\text{K}$ oziroma 25 %. Pri uporabi vakuumu velikosti 10^{-5} mbar dosežemo 29 % boljše vrednosti. V primerjavi z zasteklitvijo NESb U_g vrednost pri vakuumu 10^{-3} mbar doseže 29 % boljše vrednosti, pri uporabi 10^{-5} mbar pa 34 %.

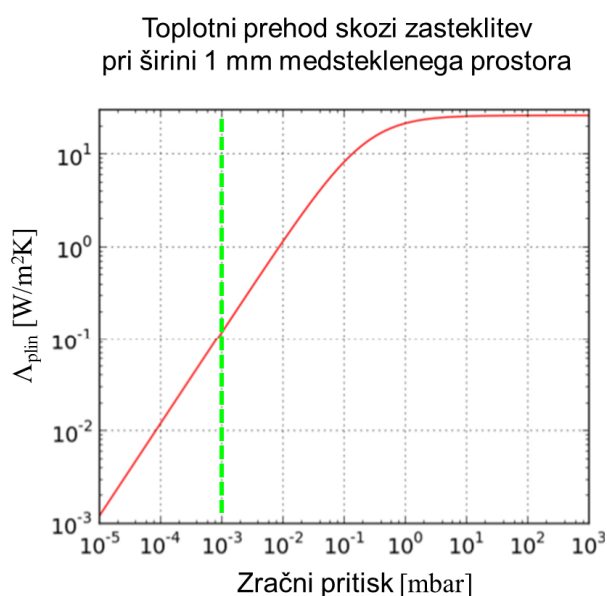
V primerjavi z vakuumom NESa 10^{-3} mbar ima trojna zasteklitev NESa 3 U_g vrednost boljšo za 2 %, pri uporabi vakuumu 10^{-5} mbar pa slabše za 3 %. V primerjavi NESb 3 in dvojne vakuumske zasteklitve NESb 10^{-3} mbar ima vakuumska zasteklitev U_g vrednost boljšo za 5 %, v primerjavi z NESb 10^{-5} mbar pa za 11 %. Torej lahko na podlagi podatkov trdimo, da je med vakuumsko zasteklitvijo 10^{-3} mbar in trojno zasteklitvijo vrednost U_g zelo podobna, pri uporabi 10^{-5} mbar pa se nam vrednosti U_g močno izboljšajo.

Pri dvojni zasteklitvi, pri kateri se v medstekelnem prostoru nahaja vakuum v primerjavi z argonom, se nam vrednosti LT ne spremeni. Torej uporaba plina ne vpliva na prepustnost svetlobe. Vrednosti LT in g z večslojno zasteklitvijo močno padajo. V primerjavi NESb 3 in vakuumske zasteklitve NESb 10^{-5} mbar pridobimo pri slednji 6 % večjo prepustnost svetlobe. Pri zasteklitvi NESa 3 ter NESa 10^{-5} mbar nam vakuumska zasteklitev prepušča 5 % več vidne svetlobe. Torej z dvojno vakuumsko

zasteklitvijo (10^{-5} mbar) pridobimo višjo prepustnost svetlobe v notranjost prostorov ter prav tako veliko nižji koeficient toplotnega prehoda (U_g), tudi v primerjavi s trojno zasteklitvijo.

5.3. Uporaba vakuuma v primerjalni študiji

V primerjalni študiji sta se uporabila dva različna vakuuma v višini 10^{-3} mbar ter 10^{-5} mbar. Veliko slabše izolativne sposobnosti vakuuma dosegamo pri zračnem pritisku 10^{-3} mbar. Tako visok podtlak se uporablja pri zasteklitvah VIG, katere sestavlja togi rob. Z dodatnim nižanjem zračnega pritiska pridobimo mnogo boljše vrednosti toplotnega prehoda kot prikazuje grafikon 1.



Grafikon 1: Toplotni prehod skozi VIG zasteklitev pri nižanju zračnega pritiska

Vir: Projekt Winsmart 2015 (European Smart Windows Conference, 25. 2. 2015)

Napetosti na zasteklitve, katere povzročajo dodatno znižanje zračnega pritiska iz 10^{-3} mbar na 10^{-5} mbar, so zanemarljive. Problem se pojavi pri zasteklitvi s togim robom, ki ne dopušča pomikov zaradi velike temperaturne razlike notranje in zunanje šipe okna. Vzrok je dobra izolativna sposobnost vakuuma, katerega se zato omeji na velikost 10^{-3} mbar. V primerjalni študiji se je uporabilo tudi podtlak v višini 10^{-5} mbar. Tak pritisk se bi lahko uporabil izključno pri izdelavi zasteklitve z gibljivim robom. Torej je primerjava zračnega pritiska 10^{-5} mbar najboljši približek Winsmart VIG zasteklitve.

6. PROJEKT WINSMART

Projekt Winsmart je bil sprejet na podlagi razpisa Sedmega okvirnega programa oziroma s kratico FP7 (Sedmi okvirni program za raziskavo in tehnološki razvoj, angl: Seventh Framework Program for Research and Technological Development, 2006–2013). Cilj projekta je razviti okno, ki je obenem močno, uporabno, visoko izolativno ter s čim manjšim vplivom na okolje. Pogoj izdelave je tudi nizka cena, saj je na ta način dostopno večji populaciji ljudi.

6.1. Namen projekta

Pri novih gradnjah so največji problem zastekljeni deli, ki imajo veliko večje toplotne izgube. Tu se srečujemo z velikimi zastekljenimi površinami, kjer se lahko izgublja tudi do 60 % vse energije, ki je potrebna za ogrevanje ali hlajenje takega objekta. Zato je nujno izdelati okno, ki naj bi rešilo problematiko zasteklitve pri novih gradnjah. Rešitev je v VIG oknu, ki lahko dosega tudi do petkrat boljše izolativne sposobnosti v primerjavi z današnjimi okni. Pri VIG oknu, kljub svojim veliko manjšim dimenzijskimi lastnostim, obdržimo zelo dobro izolacijo. Pri projektu se razvija tudi zelo kakovostne okenske okvirje, ki bodo veliko bolj izolativni od sedanjih na trgu, ter s tem še dodatno zmanjšali koeficient toplotnega prehoda za celotno okno. Razvijajo se tudi zelo kakovostna stekla, ki naj bi bila elektrokromatska, torej z možnostjo zatemnjevanja okna. Pri projektu Winsmart se upošteva varovanje okolja, kjer izgradnja okna ne sme presežati vplivov na okolje, katere pridobimo z boljšo izolacijo okna v njegovi življenjski dobi.

6.1.1. Naloge projekta

Začetek WINSMART projekta je bil 1. 10. 2012, zaključil pa naj bi se 30. 9. 2016. Pred končanjem projekta naj bi imeli sestavljena okna velikosti 100 cm x 100 cm. Okno naj bi imelo življenjsko dobo 30 ali več let. Za tako dolgo obdobje je potrebno upoštevati veliko dejavnikov ter izvesti vrsto testiranj v nadzorovanem okolju. S temi testiranjmi se bo poizkušalo približati obnašanju okna VIG čez desetletja. Za testiranja je potrebno izdelati več vrst oken različnih dimenzij. Na oknu velikosti 30 cm x 30 cm, ki bo v celoti sestavljeno z okenskim krilom in okvirjem z vsemi potrebnimi prevlekami na steklu, vendar brez visokega zračnega podtlaka, se bo pokazalo resnično stanje toplotne prevodnosti skozi okenski okvir (U_f). Okna velikosti 100 cm x 100 cm bi testirali na koeficient toplotnega prehoda skozi celotno okno (U_w), kot tudi na vremenske vplive, prepustnost sončnega sevanja ter korozijsko odpornost. Simulacije se opravljajo tudi na samem transportu ter vgradnji v okenski okvir takega stekla. Srečujemo se namreč s problemom dostave okna na mesto vgradnje v okenski okvir, saj gibljivi rob še ni zaščiten pred mehanskimi poškodbami. Testiranja naj bi bila bolj natančen pokazatelj dejanske življenjske dobe okna ter tudi obnašanja skozi čas.

6.1.2. Partnerji pri projektu Winsmart

Projekt Winsmart sestavljajo partnerji iz Evropske unije. Vsak izmed partnerjev ima svojo nalogo oziroma s svojimi idejami in znanjem prispeva k raziskavam in razvoju in je vključen v sestavo celotnega projekta. Pri projektu je osem partnerjev iz različnih držav:

- Danska (TEKNOGOGISK INSTITUT "DTI", PHOTOSOLAR AS, IDEALCOMBI AS "PHO"),
- Švica (EIDGENOESSICHE MATERIALPRUEFUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALT „EMPA“),
- Nemčija (FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FOERDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V „FHG, ECONTROL-GLAS GMBH & CO. KG „ECG“),
- Slovenija (UNIVERZA V LJUBLJANI „UL“),
- Belgija (AGC GLASS EUROPE SA "AGC").

Opis dela ter vloga posameznega partnerja

- Danska (TEKNOGOGISK INSTITUT "DTI", PHOTOSOLAR AS, IDEALCOMBI AS "PHO")

Za proizvod krila ter okvir okna je zadolžena Danska. Uporabili naj bi naravne materiale, saj s projektom želimo doseči čim manjši vpliv na okolje. Za krilo in okvir se preizkuša moderizirani les, z dodatkom plute ali bio pene. Seveda je cilj doseči čim manjšo toplotno prevodnost. Dodatni problem pa povzroča velik toplotni most, katerega povzroča gibljivi rob Winsmart okna.

- Švica (EIDGENOESSICHE MATERIALPRUEFUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALT "EMPA")

Naloga EMPE je izpopolniti metodo varjenja stekla in tanke kovinske folije imenovane Dilaton ($\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{48}$). Tanka kovinska folija Dilaton hermetično sestavlja gibljivi rob Winsmart okna. Privarjena je po celotnem robu okna ter sestavljala zračno neprepustni rob VIG okna. Ves čas bi bil zvar kot tudi kovinska folija pod velikimi stresi, ki jih povzroča visok zračni podtlak v samem oknu. Tanko kovinsko folijo, ki sestavlja rob nepredušno zaprtega VIG okna, je potrebno izpopolniti na način testiranja vzorcev. Vzorci predstavljajo del roba Winsmart okna, na katerih se izvaja različna testiranja.

- Nemčija (FHG- FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FOERDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V, ECG- ECONTROL-GLAS GMBH & CO. KG)

V nemškem inštitutu imajo izkušnje laserskega varjenja tankih kovin. Posedujejo vakuumski tunel, v katerem lahko variro tanke kovinske folije pri visokem zračnem podtlaku. Tak postopek omogoča, da se dve šipi, ki predstavljata Winsmart okno, medsebojno zvari pri že vzpostavljenem vakuumu ter kasneje ni potrebno izsesavati zraka skozi predhodno izvrtano luknjo.

Dodatno so na inštitutu zadolženi za testiranje vzorcev, ki predstavljajo gibljivi rob okna, katerega izdelavo je potrebno opraviti v švicarskem inštitutu EMPA.

- Slovenija (UNIVERZA V LJUBLJANI "UL")

Pri projektu se želi ustvariti zasteklitev, katera bi avtomatizirano uravnavala prepustnost sončnega sevanja ter svetlobe. Torej se želi ustvariti stekla, ki bi obenem uravnavala sončno svetlobo v prostoru ter lahko delovala kot zatemnitev prostorov z možnostjo regulacije dotoka svetlobe na željo uporabnika. Razvija se pohoto-kromatsko zasteklitev, s katero dotok svetlobe oziroma zatemnitev stekla lahko spreminja uporabnik sam.

- Belgija (AGC GLASS EUROPE SA "AGC")

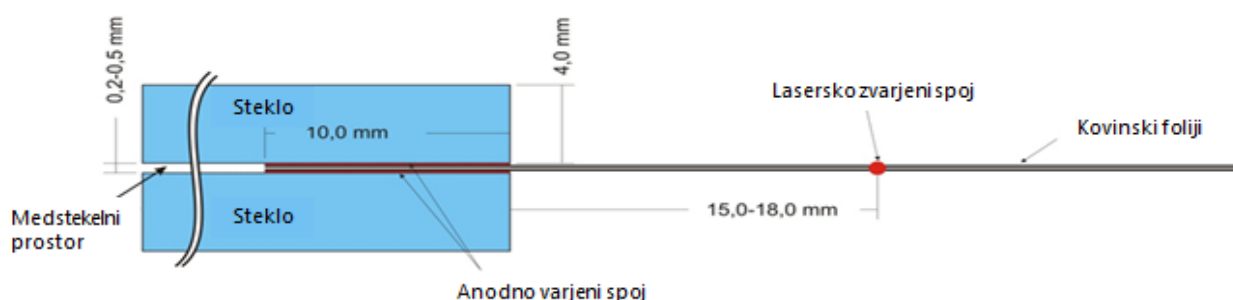
Pri tako dobri toplotni izolativnosti kot jo ponuja VIG okno, se bo pojavil zelo velik problem kondenzacije vlage. Zato se AGC posveča raziskovanju infrardečega aktivnega premaza, ki se bo testiral na prototipu WINSMART VIG okna 100 cm x 100 cm.

6.2. Winsmart zasteklitev

Okno Winsmart naj bi sestavljali dve šipi, ki sta predhodno obdelani s postopkom tempiranja. Za okno se uporablja steklo debeline 3,8 mm. V prostoru med stekli se ustvari visok vakuum, ki (kot pri običajnih VIG oknih) služi za toplotno izolacijo okna. Stekla so podprta z distančniki na razdalji 50 mm. Najboljše toplotno izolativne lastnosti pri VIG oknih dobimo z distančniki velikosti 0,2 mm. Pri Winsmart oknu se zaradi kompleksne izvedbe roba okna ter same debeline kovinske folije, ki sestavlja gibljivi rob, uporabljajo distančniki višine 1,2 mm. Problem pri običajnem konceptu VIG okna je negibljivi rob, ki preprečuje ekspanzijo stekla zaradi velike temperaturne razlike na notranji in zunanji stekleni površini. Temperaturna razlika pri VIG oknu je še toliko bolj izrazita zaradi izjemno dobrih toplotno izolativnih lastnosti vakuuma.

6.2.1. Gibljivi rob

Gibljiv rob Winsmart okna omogoča tanka kovinska folija imenovana Dilaton. Kovinska folija Dilaton je debeline 0,1 mm ter širine 45 mm. Kemijsko je sestavljena iz $Fe_{49}Ni_{48}$ ter ima kot taka zelo podobne toplotne raztezke kot samo steklo. Nahaja se na celotnem robu okna. Le-ta se s pomočjo ALTSAB postopka z angleškim zapisom Activated Liquid Tin Solder Anodic Bonding (Koebel M. 2011) pritrdi na stekleno površino. Vari se po celotnem robu obeh šip, kateri kasneje po združitvi predstavljata okno. Zaradi varnosti pred napakami je var širine 20 mm, kateri sega v notranjost šipe. Ostali del kovinske folije (25 mm) pa sega čez rob šipe, le-ta kasneje omogoča varjenje z drugim delom Dilaton folije, ki je pritrdjena na nasprotni šipi. Torej je za zasteklitev potrebno ustvariti dve šipi, ki imata po celotnem robnem delu zavarjeno Dilaton folijo, seveda brez prekinitve. Slika 8 prikazuje varjenje dveh kovinskih foliji, ki sta spojeni s stekleno površino s postopkom ALTSAB.



Slika 8: Prerez gibljivega roba Winsmart okna

Vir: projekt Winsmart

Stekleni površini se nato dostavita v nemški inštitut (Fraunhofer–Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E.V.) v mestu Friburgu. Stekla se v Friburgu vstavijo v vakuumski tunel, kjer imata obe stekleni površini sedaj na robu privarjeno Dilaton folijo. Celotni proces poteka v vakuumskem tunelu, kjer se sprva šipi očistita s posebnim postopkom plazmatskega čiščenja. Očistijo se vseh drobnih delcev na steklu, ki bi lahko kasneje v visokem vakuumu povzročali evaporacijo ter s tem zmanjšanje visokega podtlaka v samem oknu. Po končanem čiščenju se na zgornjo površino spodnje šipe s pomočjo magnetov razporedi distančnike, ki določajo medstekelno razdaljo. Zgornjo šipo se po razporeditvi distančnikov mehanizem položi preko spodnje. Stekleni šipi sedaj nalegata druga na drugo, privarjeni Dilaton foliji obeh šip pa se medsebojno pričvrsti s posebnimi avtomatiziranimi vponkami. Vzorec je nato pripravljen na postopek laserskega varjenja. Lasersko varjenje poteka po vseh štirih straneh okna, na razdalji 10–18 mm od roba stekla. Variti je potrebno dovolj daleč od roba steklene plošče, da je Dilaton folija dovolj fleksibilna. Le-ta kasneje omogoča premike obeh šip zaradi ekspanzijske deformacije stekla, ki jo povzroča temperaturna razlika na obeh straneh okna.

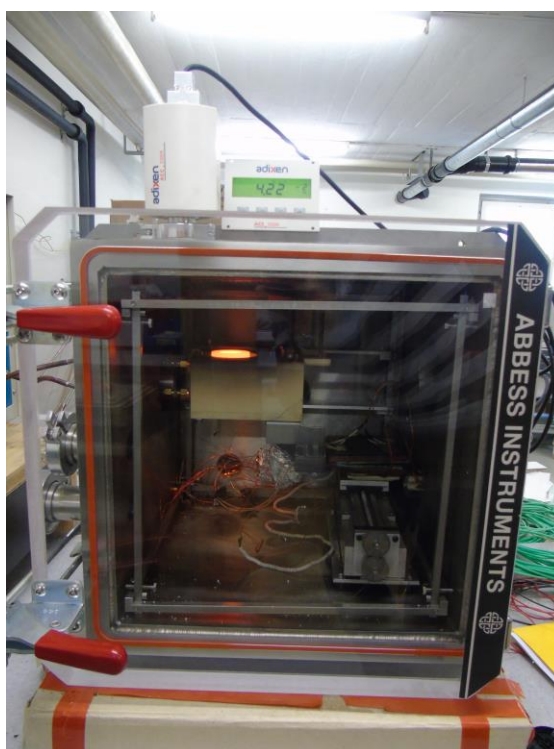
Obe Dilaton foliji, zvarjeni druga z drugo, sestavljata okno, ki vsebuje visok zračni podtlak, okoli 10^{-5} mbar. S tem postopkom izdelave nam naknadnega izsesavanja zraka ni potrebno opravljati.

Koncept gibljivega spoja omogoča bistveno višji zračni podtlak v primerjavi z VIG zasteklitvami, ki so trenutno na trgu. Okna na trgu so omejena z velikostjo, saj togi spoj ne omogoča premike steklenih površin okna. Potrebno se je odločiti med boljšo toplotno izolacijo, ki je odvisna od zračnega tlaka, oziroma večjimi dimenzijami okna. Pri velikih oknih pride do prevelikih ekspanzijskih razlik steklenih plošč, premike pa togi spoj ne dopušča. Gibljivi spoj Winsmart okna omogoča premike steklenih površin neodvisno druga od druge. S tem nismo omejeni niti z velikostjo okna, niti z višino podtlaka.

6.2.2. Priprava zlitine

Vmesni medij oziroma zlitina, ki omogoča zvar, je mešanica dveh kovin. Poskusi so se opravljali na različnih kovinah. S pripravo vzorcev ter različnimi testiranjmi se je ugotovilo, da se najbolj kakovosten zvar dobi z mešanico aluminija in kositra (po vsebnosti med SnAl 0,01 in SnAl 0,0075). Postopek priprave mešanice se opravi s pomočjo tehtnice. Za en vzorec se pripravi 100 g zlitine, katero se nato lahko uporabi za anodno varjenje. Po teži se pripravi Sn 99,625 g, ki ima čistost 99,9 %, temu se doda SnAl 0,2 % teže 0,375 g. Na tehtnici se obe količini tehtata ter vstavita v grafitno posodo.

Grafitno posodo se vstavi v po naročilu izdelano vakuumsko komoro (slika 9), katera znotraj vsebuje tudi indukcijsko peč z močjo 30 kHz. Znotraj peči je pripravljen prostor, v katerega se položi posodo z mešanico kositra in aluminija. V vakuumski komori se po zaprtju steklenih vrat vzpostavi s pomočjo vakuumske črpalke tlak 5×10^{-4} mbar. Steklena vrata na sprednjem delu vakuumske komore omogočajo opazovanje dogajanja pri taljenju. Vakuumska komora tako omogoča taljenje kovine pri nizkem zračnem tlaku ter s tem preprečitev oksidacije. Kovino se tali visoko nad temperaturo tališča kositra, kar pomeni okoli 900 °C. Tako temperaturo se zadržuje približno 1 minuto. Hlajenje zlitine poteka okoli 5 minut s pomočjo vodnega hladilnega sistema. Po preteku tega časa se temperatura spusti dovolj nizko, da je zlitina zopet v trdnem stanju. Ponovno temperaturo okoli 900 °C se doseže z ogrevanjem 30 sekund, nato pa se njeno višino zopet vzdržuje 1 minuto. Tak postopek segrevanja in hlajenja se ponovi 6-krat.



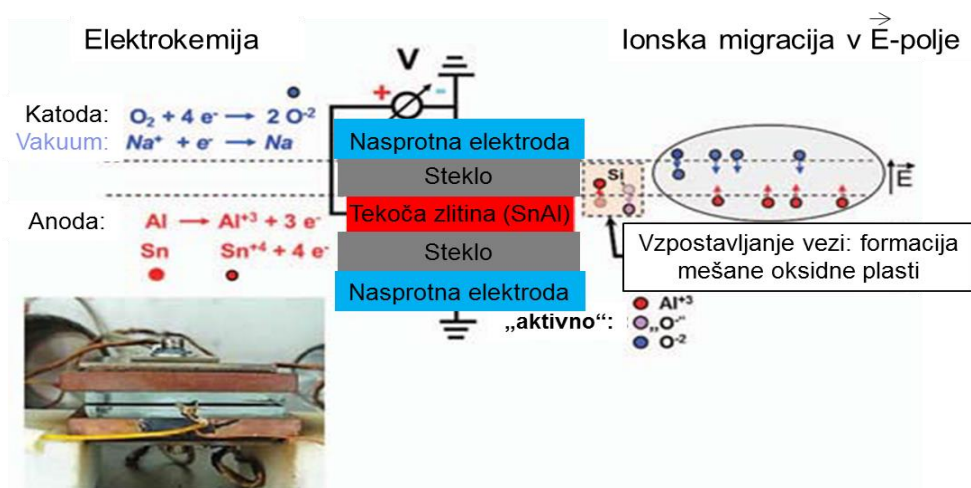
Slika 9: Vakuumska komora za taljenje kovine

Na zgornji strani vakuumske komore je merilec tlaka. V notranjosti komore se za zaprtimi steklenimi vrati nahaja vzorec v grafitni posodi, katera je zaradi visoke temperature zlitine zlato rumene barve, kar je razvidno iz zgoraj prikazane slike 9. Pri tako visoki temperaturi segrevanja nastane burna konvekcija, ki omogoča, da se obe kovini popolnoma zmešata. S tem postopkom dobimo zlitino SnAl 0,6 % glede na težo Al. Po končanem segrevanju in hlajenju se zlitino pusti pod nizkim zračnim pritiskom, da se temperatura kovine počasi spusti na sobno temperaturo.

6.2.3. Varjenje stekla s steklom

Splošni postopek varjenja ALTSAB se izvaja s pomočjo visoke napetosti pri povišani temperaturi. Uporablja se za anodno varjenje dveh stekel z vmesnim medijem zlitine. Za vmesni medij zlitine se lahko uporabi različne kovine, vendar morajo imeti nizek temperaturni raztezek za boljšo koherentnost s steklom po ohladitvi. Zaradi prevelikih razlik v raztežku med steklom in kovino namreč lahko pride do velikih notranjih napetosti.

Raziskave so potekale v švicarskem inštitutu EMPA, kjer so raziskovali varjenje ALTSAB z mešanjem različnih kovin po postopku, opisanem v poglavju 6.2.2 Priprava zlitine. Pri postopku je pozornost potrebno posvetiti čistosti steklene površine, kjer bo potekal zvar. Nesnaga in delci na steklu privedejo do slabšega kontakta z zlitino in steklom ter posledično do napak, ki povzročajo nižjo kakovost zvara.



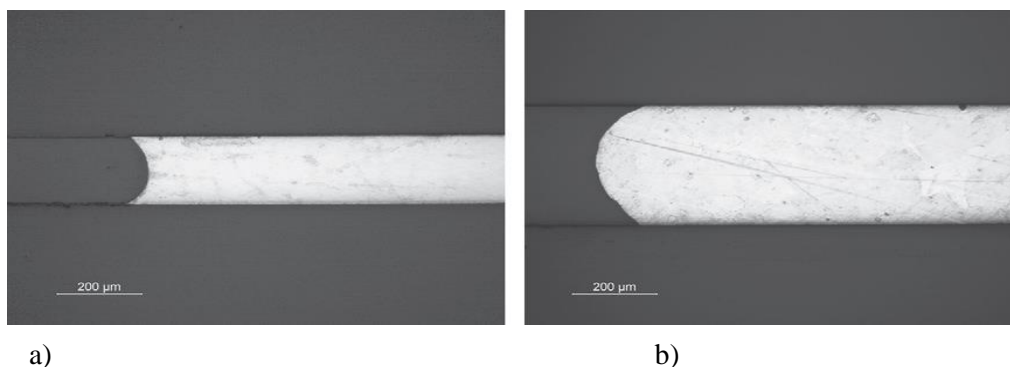
Slika 10: Postopek anodnega varjenja stekla s steklom

Vir: Koebel M. 2011. Solar Energy Materials & Solar Cells 95

Za varjenje steklenih površin, kot ga prikazuje zgornja slika 10, se iz predhodno izdelane zlitine izreže delec oziroma t. i. kovanec, teže 1 g ter površine okoli 15 mm. Kovanec se položi med dve šipi velikosti 50 mm x 50 mm. Tako pripravljen vzorec dveh šip, med katerima se nahaja kovanec, se vstavi v po naročilu izdelano vakuumsko komoro, katera vsebuje indukcijsko peč. Iz komore se nato izsesa zrak na višino 5×10^{-4} mbar. Nizek zračni pritisk preprečuje oksidacijo zlitine, ki se pojavi zaradi povišane temperature.

Ko je dosežen tlak 5×10^{-4} mbar v komori, se prične segrevanje vzorca na temperaturo med 250 °C in 310 °C. Temperaturo se doseže s pomočjo električnih grelnih plošč po preteku 15 minut. Temperaturo se nato vzdržuje nadaljnjih 20 minut. Po preteku celotnega časa 35 minut od pričetka gretja se med obe šipi vzorca priključi električni tok. Električni tok se dovaja s pomočjo visokonapetostne naprave (PowerSupply HPx20157 ET powersystems Ltd.), ki nam omogoča velikost 2000 V ter 150 mA. Električna energija se nato razporedi po sedaj tekočem mediju zlitine. Zlitina nato deluje kot anoda, kjer se vzdržuje potencial 6 minut od 400 V do 800 V glede na posamezni vzorec. Grelni enoti, na

katerih slonita obe stekleni površini, pa služita kot negativni potencial. Na ta način se je v času nanosa električnega toka, kljub visoki električni izolativnosti stekla, doseglo nizek električni tok, ki je tekkel skozi obe stekleni površini. Velikost električnega toka je odvisna od velikosti površine zvara ter seveda višine temperature, pri kateri se je izvajal postopek anodnega varjenja.



Slika 11: Varjenja dveh steklenih površin z vmesnim medijem zlitine (SnAl 0,6 %): a) s postopkom anodnega varjenja in b) brez postopka anodnega varjenja

Vir: Koebel M. 2011. Solar Energy Materials & Solar Cells 95

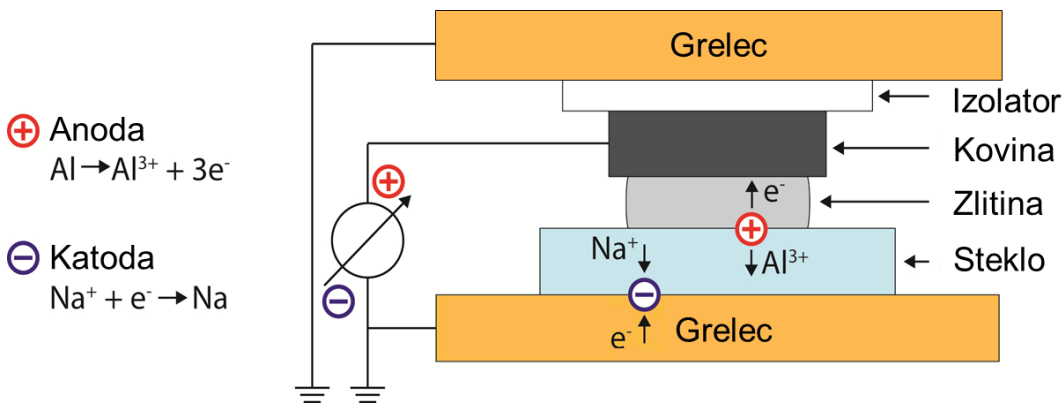
Po opisanem postopku ALTSAB tako dobimo s pomočjo električnega toka skozi stekleno površino izjemno dobro adhezijo, kar je razvidno ne levi strani slike 11. Desna stran slike 11 prikazuje zlitino brez postopka anodnega varjenja. Temperatura pri ALTSAB je v razmeroma nizkem stanju v primerjavi s podobnimi postopki varjenja. Zato se steklena površina pri tem ne spreminja. Segreta zlitina zvara nad temperaturo tališča omogoča razlitje po površini, katero želimo variti. S takim postopkom lahko zato varimo tudi neravne površine ter nismo omejeni z dolžino samega zvara. Kocept se zaradi svoje togosti ne more uporabljati za giblivi spoj Winsmart okna. Pri slednjem se je ena izmed obeh steklenih površin zamenjala s kovinsko folijo, ki omogoča dovolj veliko fleksibilnost (Koebel M. 2011).

6.2.4. Varjenje stekla in kovine

Varjenje kovine z vmesnim medijem zlitine na stekleno podlago je jedro ideje gibljivega spoja Winsmart okna. Podoben je postopku varjenja dveh steklenih plošč pri opisanem postopku varjenja stekla na steklo, tako imenovane sendvič strukture.

Anodno varjenje stekla in kovine deluje s pomočjo vmesnega medija zlitine, ki ima visoko elastičnost v primerjavi s kovino, ter omogoča oziroma dopušča delne premike. Premiki nastanejo zaradi razlik v temperaturnem raztežku med steklom in kovino pri ohlajanju. Kljub takemu načinu varjenja smo omejeni glede uporabe kovin s čim manjšim toplotnim raztežkom. Tako na primer dobimo veliko večje notranje napetosti zaradi razlik pri toplotnem raztežku varjenja jekla ter stekla v primerjavi s titanom in steklom. Ta problem povzroča tudi očitno nižjo adhezijo med steklom in kovino zaradi notranjih napetosti po ohlaiditvi. Zaradi tega problema se za vmesno zlitino zvara uporablja Sn, ki ima nizko duktilnost in Youngov modul tudi pri sobnih temperaturah.

Postopek anodnega varjenja poteka pri razmeroma nizkih temperaturah 250–350 °C. Varjenje mora potekati znotraj vakuumske komore oziroma zaščitnega plina, ki preprečuje oksidacijo kovine, katero varimo, ter vmesnem mediju zlitine. Predpripravljen medij oziroma zlitina, ki lahko vsebuje tudi več različnih kovin, je predpripravljena po opisanem postopku v kondukcijski peči z večkratnim postopkom topljenja ter strjevanja. Ko je zlitina pripravljena, se jo vstavi med kovino ter stekleno površino, kjer želimo ustvariti zvar. Tako pripravljen vzorec, kot ga prikazuje slika 12, zaradi preprečevanja oksidacije na površini vstavimo v komoro z zaščitnim plinom ali visokim vakuumom ter ga segrejemo na temperaturo med 250 in 350 °C. Segrevanje poteka s pomočjo dveh električnih grelnih elementov, ki omogočata segrevanje na temperaturo 300 °C v času 15 min.



Slika 12: Postopek anodnega varjenja kovine s steklom

Vir: Elrefaey A. 2014. Journal of Materials Processing Technology 214

Ko vsi elementi dosežejo določeno temperaturo, nastavljeno s pomočjo grelnih enot, se na zgornjo kovinsko stran aplicira visoko napetost med 600 V in 800 V oziroma 1000 V. Torej zgornja kovinska plošča deluje kot anoda. Na spodnjo stekleno stran se priključi katodo. Negativni potencial oziroma katodo omogoča kovinska plošča, na kateri leži steklo, s celotno spodnjo površino. Pri tej temperaturi je vmesni medij zlitine v tekočem stanju. Visoka napetost ter povišana električna prevodnost stekla pri visoki temperaturi omogočata prehod pozitivnih ionov (v največji meri Na^+), da migrirajo stran od kovinsko-steklenega zvara proti katodi. Istočasno se povzroči anodna oksidacija v kovini ter elektrostatična napetost med pozitivnimi kovinskimi kationi ter negativnimi napetostmi v steklu ustvari močno adhezijo med zlitino ter stekleno površino (Elrefaey A. 2014).

Za kovinsko vez z zlitino ali tako imenovanim medijem pa ne potrebujemo električne energije. Čeprav se le-ta nanese na zgornjo kovinsko plast, ne prispeva k spoju med njima. Vez se ustvari zaradi povišane temperature, pri kateri kovina nalega na površino raztopljenega medija. Pri tem pride do interakcije med obema kovinama, ki po ohladitvi utvari vez.

6.3. Vzorci za preizkus trdnosti zavora

Vzorci se izdelujejo z namenom izpopolnjevanja tehnike varjenja kovine na stekleno podlago z vmesnim medijem zlitine. Postopek anodnega varjenja kovine in stekla je namreč novi postopek, katerega bi bilo potrebno izpopolniti. Namen vzorcev so testiranja, pokazatelj čim bolj kakovostnega

zvara, ki se ga bo kasneje uporabilo pri Winsmart oknu. Gibljivi spoj roba okna mora biti dovolj kakovosten, da je sposoben prenašati ogromne napetosti, ki nastanejo zaradi visokega zračnega podtlaka v samem oknu kot tudi velike deformacije zaradi toplotnega raztezka stekla.

Zvar med steklom in zlitino je močnejši z večanjem količine aluminija. Pri testiranju sendvič strukture stekla na steklo je najboljše rezultate podajala vsebnost SnAl 0,6 %. Kohezija na kovinsko folijo pa vsebnost aluminija zmanjšuje. Torej je potrebno ugotoviti najugodnejšo količino aluminija v kositru, ki nam poda najkakovostnejši zvar na stekleno površino ter temu enakovreden spoj na kovinsko folijo.

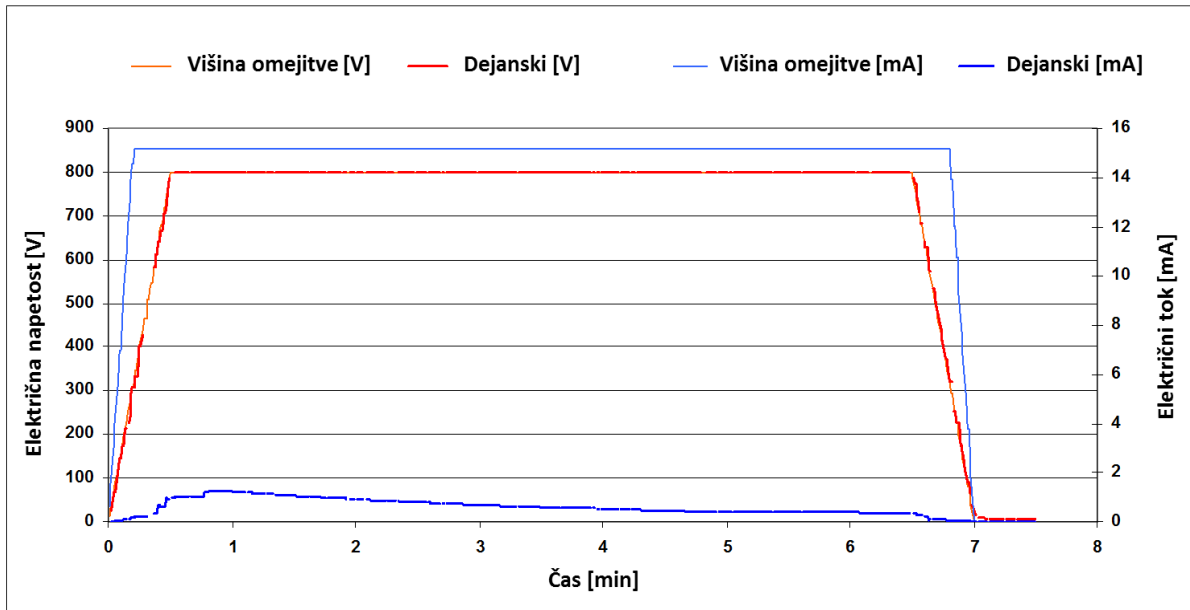
6.3.1. Izdelava vzorcev

Vzorci se pripravljajo v kvadratasti stekleni komori. Steklo nam omogoča pregled nad celotnim dogajanjem segrevanja, postopkom anodnega varjenja s pomočjo električne energije, kot tudi nad končnim postopkom hlajenja. V stekleni komori se namesto vakuuma uporabi zaščitni plin, ki je mešanica vodika v dušiku v višini 5 % (NH 5 %). Znotraj steklene komore se nahajata dve grelni plošči, ki omogočata gretje vzorca na predhodno določeno temperaturo 300 °C.

Vzorec predpripravljene zlitine se razreže na primerne kose, ki se nato uporabijo za zvar oziroma vmesni medij med stekleno površino in Dilaton folijo. Tako imenovani kovanec, izrezan iz zlitine SnAl, se vstavi med steklo dimenzij 80 mm x 30 mm ter kovinsko folijo Dilaton dimenzij 50 mm x 60 mm (večja površina Dilaton folije omogoča kasnejše vpenjanje le-te pri nanosu obtežbe). Pred postopkom gretja ter topljenja zlitine se v komoro dostavi cev s konstantnim dotokom zaščitnega plina. Plin je v konstantnem dotoku, ter tako povzroča znotraj komore majhen nadtlak. Zaščitni plin na ta način preprečuje dotok zraka iz okolice ter s tem posledično preprečuje oksidacije zlitine ter kovinske folije Dilaton.

Pripravljen vzorec vstavimo v stekleno komoro po postopku, opisanem v poglavju 6.2.2. Električna žica se pritrdi na kovinsko folijo Dilaton, ki je na zgornji površini vzorca. Gretje vzorca poteka 40 minut, pri tem pa s posebno napravo ohranjamo grelni plošči na temperaturi 300 °C. Temperaturo 300 °C dosežemo po preteku 15 minut, dodatnih 25 minut pa grejemo obe grelni plošči, tako da pride do čim bolj konstantne temperature na celotni površini vzorca. Po preteku 40 minut na vzorec dovedemo električno energijo preko predhodno pritrjene električne žice na folijo Dilaton v jakosti 800 V. Ta postopek izvedemo s pomočjo visoko zmogljive električne naprave (HPx20157 ET powersystemsLtd).

Visoko električno napetost nadzorujemo z osebnim računalnikom, ki vsebuje program za nadzor oziroma dovod napetosti. Električno napetost dovajamo 7 minut, pri čemer prve 0,5 minute premo sorazmerno raste do velikosti 800 V, nato 6 minut konstantno ohranja 800 V. V tem času se spreminja električni tok, ki je sprva zelo visok, nato pada. Po preteku 6,5 minut se glede na program električna napetost premo sorazmerno zmanjša ter doseže velikost 0 V po preteku 7 minut.



Grafikon 2: Postopek anodnega varjenja za vzorec strižne trdnosti z vsebnostjo SnAl 0,2 %

Na zgornjem grafikonu 2 je opaziti dejanski pretok električnega toka, kar prikazuje oddebeljena modra črta. Svoj maksimalni pretok doseže pri času 50 s z višino 1,8 mA. Nato s časom električni tok pada, napetost 800 V, ki jo prikazuje rdeča črta, pa ostaja konstantna do preteka 6,5 minut. Po preteku 7 minut obe vrednosti dosežeta vrednost 0. Tanka modra črta prikazuje omejitev pretoka električnega toka na višino 15 mA zaradi varnosti, če bi prišlo do posrednega kontakta med obema kovinama.

6.3.2. Ročno testiranje s postopkom lupljenja

Začetna variacija med vzorci z različnimi postopki izdelovanja je bila tako velika, da so se izpopolnitve oziroma testiranja lahko izvajale kar ročno. Namen takega testiranja je bila selekcija vzorcev oziroma specifikacija vzorcev za način mehanskega testiranja. Ročno testiranje se je namreč lahko opravilo takoj, pri tem pa prihranilo mnogo časa, ki bi ga zapravili s pošiljanjem vzorcev v Freiburg za mehansko testiranje.

Pri načinu ročnega testiranja se je poskusilo odlepiti oziroma odstraniti kovinsko folijo, ki je bila zvarjena s površino stekla. Seveda se je na ta način lahko izpopolnjevalo metodo samo do določene mere, ki nam še dopušča učinkovito ločevanje boljših in slabših zvarov.

Testiranje se je izvajalo z ročnim lupljenjem kovinske folije, ki je pritrjena z vmesnim medijem zlitine na površino stekla. Vzorec se je vstavilo v posebno čeljust ter se je nato s pomočjo klešč odstranilo kovinsko folijo. Prednost takega testiranja je počasno lupljenje kovinske folije ter moč opazovanja kohezije na kovinsko folijo in stekleno podlago po celotnem delu zvara. Seveda pri mehanskem testiranju strižne trdnosti to ni mogoče, saj pri tem dobimo samo končno silo, ki je bila potrebna za ločitev stekla in kovinske folije.

6.3.2.1. Odstranjevanje oksidne plasti s površine kovinske folije

Predhodno odstranjevanje oksidne plasti je pomembnejši faktor, ki je bilo potrebno testirati. Izpostavljenost kovine pri sobni temperaturi zraku povzroča dovolj debelo plast oksidov, ki kasneje preprečuje kohezijo med zlitino in varjeno kovino. Za odstranjevanje oksidne plasti se je uporabilo brusni papir. Vprašanje se je pojavilo ob grobosti oziroma različni vrsti brusnega papirja, ki je potreben za odstranjevanje oksidne plasti. Predvidevalo se je namreč, da večja grobost brusnega papirja povzroča večje nepravilnosti na površini kovine, pri tem dobimo večjo možnost kohezije s samo zlitino zaradi večje omočitvene površine.

Za testiranje se je uporabilo različne vrste brusnega papirja, ob tem se je ugotavljalo, katera grobost kovinske folije po odstranitvi oksidov poda močnejši zvar. Vsi vzorci so vsebovali enako zlitino (S004), ki je vsebovala SnAl 0,005 %, ter so bili izdelani po enakem postopku. Na vzorcih se je preizkusilo brusni papir podjetja Nass-Schleifpapier različne grobosti (P320, P800, P2500 ter P4000). Višje številke pomenijo bolj gladko, nižje bolj grobo površino. Za vsako različico papirja se je izdelalo tri vzorce, ki so podali kakovostnejše rezultate. Pri testiranju odstranjevanja oksidne plasti se je opazovala kohezija med kovinsko folijo in zlitino. Opazovala se je tudi omečitev površine ter moč samega zvara. Vzorci so bili razdeljeni po številkah, tako da med samim testiranjem ni bilo mogoče ugotoviti razlike med posameznimi vzorci. Rezultate se je podajalo v številkah od 1 do 5, z zaokroževanjem na eno decimalko natančno.

Postopek varjenja ALTSAB skupne dolžine 7 minut, vzdrževanje temperature 300 °C med tem časom in postopek hlajenja znotraj komore z zaščitnim plinom se je uporabilo enako za vse vzorce strižne trdnosti kot tudi za vzorce testirane na lupljenje.

Preglednica 2: Ročno testiranje (različno odstranjevanje oksidne plasti s kovinske folije)

Oznaka vzorca	Kovinska folija	Brusni papir	Vsebnost aluminija [%]	Čas gretja [min]	Pričetek varjenja [min]	Spoj kovina zlitina [1-5]
R051	Dilaton 51	P320	0,005	40	40	3
R044	Dilaton 51	P800	0,005	40	40	4
R045	Dilaton 51	P800	0,005	40	40	4
R046	Dilaton 51	P800	0,005	40	40	4
R049	Dilaton 51	P2500	0,005	40	40	4
R050	Dilaton 51	P2500	0,005	40	40	3
R052	Dilaton 51	P2500	0,005	40	40	3,5
R041	Dilaton 51	P4000	0,005	40	40	3,5
R042	Dilaton 51	P4000	0,005	40	40	3
R043	Dilaton 51	P4000	0,005	40	40	2
R047	Dilaton 51	brez uporabe papirja	0,005	40	40	3
R048	Dilaton 51	brez uporabe papirja	0,005	40	40	1,5

Iz preglednice 2 je razvidno, da brez predhodne odstranitve oksidirane površine dobimo zelo šibek spoj na kovinsko folijo. Oksidacija na površini namreč preprečuje omočitev notranjosti kovinske folije ter pri tem vzpostavi dobrega kontakta. Za kovinsko folijo pri testiranju odstranjevanja oksidne

plasti z njene površine se je uporabila folija tipa Dilaton 51, ki po sestavi vsebuje 51 % nikla (FeNi_{51}). Pri uporabi zelo grobega brusnega papirja privede do slabše kakovosti zvara. Hipotetično velika grobost površine povzroči majhne zračne žepke med praskami na kovinski foliji. Zračni žepki nato preprečujejo dobro omočitev površine ter posledično slabši spoj med zlitino in kovinsko folijo. Pri P800 se je izkazalo, da smo dobili najboljše rezultate. Pri nadaljnjih testiranjih se je zato uporabljalo izključno P800 za odstranjevanje oksidne plasti na kovinskih folijah.

6.3.2.2. Preizkus daljše dolžine vzdrževanja temperature pred uporabo postopka ALTSAB

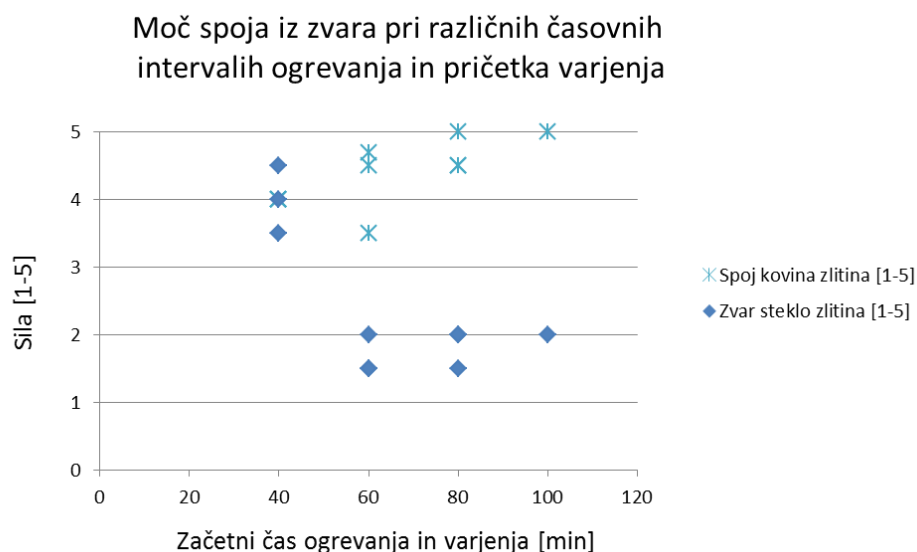
Pri postopku se je poskusilo ogrevati vzorec daljše časovno obdobje pred postopkom anodnega varjenja ALTSAB. Zlitina naj bi na ta način imela mnogo več časa, da omoči kovinsko folijo ter pri tem vzpostavi boljši kontakt med njima. Na podlagi enakomerne segrete površine stekla in kovinske folije hipotetično dobimo enakovredni pretok električnega toka skozi celotni zvar stekla in kovine. Na pretok električnega toka skozi steklo je vpliv višine temperature zelo velik. Daljše ogrevanje, kljub komori z zaščitnim plinom, pa poveča možnosti nastajanja oksidne plasti na sami zlitini kot tudi kovinski foliji.

Za poizkus se je opravilo gretja 40, 60, 80 ter 100 minut pred pričetkom postopka ALTSAB. Pri tem se je postopek varjenja izvedel po koncu gretja v standardni dolžini 7 minut. Po končanem postopku varjenja se je vzorec pričel ohlajati v atmosferi z zaščitnim plinom. Za vsako različno dolžino ogrevanja se je izdelalo tri vzorce, kateri so se nepristransko testirali. Za gretje 100 min se je testiralo samo 1 vzorec.

Vsi vzorci so bili izdelani po enakem postopku. Testirali so se po že opisanem ročnem testiranju lupljenja, kakovost zvara pa se je podajala z oceno od 1 do 5 z zaokroževanjem na eno decimalno natančno. Na vzorce se je varila kovinska folija Dilaton 51 z vmesnim medijem zlitine SnAl 0,005 % po teži aluminija.

Preglednica 3: Ročno testiranje (različni časovnimi intervali gretja in pričetki varjenja)

Oznaka vzorca	Kovinska folija	Vsebnost aluminija [%]	Čas gretja [min]	Pričetek varjena [min]	Zvar steklo zlitina [1-5]	Spoj kovina zlitina [1-5]
R044	Dilaton 51	0,005	40	40	4,5	4
R045	Dilaton 51	0,005	40	40	4	4
R046	Dilaton 51	0,005	40	40	3,5	4
R054	Dilaton 51	0,005	60	60	1,5	4,7
R055	Dilaton 51	0,005	60	60	1,5	4,5
R057	Dilaton 51	0,005	60	60	2	3,5
R056	Dilaton 51	0,005	80	80	1,5	4,5
R058	Dilaton 51	0,005	80	80	2	5
R059	Dilaton 51	0,005	80	80	2	4,5
R060	Dilaton 51	0,005	100	100	2	5



Grafikon 3: Odpornost zvara glede na različne časovne intervale

V zgornjem grafikonu 3 se pri času 40 minut za moč zvara steklo zlitina skrivajo trije podatki. Pri času 60 minut za odpornost zvara 1,5 steklo zlitina skrivata dva podatka. Pri času 80 minut se za zvar steklo zlitina pri odpornosti 2 skrivata dva podatka, ter prav tako pri odpornosti 4,5 za spoj kovina zlitina dva podatka. Tako je iz podatkov v grafu je razvidno, da zvar med stekleno površino in zlitino z daljšo dolžino gretja pada. Pri spoju na kovinsko folijo pa dobimo s časom močnejši spoj, kar je najverjetneje posledica nižje duktilnosti zlitine ter boljše omočitve površine kovine. Postopka varjenja 20 min se pri tem testiranju ni izvedlo.

Na podlagi grafa lahko sklepamo, da je najbolj kakovostno anodno varjenje za spoj stekla in zlitine pri času 40 minut. Hitrejši postopek anodnega varjenja se pri tem poizkusu ni izvedel.

6.3.2.3. Preizkus varjenja na bakreno površino

Varjenje na bakreno površino naj bi podalo rezultate za nadaljnje delo s to kovino. Seveda se pojavi dodatni problem – v primeru dobrih rezultatov zaradi različnega toplotnega raztezka v primerjavi s stekleno površino.

Za poizkus se je izvedlo 4 vzorce, ki so vsebovali 2 različni zlitini za varjenje. Prva dva vzorca sta vsebovala zlitino, ki je vsebovala SnAl 0,005 %, za slednja dva vzorca se je uporabila zlitina SnAl 0,01 %.

Preglednica 4: Ročno testiranje (uporaba kovinske folije iz bakra)

Oznaka vzorca	Kovinska folija	Vsebnost aluminija [%]	Čas gretja [min]	Pričetek varjena [min]	Zvar steklo zlitina [1-5]	Spoj kovina zlitina [1-5]
R081	Baker	0,01	40	40	5	4
R082	Baker	0,01	40	40	5	3
R079	Baker	0,005	40	40	5	2
R080	Baker	0,005	40	40	5	2

Iz preglednice 4 je razvidno, da spreminjanje vsebnosti aluminija v zlitini bistveno ne vpliva na zvar stekla in zlitine pri uporabi bakrene folije. Hipotetično se zaradi povišane temperature aluminij veže z bakreno površino, kar privede do zelo močnega spoja z bakrom. Med stekleno površino in zlitino pa ne ostane dovolj aluminija, da bi se vzpostavila dovolj dobra vez pri postopku anodnega varjenja.

6.3.2.4. Preizkus 80 minutnega vzdrževanja temperature 300 °C

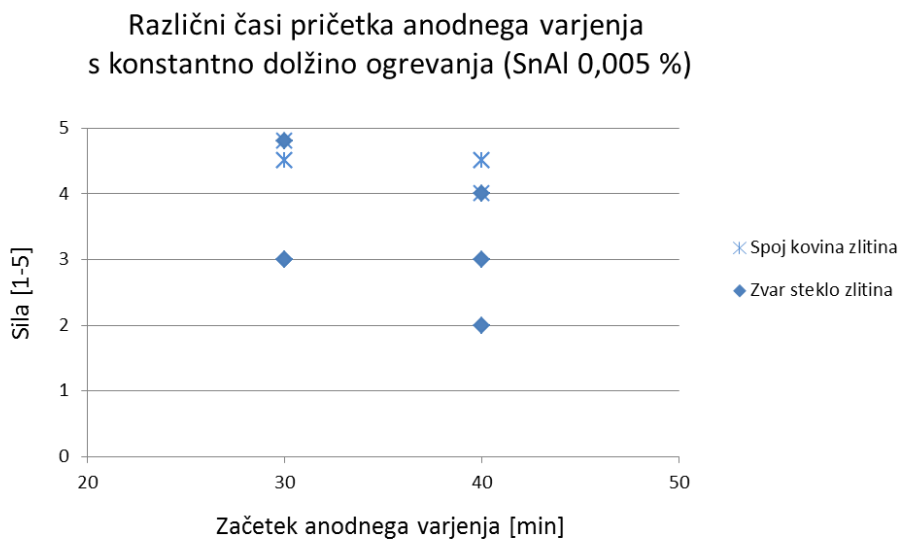
Pri postopku dolžine gretja znotraj komore se je preizkušalo časovno obdobje gretja na temperaturi 300 °C po končanem postopku ALTSAB. Posledično bi lahko tak način privedel do boljšega spoja med zlitino in kovino. Zlitina naj bi imela namreč več časa, da omoči kovino ter vzpostavi boljšo kohezijo. Na enakih vzorcih se je vzporedno opravilo tudi predčasni postopek anodnega varjenja.

Postopek anodnega varjenja ALTSAB s stekleno podlago se je opravil po preteku 40 minut za polovico vzorcev ter 30 minut za preostali del vzorcev. Vzorci so bili izpostavljeni visoki temperaturi 80 minut od pričetka ogrevanja. S tem sem poizkusil doseči manjšo duktilnost same zlitine ter boljši kontakt s kovinsko folijo. Za preizkus te metode se je uporabilo dve različni zlitini SnAl z vsebnostjo 0,01 % ter 0,005 % aluminija. Za vsako izmed zlitin se je izdelalo šest vzorcev, skupno 12 vzorcev.

Preglednica 5: Ročno testiranje (različen čas pričetka varjenja in konstantna dolžina gretja)

Oznaka vzorca	Kovinska folija	Vsebnost aluminija [%]	Čas gretja [min]	Pričetek varjenja [min]	Zvar steklo zlitina [1-5]	Spoj kovina zlitina [1-5]
R067	Dilaton 51	0,01	80	40	4,2	4
R068	Dilaton 51	0,01	80	40	4	2
R069	Dilaton 51	0,01	80	40	4,7	4,7
R070	Dilaton 51	0,005	80	40	2	4,5
R071	Dilaton 51	0,005	80	40	4	4
R072	Dilaton 51	0,005	80	40	3	4,5
R073	Dilaton 51	0,01	80	30	3,5	3,5
R074	Dilaton 51	0,01	80	30	4	4,5
R075	Dilaton 51	0,01	80	30	4,6	4,8
R076	Dilaton 51	0,005	80	30	4,8	4,8
R077	Dilaton 51	0,005	80	30	3	4,5
R078	Dilaton 51	0,005	80	30	3	4,5

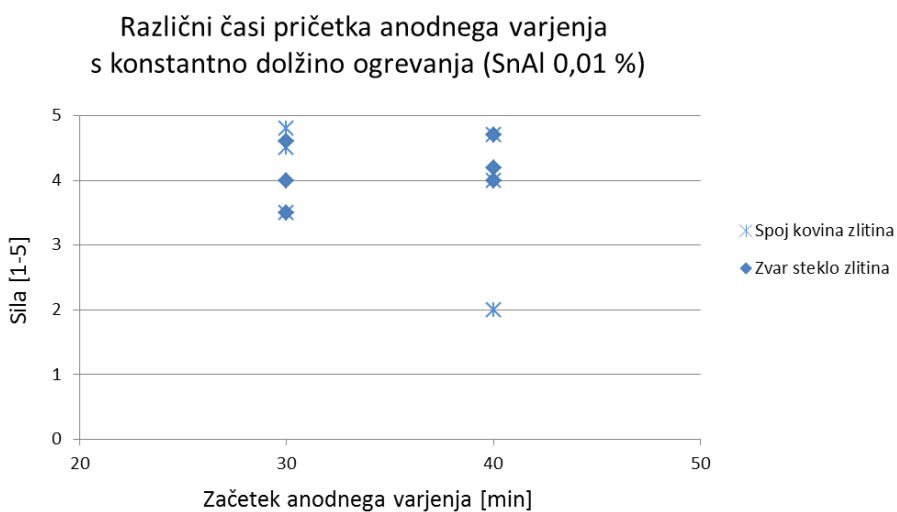
Vzorci z 80-minutnim gretnjem na temperaturi 300 °C, za zlitino z 0,005 % aluminija



Grafikon 4: Vzorci z 80-minutnim gretnjem na temperaturi 300 °C, za zlitino z 0,005 % aluminija

V zgoraj prikazanem grafikonu 4 se pri moči zvara s stekleno podlago vrednosti 3 pri postopku anodnega varjenja 30 minut skrivata dva podatka. Tako je iz grafa razvidno, da predčasni postopek anodnega varjenja za vsebnost 0,005% aluminija v zlitini bistveno ne vpliva na moč zvara s stekleno podlago. Na spoj med kovinsko folijo in zlitino predčasni postopek anodnega varjenja nima vpliva ter se odraža s podobnimi podatki za oba časovna obdobja varjenja. S časom ogrevanja 80 minut pridobimo nekoliko boljše rezultate v primerjavi s predhodnimi testiranjmi z nižjim časom ogrevanja.

Vzorci z 80-minutnim gretnjem na temperaturi 300 °C, za zlitino z 0,01 % aluminija



Grafikon 5: Vzorci z 80-minutnim gretnjem na temperaturi 300 °C, za zlitino z 0,01 % aluminija

Na grafikonu 5 za vsebnost 0,01% aluminija v zlitini dobimo nekoliko boljše rezultate pri postopku anodnega varjenja po preteku časa 40 minut. Rezultat vzorca R068 (preglednica 5) za spoj s kovinsko folijo nam je podal zelo slabe rezultate v višini odpornosti zvara 2.

Razlaga grafov za obe vsebnosti aluminija v zlitini

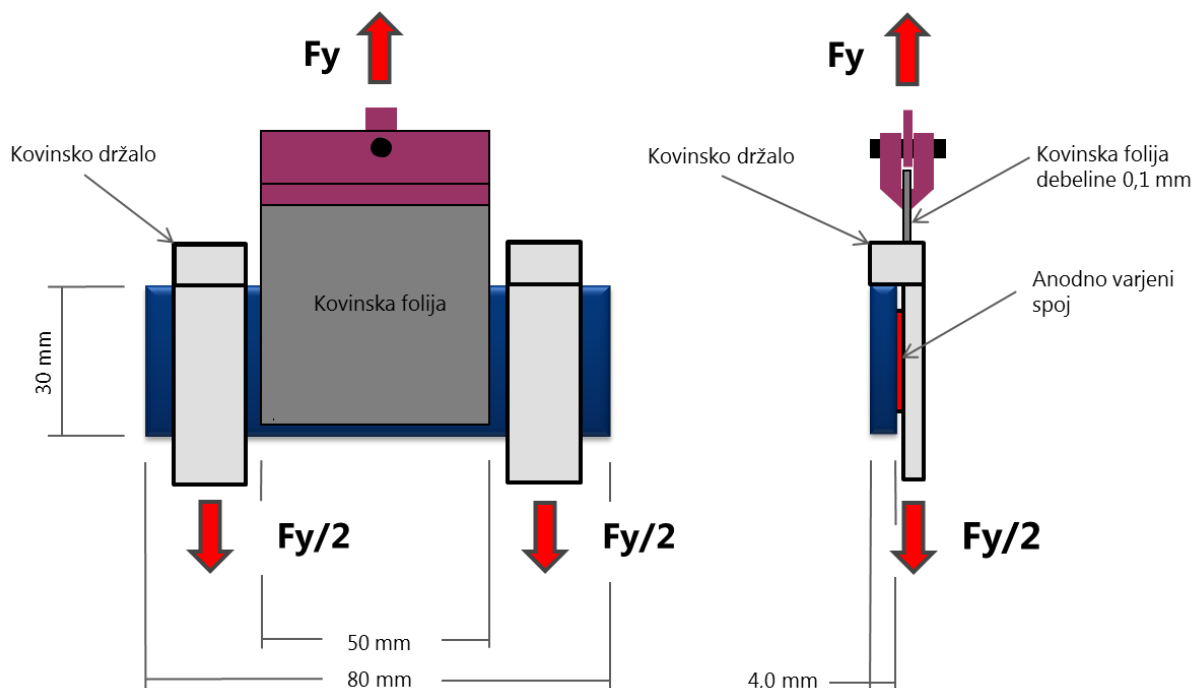
Z daljšo dolžino ogrevanja se je poizkusilo doseči veliko boljši zvar na kovino. Daljše gretje ima vpliv samo na spoj med kovinsko folijo ter zlitino, predhodno varjenje po času 30 minut pa ne vpliva na spoj kovine in zlitine.

Daljša dolžina ogrevanja ni podala bistveno boljših rezultatov v primerjavi s standardnim gretjem 40 minut. Z grafov je razvidno, da se z dodatnim gretjem delno poveča kohezija na kovino, vendar se s predhodnim postopkom varjenja izgublja vez med zlitino in stekleno površino. Šibka vez pri vzorcih z anodnim varjenjem 30 minut je očitno posledica nizke temperature zaradi šibkosti električnih grelnih enot, ki niso zmogle doseči želene temperature zlitine v tako kratkem času. Očitno je razvidna razlika v primerjavi grafov za različno vsebnost aluminija v zlitini, kjer višja vsebnost podaja močnejšo vez na stekleno površino, nižja vsebnost pa na kovinsko folijo. Torej se na podlagi grafov lahko odločimo za srednjo vsebnost aluminija v zlitini, kjer dobimo dobro vez tako na stekleno površino kot na kovinsko folijo.

6.3.3. Mehansko testiranje strižne trdnosti

Prav tako se je vzorce za postopek lupljenja izdelalo v stekleni komori z gretjem 40 minut pri temperaturi 300 °C, da se je na steklo dolžine 80 mm ter širine 30 mm s postopkom ALTSAB pritrdila kovinska folija širine 50 mm ter dolžine 65 mm. Pri tem se je daljši del kovinske folije pritrdil pravokotno na stekleno površino tako, da kovinska folija gleda z območja steklene površine. Po končanem postopku izdelave vzorca s postopkom ALTSAB smo za vsak vzorec v švicarskem inštitutu EMPA izračunali površino zvara. Izračun površine je pomemben za končno strižno trdnost. Problem se pojavi pri razliki med posameznimi vzorci. Za vsak vzorec je namreč površina zvara različna. To je rezultat neenakosti predhodno izrezanih kovancev ter razlitja zlitine med postopkom gretja.

Izračun površine se opravi s programom Matlab 2013b. Potrebno je upoštevati, da se računa samo površina sveže zlitine, ki je bila iztisnjena iz položenega kovanca zaradi obtežbe na kovinski foliji. Del, na katerega je bil položen kovanec izrezane zlitine, pa se ne upošteva. Na tem delu zaradi predhodne oksidacije kovanca ne pride do spoja med steklom oziroma kovinsko folijo.



Slika 13: Grafični prikaz naprave za testiranje vzorcev strižne trdnosti

Vzorci se je testiralo v nemškem inštitutu Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM v mestu Friburg. Posamezni vzorec se je vstavilo v napravo, ki je grafično prikazana na sliki 13 zgoraj. Naprava omogoča pritrnitev steklenega dela vzorca; kovinsko folijo vzorca, ki sega izven območja stekla, se pritrji s kovinsko ploščo. Kovinska plošča, ki omogoča nanos obtežbe, deluje v pravokotni smeri glede na stekleni del. Obtežba se nanaša tako dolgo, da se kovinska folija oddvoji od površine stekla. Pri tem se upošteva končna sila, ki je bila potrebna za porušitev vzorca, s predhodno izračunano površino zvara pa se določi moč površine zvara.

6.3.3.1. Vzorci s prevleko na kovinski foliji Dilaton

Na kovinsko folijo Dilaton se je pri tem preizkusu nanoslo prevleko iz treh različnih kovin (Sn, Cu, Ni). Pri takem postopku se je poskušalo doseči boljšo kohezijo zvara med zlitino in kovinsko folijo, ne glede na vpliv različnega toplotnega raztezka z uporabo različnih kovin.

Kovinske trakove folije Dilaton 51 se je potopilo v kovinske kopeli treh različnih kovin. Kopeli so vsebovale kovine iz kositra, nikla ter bakra. V vsako kopel posebej se je potopilo trakove kovinske folije ter se na ta način pridobilo prevleke treh različnih kovin na foliji Dilaton.

Izdelava vseh vzorcev s prevleko je potekala po opisanem postopku gretja 40 minut ter anodnemu varjenju 7 minut. Za izvedbo vseh vzorcev se je uporabilo tri različne zlitine, ki se razlikujejo po vsebnosti aluminija v kositru (0,005 %, 0,02 %, 0,06 % ter 0,2 %).

Vzorci s kositrno prevleko in njihovi rezultati

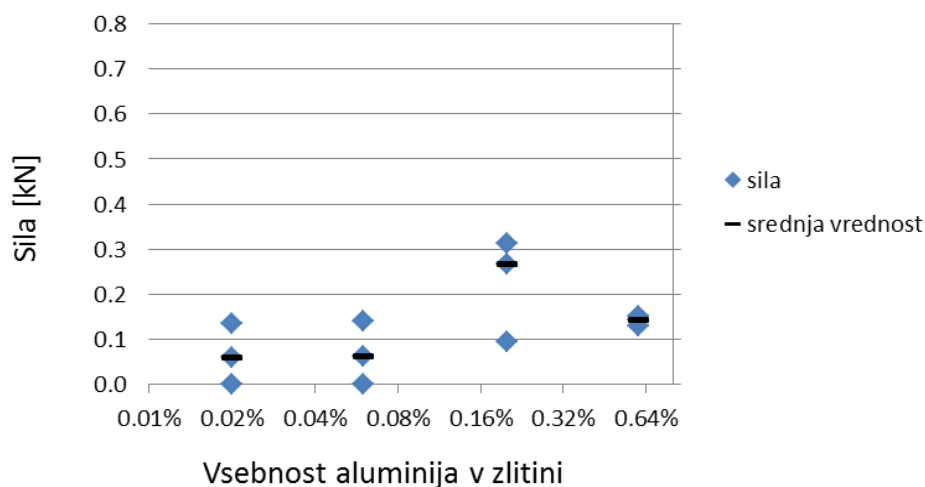
S prevleko iz kositra na kovinski foliji se je poizkusilo ustvariti večjo močnejšo adhezijo z zlitino, ki tudi sama vsebuje v največji meri enako kovino.

Preglednica 6: Vzorci z uporabo kositrne prevleke na kovinski foliji Dilaton 51

Oznaka vzorca	Tip prevleke	Vsebnost aluminija [%]	Sila v [kN]	Površina zvara v [cm ²]	Tip porušitve [1-6]	Sila [kN/cm ²]
R128	Sn	0,6	0,654	5,057	3	0,129
R129	Sn	0,6	0,505	3,531	3,6	0,143
R157	Sn	0,6	0,516	3,420	1,2	0,151
R126	Sn	0,2	0,724	7,628	2,6	0,095
R127	Sn	0,2	1,561	5,823	6	0,268
R156	Sn	0,2	1,238	3,970	2	0,312
R124	Sn	0,06	0,869	6,136	2,6	0,142
R125	Sn	0,06	0,006	4,675	2	0,001
R155	Sn	0,06	0,489	7,632	2	0,064
R122	Sn	0,02	0,370	6,223	2	0,059
R123	Sn	0,02	0,000	7,627	2	0,000
R154	Sn	0,02	0,706	5,184	2	0,136
R121	Sn	0,005	0,000	6,225	2	0,000
R150	Sn	0,005	1,136	7,119	2	0,160
R153	Sn	0,005	0,045	6,946	2	0,006

Tip porušitve vzorca [1-6]	
1	Porušitev stekla na robu
2	Razslojevanje med steklom in zlitino
3	Razslojevanje med kovinsko folijo in zlitino
4	Mešano razslojevanje
5	Razslojevanje kovinske folije
6	Razslojevanje stekla na področju zvara

Strižna trdnosti za vzorce s kositrno prevleko



Grafikon 6: Vzorci strižne trdnosti s kositrno prevleko

Na prikazanem zgornjem grafikonu 6 je razviden velik vpliv vsebnosti aluminija v zlitini. Najboljše vsebnosti aluminija se gibljejo v okolici med 0,06 % ter 0,6 %. Pridobljene sile so razmeroma nizke.

Pri izvedbi vzorcev je prišlo do dodatnega topljenja prevleke iz kositra na površini kovinske folije. Leto je povzročala dobra toplotna prevodnost same kovinske folije, ki je bila izpostavljena enaki temperaturi na vzorcu kot kovanec zlitine, položen na stekleno površino.

Vzorci z nikljevo prevleko in njihovi rezultati

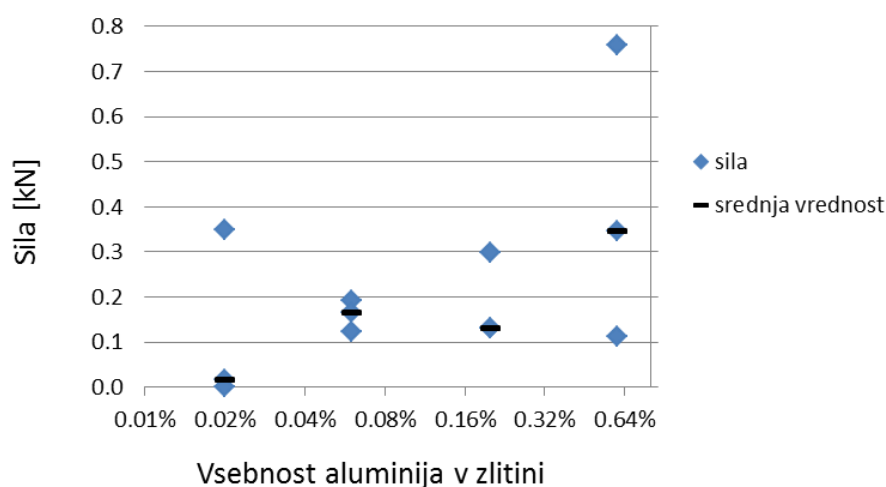
Za prevleko iz niklja se je predvidevala velika kompatibilnost med kovinsko folijo in nikljevo prevleko, ter prav tako med prevleko in zlitino.

Preglednica 7: Vzorci z uporabo nikljeve prevleke na kovinski foliji Dilaton 51

Oznaka vzorca	Tip prevleke	Vsebnost aluminija [%]	Sila [kN]	Površina zvara [cm ²]	Tip porušitve [1-6]	Sila [kN/cm ²]
R138	Ni	0,6	0,942	1,241	2,6	0,759
R139	Ni	0,6	0,315	2,770	1	0,114
R168	Ni	0,6	0,582	1,676	1,3	0,347
R136	Ni	0,2	0,220	1,693	3	0,130
R137	Ni	0,2	0,630	4,780	3,6	0,132
R161	Ni	0,2	1,103	3,702	6	0,298
R134	Ni	0,06	0,355	2,875	2	0,123
R135	Ni	0,06	0,461	2,380	2	0,193
R160	Ni	0,06	0,395	2,385	2	0,165
R132	Ni	0,02	0,043	2,407	2	0,018
R152	Ni	0,02	0,730	2,087	2	0,350
R159	Ni	0,02	0,000	3,217	2	0,000
R131	Ni	0,005	0,975	1,992	2	0,489
R151	Ni	0,005	0,227	4,898	2	0,046
R158	Ni	0,005	0,349	2,185	2	0,159

Tip porušitve vzorca [1-6]	
1	Porušitev stekla na robu
2	Razslojevanje med steklom in zlitino
3	Razslojevanje med kovinsko folijo in zlitino
4	Mešano razslojevanje
5	Razslojevanje kovinske folije
6	Razslojevanje stekla na področju zvara

Strižna trdnosti za vzorce z nikljevo prevleko



Grafikon 7: Vzorce strižne trdnosti z nikljevo prevleko

V grafikonu 7, prikazanem zgoraj, je opazen velik razstros podatkov, kar nam poda slabše rezultate kljub trem enakim vzorcem za vsako izmed različnih zlitin. Sile, pri katerih se je vzorec porušil, so tudi v tem primeru razmeroma nizke. Z najvišjo vsebnostjo aluminija pridobimo najvišje rezultate. Vzorec R138, ki vsebuje 0,6 % aluminija, prenese silo velikosti 0,8 kN.

Vzorce z bakreno prevleko in njihovi rezultati

Pri prevleki iz bakra se je poiskovalo doseči veliko adhezijo med bakrom in kositrom ter s tem izboljšanje kakovosti zvara med kovinsko folijo in zlitino, ki je najbolj kritična pri postopku roba okna.

Preglednica 8: Vzorce z uporabo bakrene prevleke na kovinski foliji Dilaton 51

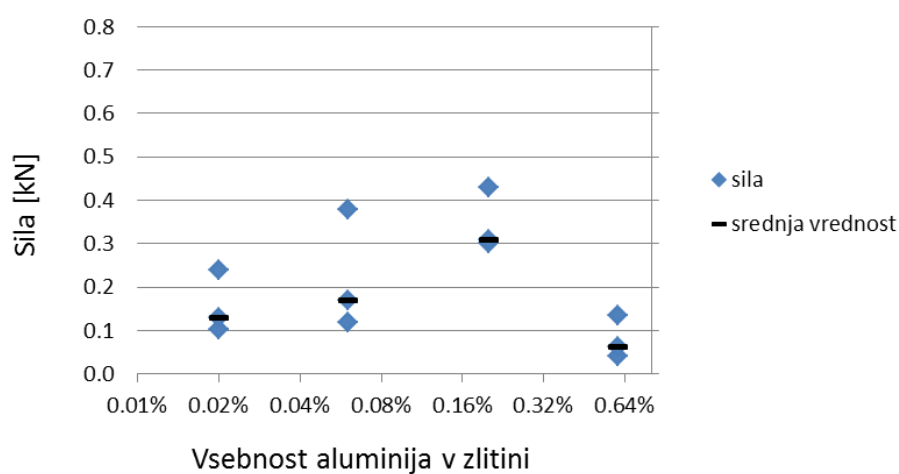
Oznaka vzorca	Tip prevleke	Vsebnost aluminija [%]	Sila [kN]	Površina zvara [cm ²]	Tip porušitve [1-6]	Sila [kN/cm ²]
R148	Cu	0,6	0,08175	1,960	3	0,042
R149	Cu	0,6	0,222	3,655	4,6	0,061
R167	Cu	0,6	0,44125	3,298	6	0,134
R146	Cu	0,2	1,4645	4,886	5	0,300
R147	Cu	0,2	1,194	3,871	4	0,308
R166	Cu	0,2	1,4415	3,359	5	0,429
R144	Cu	0,06	1,214	3,217	2,6	0,377
R145	Cu	0,06	0,48975	4,178	6	0,117
R165	Cu	0,06	1,266	7,494	2	0,169
R142	Cu	0,02	0,58725	5,713	2,6	0,103
R143	Cu	0,02	1,4145	5,948	6	0,238
R164	Cu	0,02	0,29175	2,271	2	0,128
R140	Cu	0,005	0,4065	7,306	2	0,056
R141	Cu	0,005	0,4855	6,067	2,6	0,080
R163	Cu	0,005	0,1995	7,219	2	0,028

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 8

Tip porušitve vzorca [1-6]	
1	Porušitev stekla na robu
2	Razslojevanje med steklom in zlitino
3	Razslojevanje med kovinsko folijo in zlitino
4	Mešano razslojevanje
5	Razslojevanje kovinske folije
6	Razslojevanje stekla na področju zvara

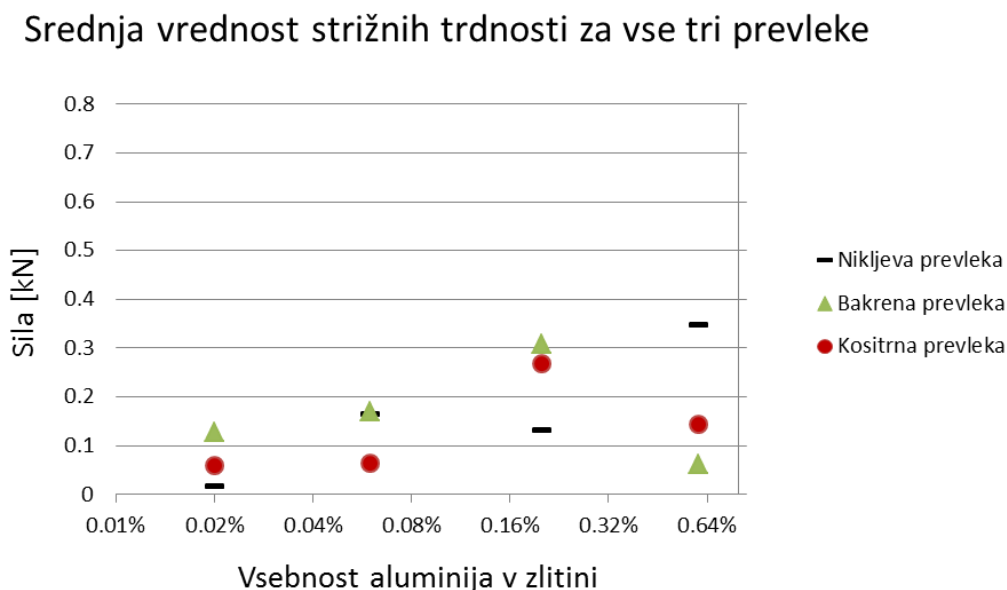
Strižna trdnosti za vzorce z bakreno prevleko



Grafikon 8: Vzorci strižne trdnosti z bakreno prevleko

Iz grafikona 8 je razviden velik vpliv različne vsebnosti aluminija v zlitini. Najboljše rezultate dobimo z vsebnostjo 0,2 % aluminija v kositru. Raztresenost rezultatov pri tej vsebnosti ni velik ter lahko sklepamo, da je pridobitev rezultatov velik približek dejanskemu stanju. Tudi pri bakreni prevleki je rezultat pridobljenih rezultatov razmiroma nizek, še posebno v primerjavi z varjenjem stekla in stekla v tako imenovani sendvič strukturi.

Srednja vrednost strižnih trdnosti za vse tri prevleke



Grafikon 9: Srednje vrednosti strižnih trdnosti za vse tri kovinske prevleke

Na zgoraj prikazanem grafikonu 9 je opazna razlika med posameznimi prevlekami. Najboljše rezultate za bakreno in kositrno prevleko pridobimo pri 0,2 % aluminija v kositru. Pri višji vsebnosti aluminija se nam kakovost zvara niža, kar je posledica slabše adhezije med kovino in zlitino.

Pri nikljevi prevleki dosežemo najvišjo vrednost pri 0,6 % vsebnosti aluminija, kjer je dovolj aluminija za dobro adhezijo med stekleno podlago in zlitino. Pri nižjih vsebnostih je prišlo do ločitve zvara med stekleno podlago in zlitino, pred ločitvijo kovinske folije in zlitine. Pri tem lahko sklepamo, da sta prevleka in zlitina zelo kompatibilni tudi pri višanju vsebnosti aluminija.

6.3.3.2. Razlaga rezultatov vzorcev s kovinsko prevleko

Iz grafikonov 6, 7 in 8 je razvidna velika razpršenost podatkov kljub trem opravljenim testiranjem vzorcev za posamezno meritev. Pridobljena je bila tudi razmeroma nizka trdnost za vse tri prevleke. Pri nekaterih vzorcih je bila vez tako močna na spodnjem delu spoja, da je prišlo do strganja stekla na tem območju. Hipotetično se kovinska folija, ki je debeline 100 μm , pri nalaganju obtežbe raztegne. Zato se pri testiranju strižne trdnosti na spodnjem delu zvara pojavi lokalna obremenitev. Torej je kovinska folija pri veliki obtežbi dovolj elastična, da se sila prenese na spodnji del zvara. Pri računu celotne površine zvara privede do nižje vrednosti rezultatov.

Za izdelavo okna je potrebno izdelati kovinsko folijo, ki je pritrjena po celotnem robu okna. Tako folijo sestavljajo štiri posamezni deli, katere se medsebojno privari. Pri kovinski foliji, ki ima na površini eno izmed zgoraj opisanih prevlek, se pojavi problem prekrivanja štirih zvarov, ki združujejo posamezne dele kovinske folije. Pri zvarih se lahko pojavijo napake, ki se s kasnejšim nanosom ene

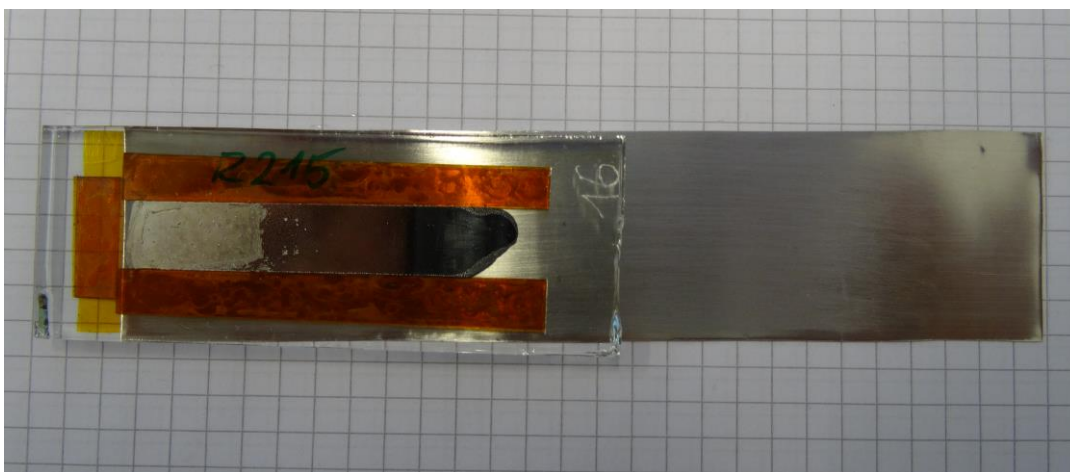
izmed kovinskih prevlek popolnoma prekrije. Vključno z nezadovoljivimi rezultati strižne trdnosti za vse tri različne prevleke smo se odločili za uporabo kovinske folije brez dodatnega premaza.

6.3.4. Mehansko testiranje s postopkom lupljenja

Na podlagi skupnega dogovora z nemškim inštitutom (Fraunhofer–Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E.V.) v Friburgu je prišlo zaradi velike razpršenosti rezultatov do nove zamisli testiranja vzorcev. Zamisel je bila testiranje vzorcev s postopkom lupljenja. Ta postopek nam omogoča lupljenje oziroma ločevanje kovinske folije s steklene površine, pri tem se meri sila, ki je potrebna za ločitev posameznega dela. Ker na ta test ne vpliva elastičnost kovinske folije, naj bi dobili veliko manj razpršene rezultate. Tak postopek pa je tudi veliko zahtevnejši pri izdelavi vzorcev.

6.3.4.1. Izdelava vzorcev ter opis postopka testiranja

Izdelava vzorcev je potekala po opisanem postopku izdelave vzorcev strižne trdnosti. Vendar je za test lupljenja potrebno izdelati zvar enake širine, da se ga lahko po končanem testiranju primerja z drugimi vzorci. Širina zvara vzorcev lupljenja je 10 mm ter ne sme biti krajša od 40 mm. S tem zagotovimo daljše območje testiranja, kar je razvidno iz spodaj prikazane slike 14 vzorca R215.

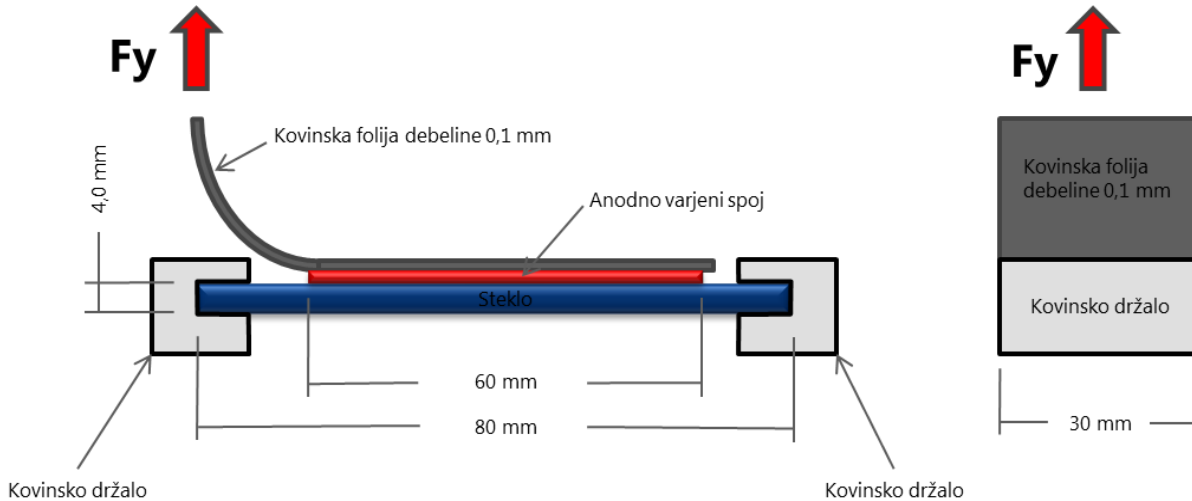


Slika 14: Vzorec R215 za postopek lupljenja (SnAl 0,02 %), s predhodno analizo interferometrije

Problem se pojavi pri zlitini, kajti v času ogrevanja se ne topi homogeno, kar privede do lokalnega razlitja. Tako razlitje pomeni premajhno dolžino zvara kot tudi sklenitev električnega toka. Zlitina namreč ustvari kontakt s spodnjo površino grelna plošče. Seveda pri nanosu električnega toka pride do kratkega stika zaradi povezave obeh kovin. Posledično na takem vzorcu anodnega varjenja ni mogoče opraviti.

Opis postopka

Na sliki 15 je prikazan način testiranja vzorcev s postopkom lupljenja. V izdelano čeljust se vstavi stekleni vzorec s kovinsko folijo, pritrjeno na njegovem zgornjem delu. Čeljust drži steklo na svojem mestu, da se ta med testiranjem ne premika.



Slika 15: Grafični prikaz naprave za testiranje vzorcev s postopkom lupljenja

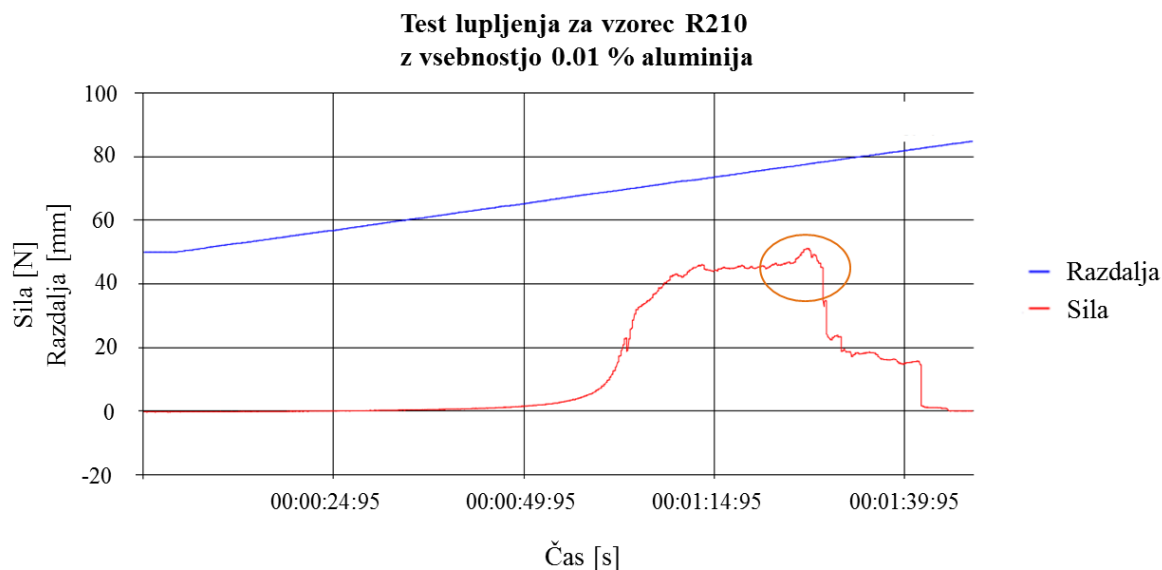
Kovinska folija mora biti dovolj dolga, da se jo lahko vpne v držalo, ki nato vleče oziroma lupi folijo s površine stekla. Grafični prikaz je dan na sliki 14. Pri tem s pomočjo računalnika beležimo naneseno silo v razmerju z dolžino lupljenja. Rezultati nanesene sile so odraz moči spoja zvara med stekleno podlago in kovinsko folijo.

6.3.4.2. Rezultati testiranj s postopkom lupljenja

Testiranje je podalo grafe, ki ponazarjajo silo, potrebno za ločitev kovinske folije Dilaton od steklene površine. Za vse vzorce se je na podlagi predhodnih testiranj uporabila kovinska folija Dilaton, ki vsebuje 48 % niklja ($Fe_{49}Ni_{48}$). Grafi prikazujejo začetno oddaljenost zgornje steklene površine vzorca od kovinske folije Dilaton, kjer se nanaša obtežba. Razdalja je merjena v milimetrih, vendar ukrivljenost kovinske folije pri postopku lupljenja ni upoštevana. Začetna razdalja je nastavljena na oddaljenost 50 mm. Na grafu je razvidna kot modra črta, ki poteka z začetne višine 50 mm. Zaradi ukrivljenosti kovinske folije pride do rahlega zamika pri mirjenju oddaljenosti vzorca, ki je razvidna kot vodoravna modra črta na začetku mirjenja. Ko se kovinska folija dovolj oddalji od steklene površine, se prične obtežba prenašati na zvar ter se nato odraža kot kakovost zvara. Z grafi se nato beleži na celotni poti oddaljenost in silo, ki je potrebna za ločitev kovinske folije s steklene podlage. Sila za posamezni vzorec, ki presega 100 N v primeru testa z lupljenjem širine 10 mm, pomeni izjemno dobre rezultate. Za testiranje se je opravilo 16 vzorcev, ki imajo za vsak različen pogoj izdelave 4 ponovitve. Izdelovali so se vzorci z istimi pogoji s spremenjeno vsebnostjo aluminija v kositru.

Vzorci z vsebnostjo aluminija 0,01 %

Test lupljenja za vzorec R210:



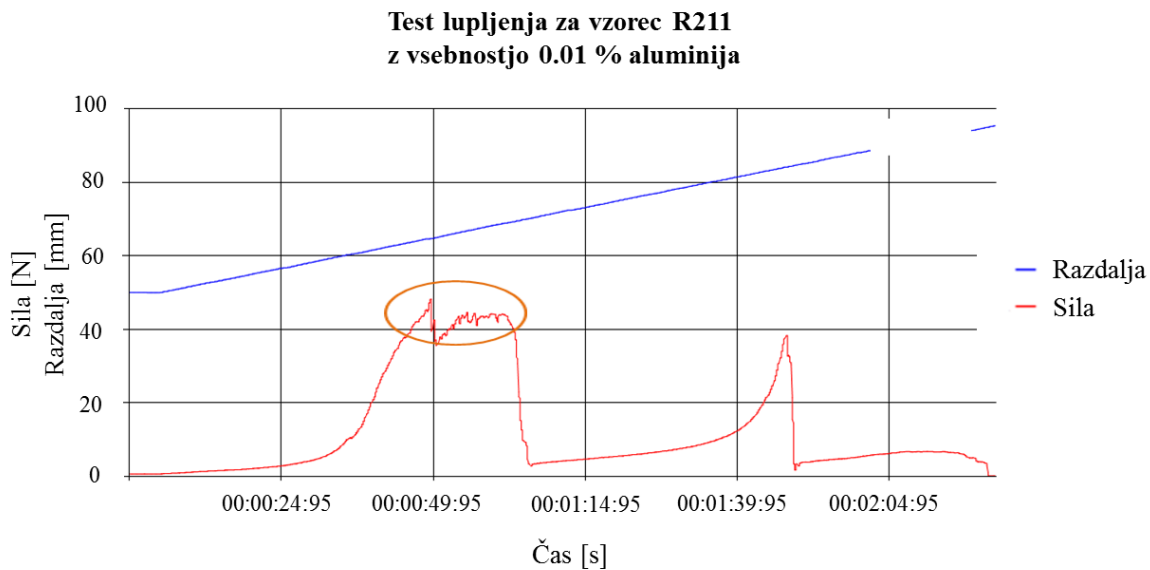
Grafikon 10: Rezultat testa lupljenja za vzorec R210 z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Na grafikonu 10 je prikazana sila, potrebna za ločitev kovinske folije od površine stekla. Pri tem se je pridobila maksimalna sila na delu vzorca pred položenim kovancem izdelane zlitine, kot ga prikazuje obkroženi del grafikona 10 in slike 16. Začetni del vzorca ni dosegel spoja na kovinsko folijo, kar je iz grafikona razvidno kot nična sila. Preostali del vzorca je dosegel enakovreden spoj po celotni dolžini z najvišjo doseženo silo 51 N. Zadnji del vzorca z doseženo silo okoli 18 N se ne upošteva zaradi predhodno oksidiranega kovanca zlitine.



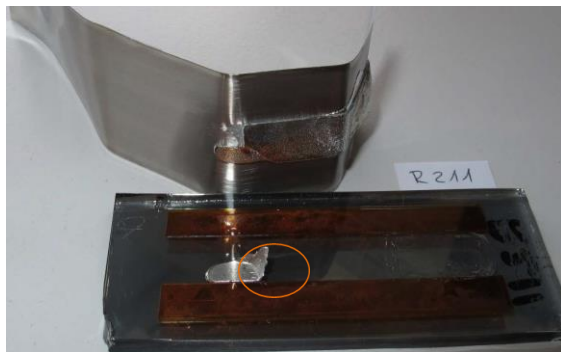
Slika 16: Vzorec R210 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R211:



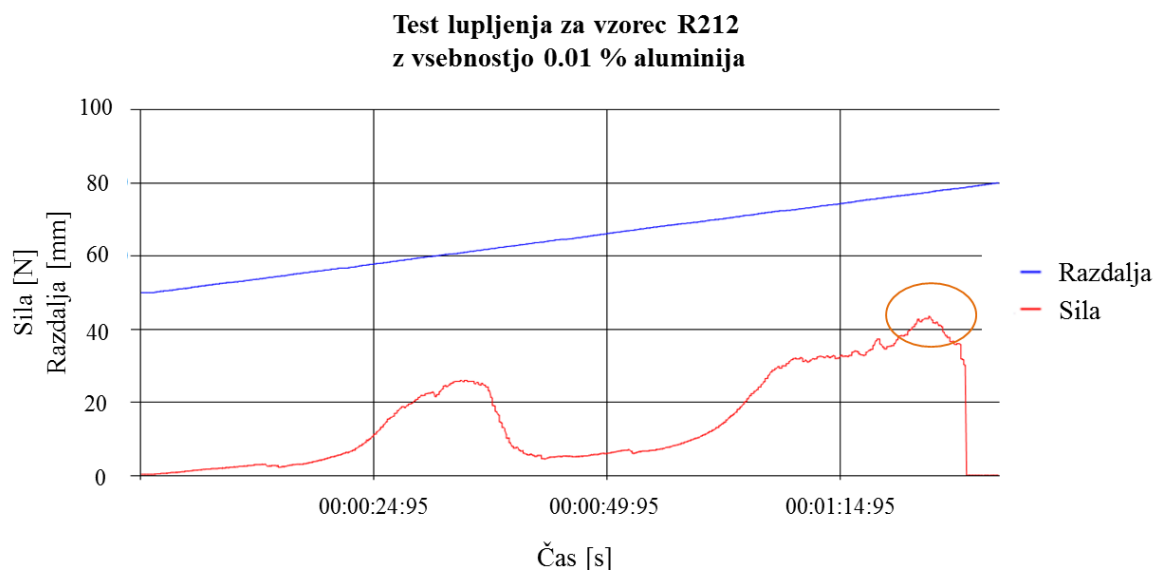
Grafikon 11: Rezultat testa lupljenja za vzorec R211 z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Iz grafikona 11 je razvidna kakovost na dveh delih vzorca z vmesnim delom nizke kakovosti. Na tem delu je razvidna slaba interakcija s steklom med postopkom anodnega varjenja. Začetni del zvara dosega višjo kakovost na stekleno površino, kar je razvidno s slike 17. Maksimalna dosežena sila na vzorcu R211 je bila 48 N, kot ga prikazuje obkroženi del grafikona 11 in slike 17. Prav tako se je na tem delu vzorca dosegla enakovredna kakovost zvara na stekleno površino in kovinsko folijo.



Slika 17: Vzorec R211 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R212:



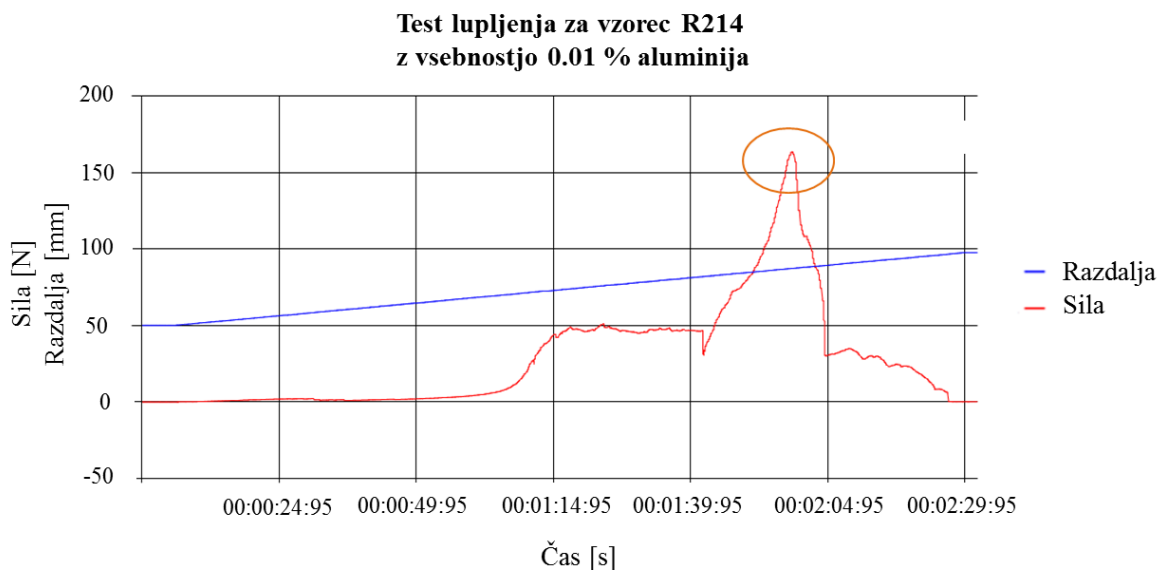
Grafikon 12: Rezultat testa lupljenja za vzorec R212 z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Na vzorcu R212 je bila najvišja sila razporejena na dva dela, kar je razvidno iz grafikona 12. Boljša vez se je dosegla pri zvaru na stekleno površino. S slike 18 je razvidna dobra kohezija med zlitino in kovinsko folijo. Dobra kohezija, se odraža kot poškodba na kovinski foliji, ki ga prikazuje obkroženi del slike 18, ter temu enakovredno najvišjo silo na obkroženem delu grafikona 12. Svoj najvišji odpor je vez dosegla ravno pred položenim kovancem zlitine, v višini 44 N.



Slika 18: Vzorec R212 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R214:



Grafikon 13: Rezultat testa lupljenja za vzorec R214 z vsebnostjo 0,01 % aluminija

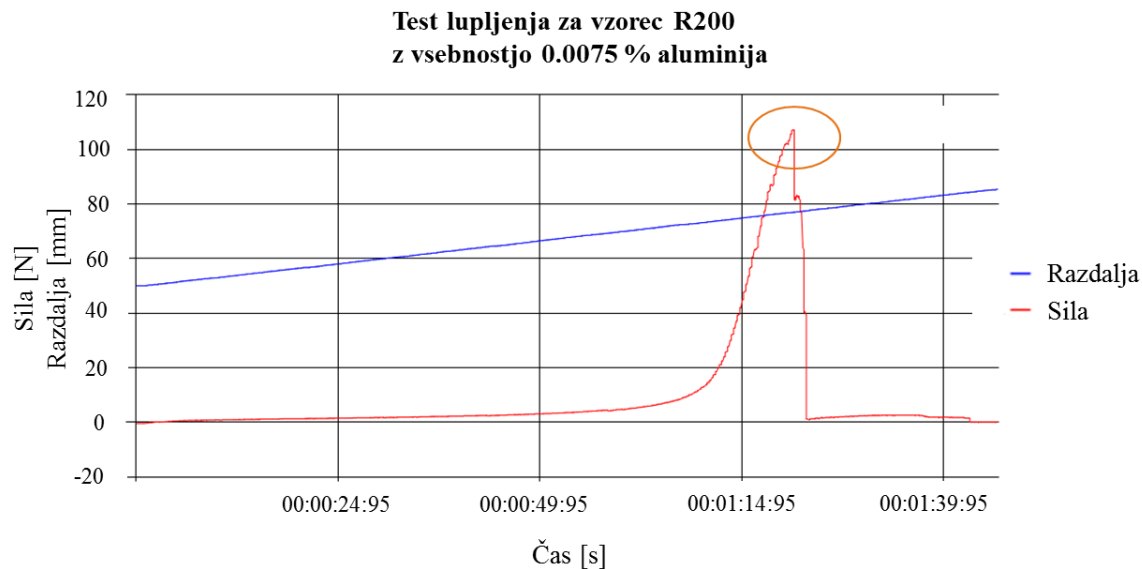
Kakovostna sila se je pri vzorcu R214 dosegla skozi celotno pot kot prikazuje grafikon 13. Tam kjer je zvar enakovreden na steklo in kovinsko folijo, dosežemo najvišjo silo v višini 164 N, kot ga prikazuje obkroženi del grafikona 13 in slike 19. S slike 19, je na tem delu razviden prehod iz močnejše interakcije na stekleno podlago na kakovostnejšo kohezijo kovinske folije proti zadnjemu delu vzorca. Na prvem delu vzorca je tako kakovost zvara višja na stekleno površino, na zadnjem delu pa kakovost na kovinsko folijo.



Slika 19: Vzorec R214 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,01 % aluminija

Vzorci z vsebnostjo aluminija 0,0075 %

Test lupljenja za vzorec R200:



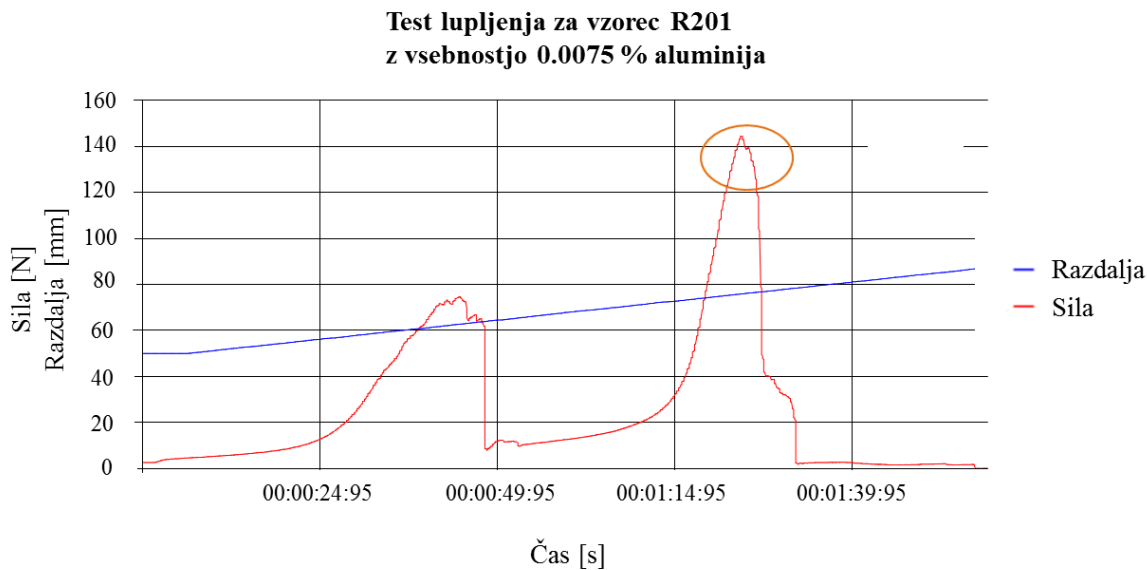
Grafikon 14: Rezultat testa lupljenja za vzorec R200 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Pred položenim kovancem zlitine dosežemo najvišjo silo v višini 107 N, ki je razvidna kot obkroženi del grafikona 14 in slike 20. Za vzorec R200 smo skozi celotno dolžino zvara pridobili slabe rezultate. S slike 20 je razvidna veliko močnejša kohezija na kovinsko folijo v primerjavi z adhezijo na stekleno podlago.



Slika 20: Vzorec R200 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R201:



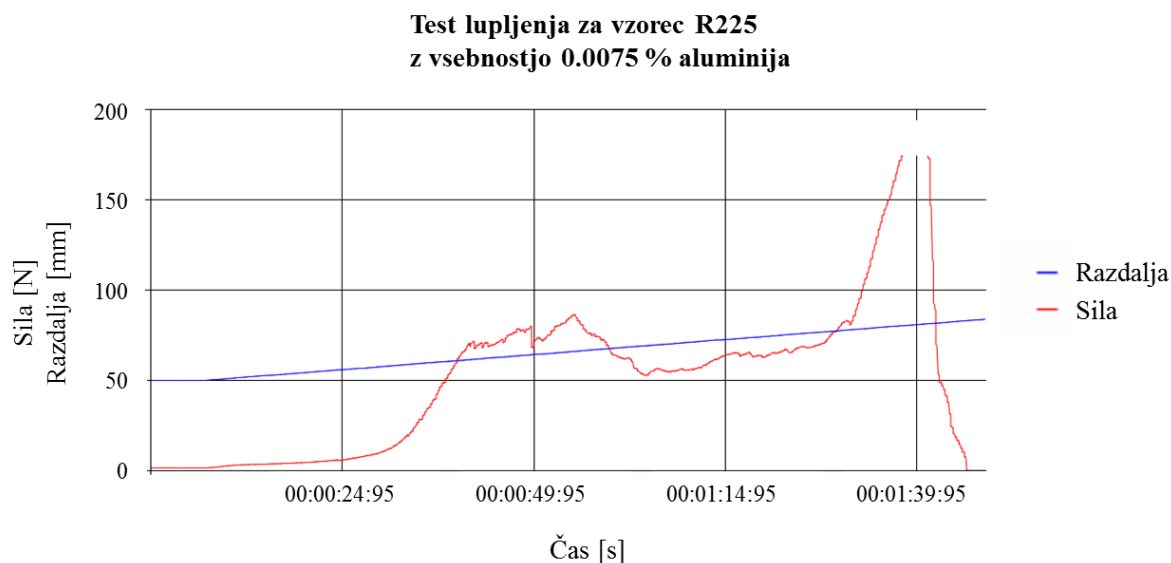
Grafikon 15: Rezultat testa lupljenja za vzorec R201 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Pri vzorcu R201 smo dobili dve visoki kakovosti zvara z vmesnim slabim delom, kar je razvidno iz grafikona 15. Skozi celotni vzorec je kakovost adhezije boljša na kovinsko folijo v primerjavi z zvarom na stekleno podlago. Svojo najvišjo silo zvar doseže na zadnjem delu vzorca, kot ga prikazuje obkroženi del grafikona 15, pred položenim kovancem zlitine v višini 144 N. Na tem delu se opazi tudi ostanke interakcije s stekleno podlago, kot je razvidno z obkroženega dela slike 21.



Slika 21: Vzorec R201 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R225:



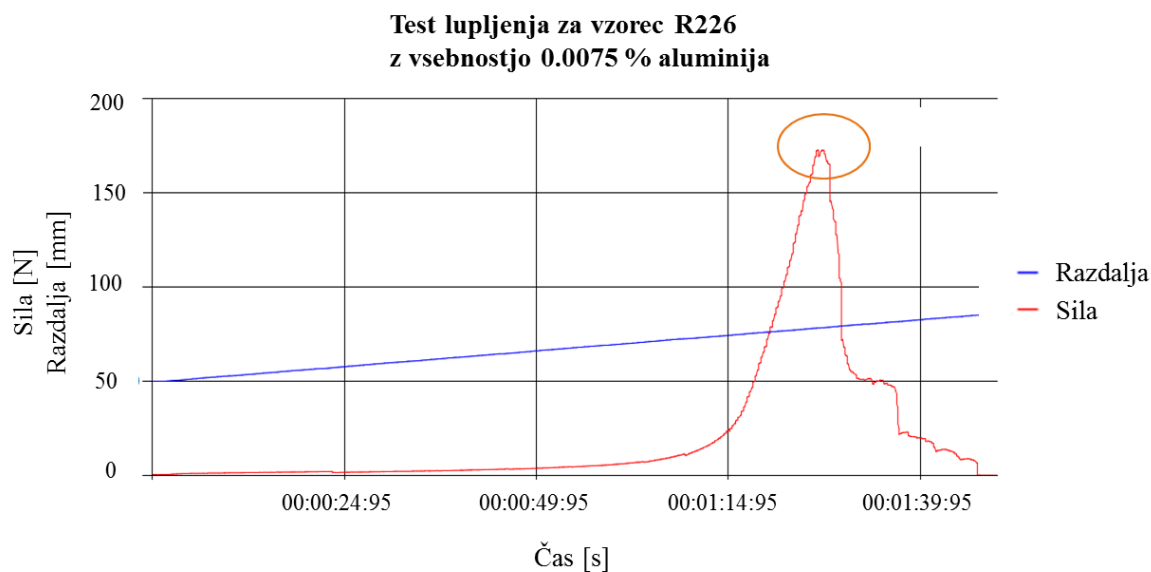
Grafikon 16: Rezultat testa lupljenja za vzorec R225 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Zaradi načina računalniškega zapisa se na grafikonu 16 ne vidi najvišja dosežena sila v velikosti 194 N. Skozi celotno pot vzorca R225 je sila zelo visoka. Zlitina je kakovostna tako na kovinsko folijo kot na stekleno površino, kar je razvidno iz ostankov zlitine na steklu vzorca (Slika 22). Najvišjo silo se je doseglo ravno pred položenim kovancem zlitine.



Slika 22: Vzorec R225 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R226:



Grafikon 17: Rezultat testa lupljenja za vzorec R226 z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

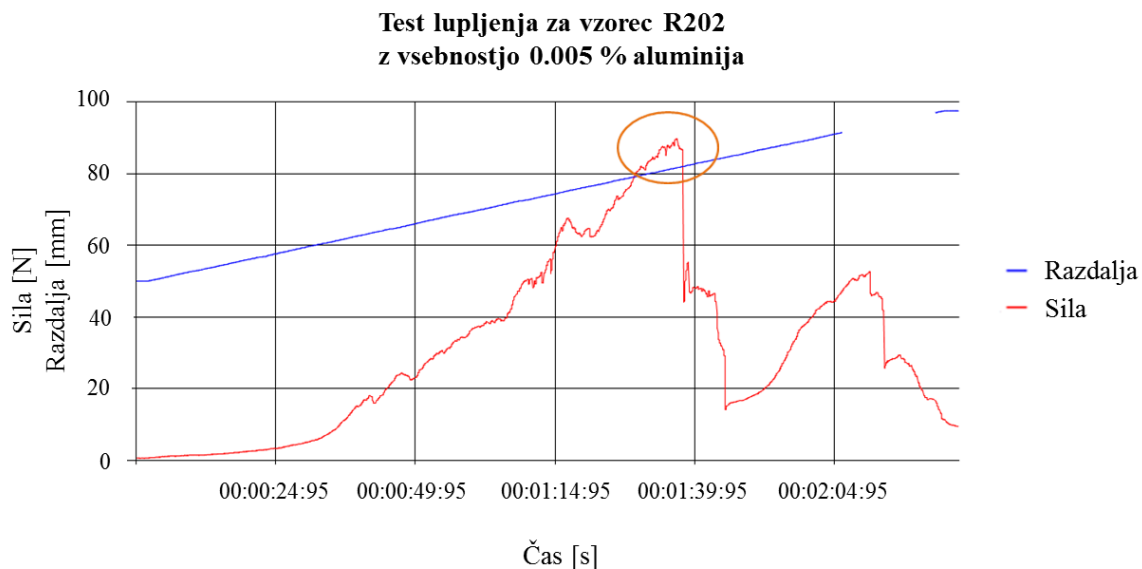
Vzorec R226 je dosegel najvišjo silo pred položenim kovancem zlitine v višini 173 N, kot je razvidno iz obkroženega dela grafikona 17. Adhezija med zlitino in kovinsko folijo je višja v primerjavi z zvarom na stekleno podlago. Na delu, kjer se nam pojavi najvišja sila, so vidni tudi ostanki zlitine na stekleni podlagi, kateri so obkroženi na sliki 23. Na tem delu je razviden tudi odraz enakovredne kakovosti spoja na obe površini.



Slika 23: Vzorec R226 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0075 % aluminija

Vzorci z vsebnostjo aluminija 0,005 %

Test lupljenja za vzorec R202:



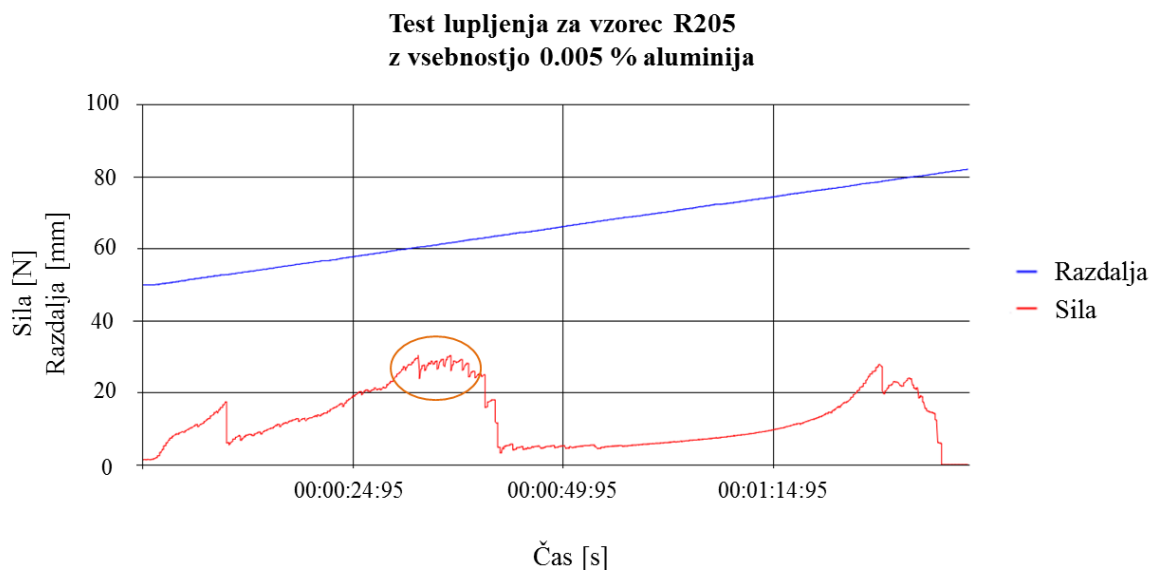
Grafikon 18: Rezultat testa lupljenja za vzorec R202 z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Iz grafikona 18 je razvidna velika sila, ki je bila potrebna za ločitev kovinske folije s steklene podlage. Sila je naraščala do sredinskega dela, kjer je dosegla višino 90 N in je razvidna iz obkroženega dela grafikona 18, ter slike 24. Na prvem delu vzorca je sila dosegla boljše vez na stekleno podlago, na zadnjem delu pa na kovinsko folijo, kot je razvidno s slike 24.



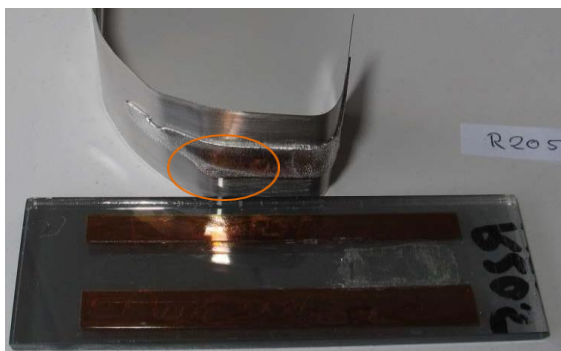
Slika 24: Vzorec R202 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R205:



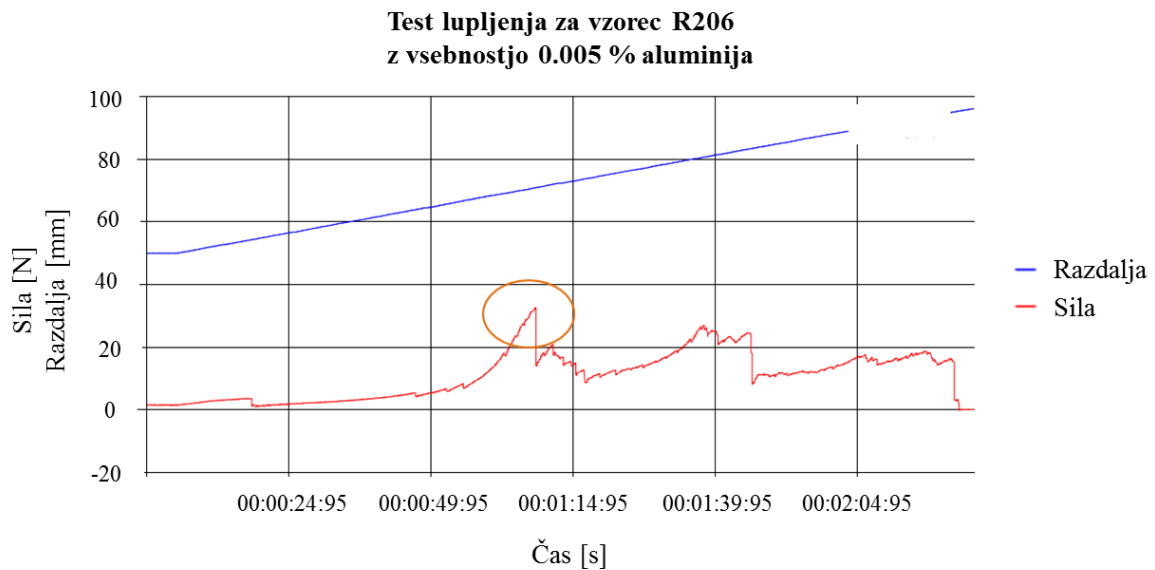
Grafikon 19: Rezultat testa lupljenja za vzorec R205 z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Iz grafikona 19 je za vzorec R205 razvidna šibka sila skozi celotno pot lupljenja kar je odraz slabe kakovosti adhezije. Boljša vez se je vzpostavila na kovinsko folijo, kot prikazuje slika 25. Najvišjo silo se je na vzorcu doseglo na sredini v višini 30 N, kot prikazuje obkroženi del grafikona 19 in slika 25.



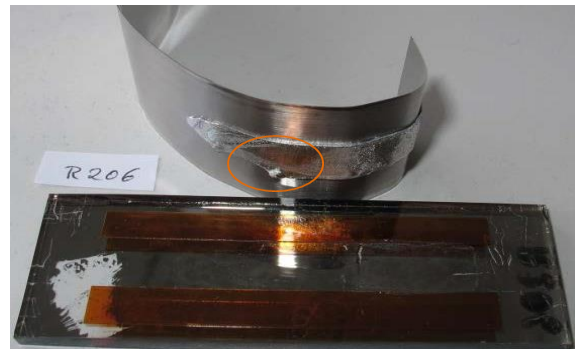
Slika 25: Vzorec R205 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R206:



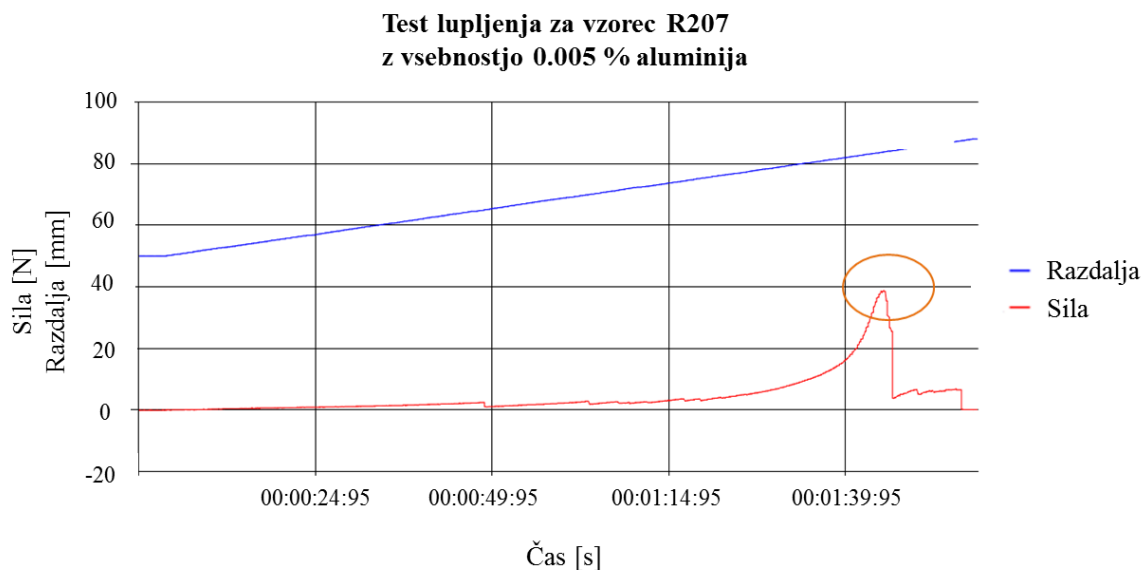
Grafikon 20: Rezultat testa lupljenja za vzorec R206 z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Dosegla se je šibka vez za vzorec R206 skozi celotno pot testiranja. Najvišja sila se je dosegla na začetku vzorca, ki s svojo višino 33 N, katero prikazuje obkroženi del grafikona 20 in slike 26, ne dosega bistvene razlike z ostalim delom vzorca. Na sliki 26 je vidna bistveno boljša vez na kovinsko folijo skozi celotni vzorec.



Slika 26: Vzorec R206 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R207:



Grafikon 21: Rezultat testa lupljenja za vzorec R207 z vsebnostjo 0,005 % aluminija

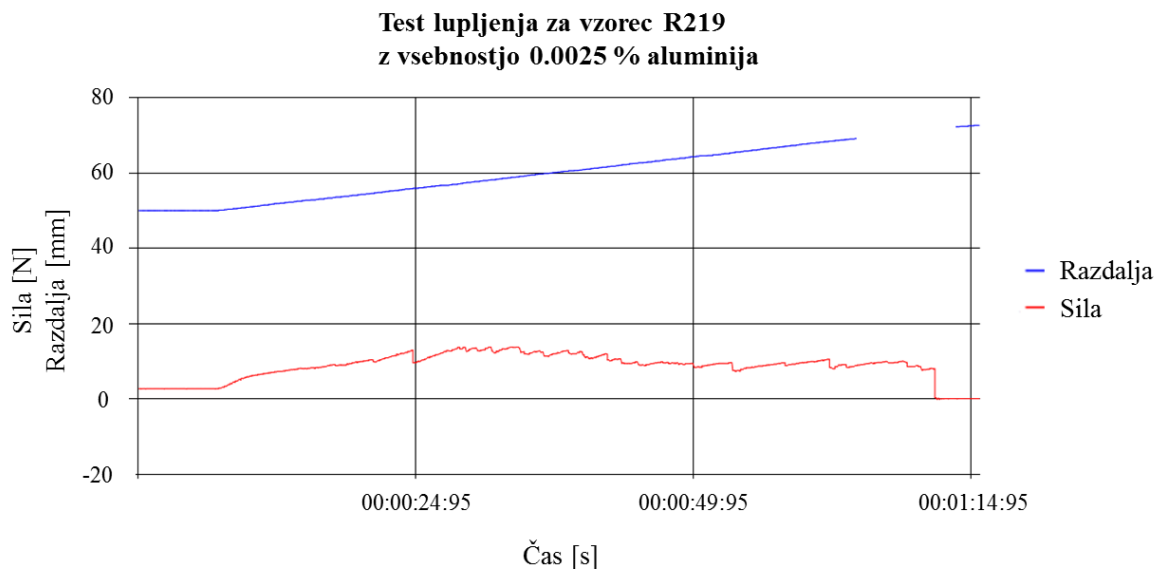
Tudi pri zadnjem vzorcu testiranja za vsebnost 0,005 % aluminija se je dosegla šibka vez skozi celotni vzorec. Pri tem se je najvišjo silo v višini 39 N, ki ga prikazuje obkroženi del grafikona 21 in slike 27, dosegla tik pred položenim kovancem zlitine. Na delu, kjer je bila dosežena najvišja sila, se opazi ostanke zlitine na stekleni podlagi (Slika 27). Boljša vez pa se je ustvarila na kovinsko folijo.



Slika 27: Vzorec R207 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,005 % aluminija

Vzorci z vsebnostjo aluminija 0,0025 %

Test lupljenja za vzorec R219:



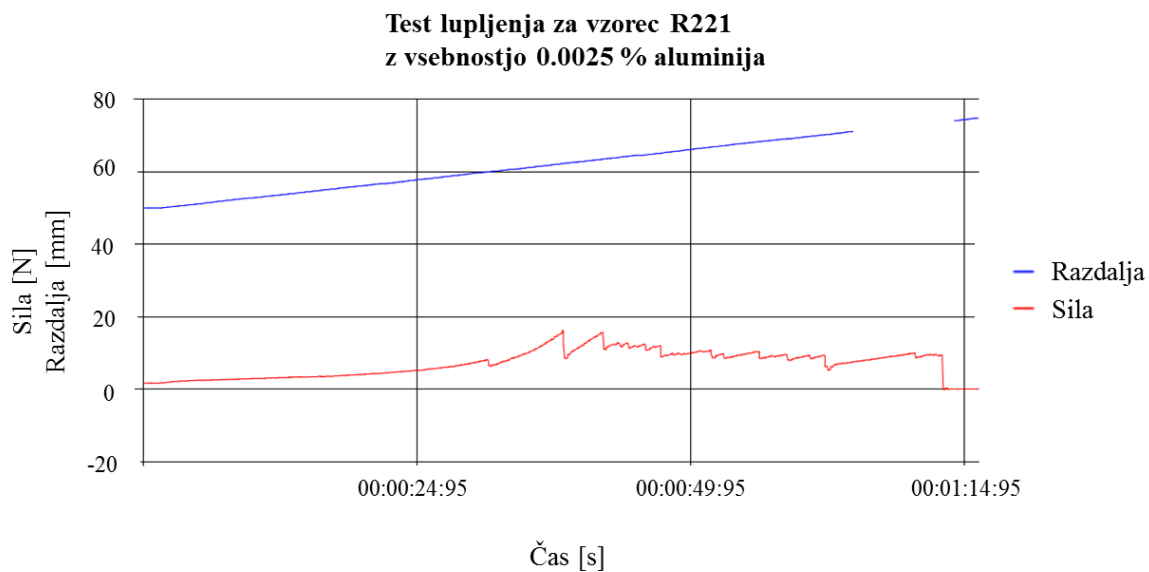
Grafikon 22: Rezultat testa lupljenja za vzorec R219 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Najvišja sila na vzorcu R219 je dosegla 14 N. Iz grafikona 22 je razvidno, da je višina potrebne sile za ločitev vzorca skozi celotno pot testiranja skoraj enakovredna. Na kovinsko folijo se je vzpostavila veliko močnejša vez (Slika 28), na stekleni podlagi pa ni sledu ostankov zlitine, kar pomni slabo adhezijo na stekleno površino.



Slika 28: Vzorec R219 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R221:



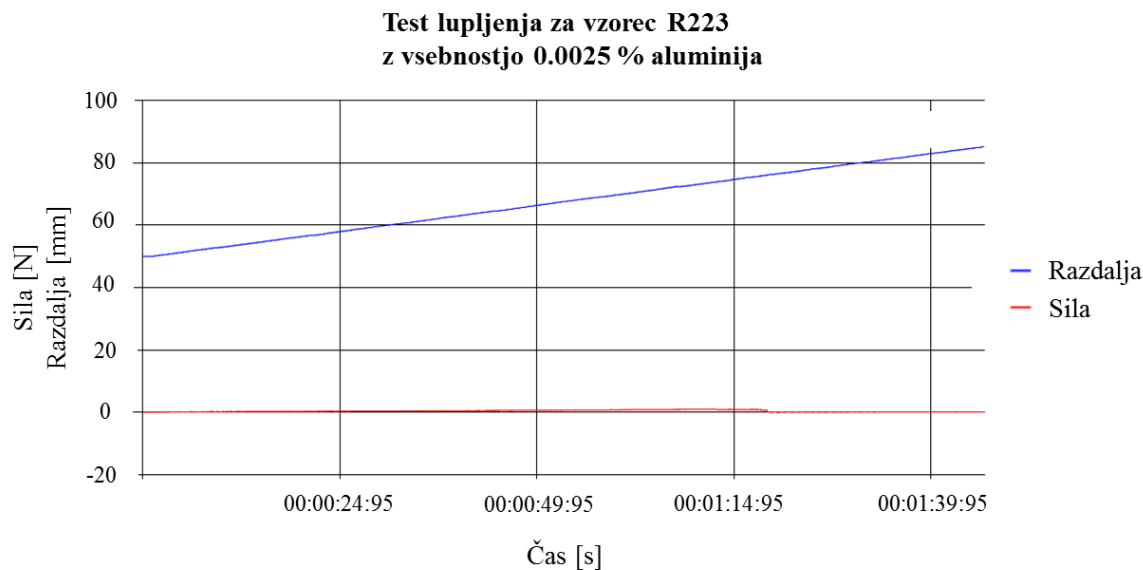
Grafikon 23: Rezultat testa lupljenja za vzorec R221 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Na vzorcu R221 se je dosegla izjemno šibka vez skozi celotni vzorec, kot je razvidno iz grafikona 23. Najvišja sila je v višini 16 N. Skozi celotni vzorec je vez močnejša na kovinsko folijo, kot prikazuje slika 29.



Slika 29: Vzorec R221 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R223:



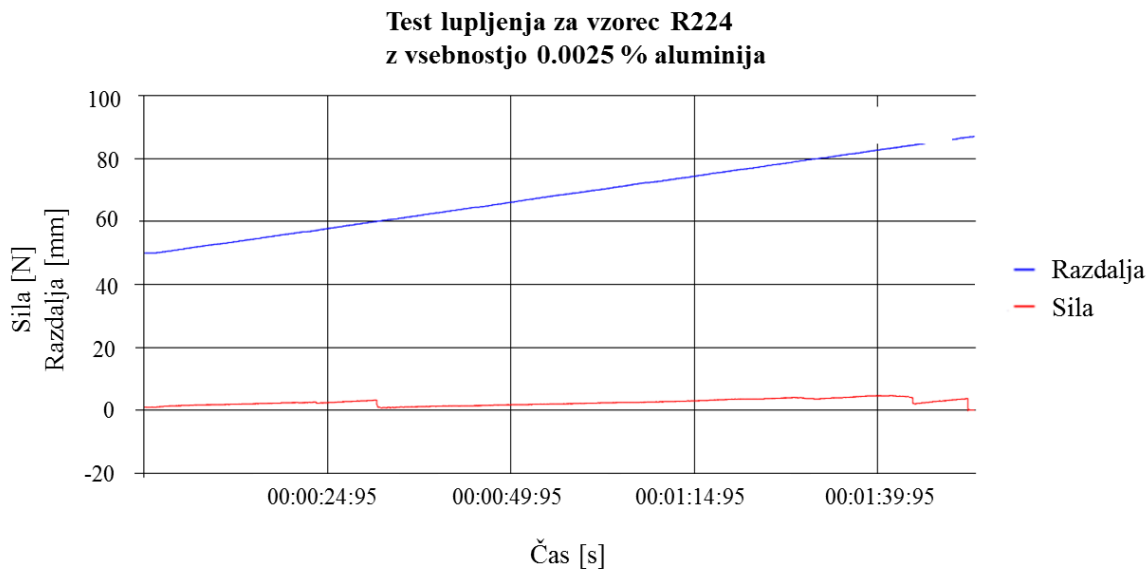
Grafikon 24: Rezultat testa lupljenja za vzorec R223 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Na vzorcu R223 se je izkazalo, da pri anodnem varjenju ni prišlo do interakcije s steklom, kar je očitno posledica majhne količine aluminija v zlitini. Višina sile, ki je potrebna za ločitev kovinske folije in stekla, je skoraj nična skozi celotno pot vzorca, kot prikazuje grafikon 24. Najvišja sila je bila v višini 1 N. Močnejša vez se je vzpostavila na kovinsko folijo, kar je razvidno na robu zlitine in kovinske folije, kjer je očitna dobra kohezija med obema materialoma (Slika 30).



Slika 30: Vzorec R223 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Test lupljenja za vzorec R224:



Grafikon 25: Rezultat testa lupljenja za vzorec R224 z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

Za vzorec R224 se je zopet dosegla izjemno slaba kakovost sile za ločitev vzorca. Najvišja sila je bila 5 N, ki se bistveno ne spreminja skozi celotno pot testiranega vzorca (Grafikon 25). Na sliki 31 je razvidna zelo dobra kakovost vezi s kovinsko folijo.



Slika 31: Vzorec R224 po končanem postopku lupljenja z vsebnostjo 0,0025 % aluminija

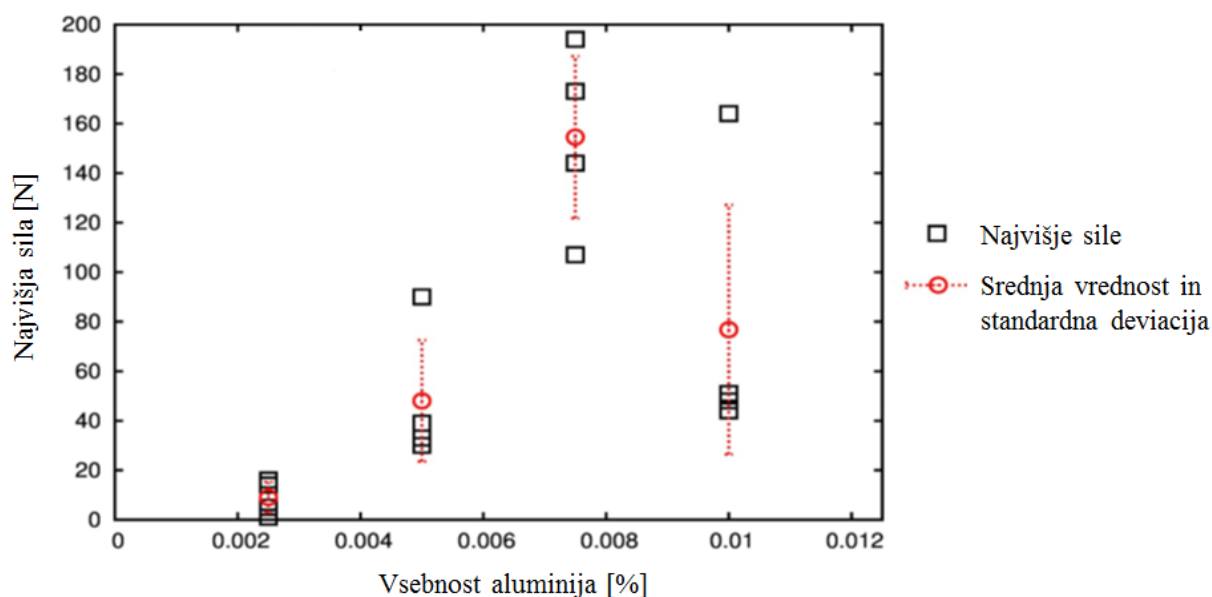
6.3.4.3 Razlaga rezultatov lupljenja

Na vseh grafih je očitna velika standardna deviacija med posameznimi vzorci z enako vsebnostjo aluminija. Velika razlika med vzorci je posledica različne vsebnosti aluminija v zlitini. Dodatni problem, ki je očitno iz grafov, je nehomogenosti zvara skozi celotno pot posameznega vzorca. Maksimalna sila se dosega na določeni točki vzorca. Na koncu vsakega vzorca se pojavi zvar zelo nizke kakovosti dolžine okoli 20 mm zaradi oksidacije kovanca predhodno izdelane zlitine.

Preglednica 9: Najvišje dosežene sile, pridobljene s postopkom lupljenja za posamezni vzorec

Vsebnost aluminija	0,01 %	0,0075 %	0,005 %	0,0025 %
najvišje dosežene sile za posamezni vzorec [N]	44	107	30	1
	48	144	33	5
	51	173	39	14
	164	194	90	16
srednja vrednost	77	155	48	9
st. deviacija	50,4	32,7	24,5	6,2

Najvišje dosežene sile za test lupljenja



Grafikon 26: Najvišje dosežene sile, pridobljene s postopkom lupljenja ter raztros podatkov

Rezultati mehanskega testiranja, ki so prikazani v grafikonu 26, se močno razlikujejo glede na vsebnost aluminija v zlitini. S primerjavo rezultatov se je lahko selektivno izločilo vzorce, ki so imeli slabšo vez oziroma zvar. Najboljše rezultate smo dobili za vzorce z vsebnostjo SnAl 0,0075 %, kar je odraz enakovredne kakovosti spoja na kovinsko folijo in stekleno podlago. Najvišjo silo, ki je bila potrebna za ločitev kovinske folije s steklene podlage, se je pridobilo na zadnjem delu vzorca.

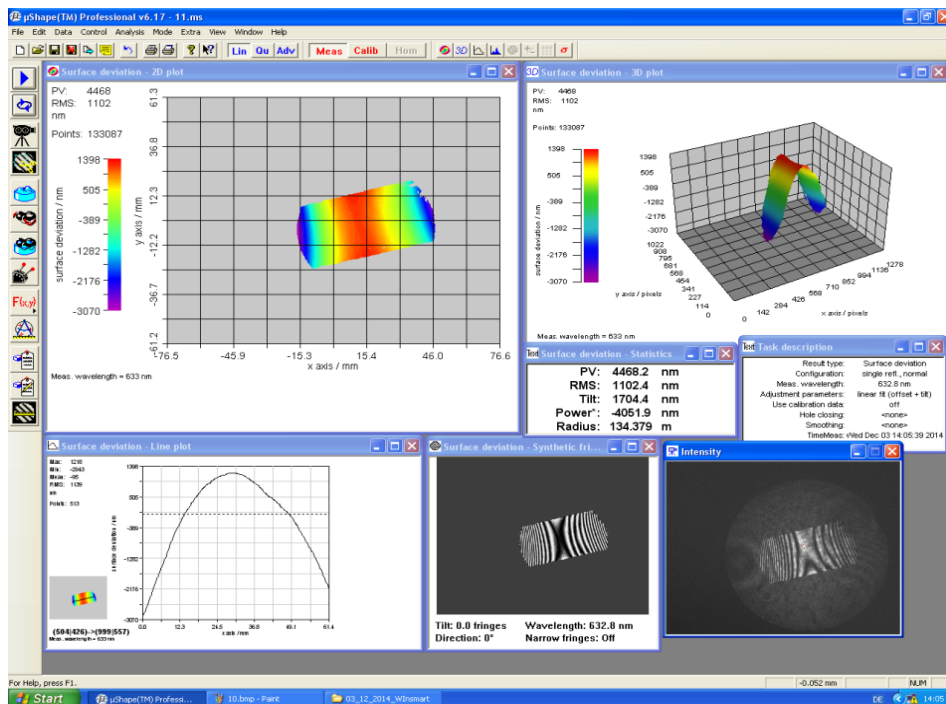
Pri izdelavi gibljivega roba okna je zvar širine 20 mm. Z dosegom najvišje sile na zadnjem delu vzorca dosegamo kakovost na najnujnejšem delu. S postopkom mehanskega lupljenja smo tako prišli do ugotovitve, da je za kakovostno vez med steklom in kovinsko folijo potrebna okoli 100-krat manjša vsebnost aluminija v primerjavi varjenja stekla s steklom. Najboljše rezultate pa pridobimo z uporabo 0,0075 % aluminija v kositru.

6.4. Stresi na stekleni površini

Zaradi varjenja s postopkom ALTSAB bi lahko prišlo do napetosti v sami zlitini zaradi razlik v koeficientu toplotnega raztezka med steklom in kovino. Kovinska folija Dilaton ($\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{48}$), ki se vari na rob steklene površine, je bila izbrana tako, da ima podobne temperaturne raztezke v primerjavi s samim steklom. Še vedno pa ostaja vmesni medij zlitine, ki lahko po končanem varjenju pri postopku hlajenja povzroča napetosti na stekleni površini. Tudi za vmesni medij zlitine je bila kovina izbrana na podlagi nizkega Youngovega modula ter visoke elastičnosti.

6.4.1. Interferometrija

Pri testiranju na strižno trdnost je pri nekaterih vzorcih prišlo do iztrga dela stekla s steklene podlage. Zaradi takih vzorcev se je sklepalo, da kljub dobri premissljenosti uporabi kovin lahko privede do napetosti pri ohlajanju na stekleni podlagi, ki jih povzroča zlitina. Posledično bi to privedlo do zmanjšanja kakovosti zvara.



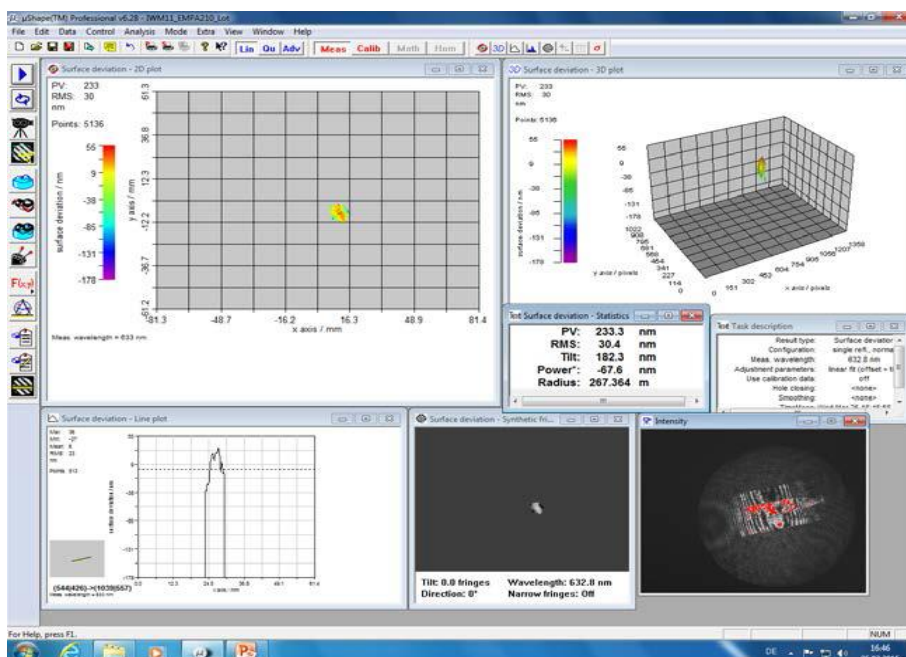
Slika 32: Primer izmere radija na stekleni površini vzorca R210 (program μ Shape (TM) Professional)

Test povzročenih napetosti na stekleni površini, katere povzročata anodno varjenje, naj bi opravili s tehniko interferometrije, pri kateri se s pomočjo valovanja ugotovi napetosti. Merjenje se opravi s pomočjo programa μ Shape (TM) Professional v6.17 (TRIOPTICS Berlin GmbH, 2011), kot prikazuje zgornja slika 32. Pri merjenju je potrebno upoštevati samo spodnjo površino stekla, ki bo sestavljala vzorec. Na steklu se že nahajajo napetosti, zato je potrebno opraviti predhodno analizo interferometrije pred postopkom anodnega varjenja na stekleno površino. Ker usmerjeno valovanje prehaja skozi stekleno površino, je za predhodno analizo interferometrije potrebno ustvariti ogledalo, ki omogoča odboj valovanja. Tako se je na zgornjo stekleno površino nanese voda, ki je omogočala odboj. S pomočjo merjenja odboja valovanja se je pridobilo potrebne rezultate, ki so odraz predhodnih stresov na stekleni površini. Rezultate se podaja v velikosti radija na steklu.

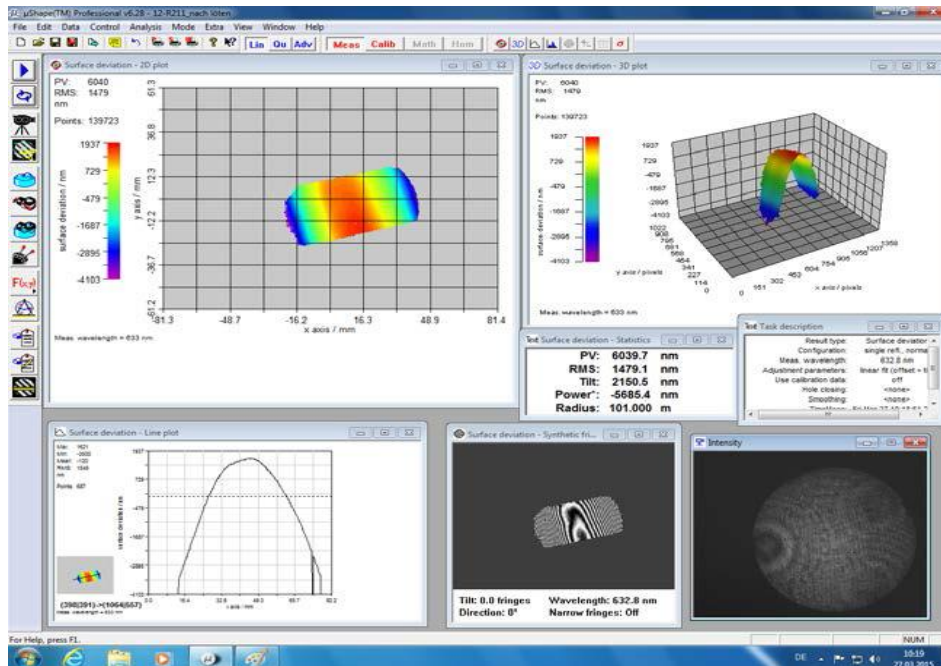
6.4.2. Ponovna interferometrija

Po končanem postopku varjenja kovinske folije Dilaton na stekleno površino je potrebna ponovna interferometrija. Primerjava obeh izmer interferometrije je pokazatelj povzročenih napetosti zaradi anodnega varjenja na stekleni površini. Razlika je podana v izračunanem radiju pred in po postopku anodnega varjenja. Večji je izmerjeni radij, manjše so napetosti na stekleni površini.

Pri ponovni interferometriji na vzorcih po končanem postopku anodnega varjenja se je pojavil problem anodnega zvara na nasprotni strani steklene površine. Izkazalo se je, da zlitina, ki sestavlja zvar in je sedaj privarjena na stekleno površino, tako močno odbija valovanje, da meritev ni bilo mogoče opraviti, kot prikazuje spodnja slika 33.



Slika 33: Visoka refleksija na anodnem zvaru vzorca R211 (program μShape (TM) Professional)



Slika 34: Refleksija na premazu platine vzorca R211 (program µShape (TM) Professional)

Refleksijo na anodnem zvaru se je preprečilo z dodatnim nanosom tanke plasti platine na spodnjo površino stekla. Z odbojem valovanja od površine platine je bilo mogoče opraviti ponovno meritev radija, kot prikazuje zgornja slika 34. S primerjavo z izmerjenim radijem predhodne interferometrije se je lahko določilo napetosti na steklu, ki so posledica anodnega varjenja.

6.4.3. Rezultati interferometrije

Po končanem premazu platine vseh steklenih površin vzorcev z opravljeno predhodno analizo so se opravile ponovne izmere radija. Razlike v izračunanih radijih so rezultati napetosti na stekleni površini. Primerjava med obema pridobljenima izračunanima radijema pred in po postopku anodnega varjenja nam poda povzročene napetosti oziroma vpliv zvara na stekleno površino. Rezultati izračunanih radijev vzorcev so podani v spodnji preglednici 10.

Preglednica 10: Razlike v radijih za vzorce postopka lupljenja

Oznaka vzorca	Vsebnost aluminija [%]	Radij pred anodnim varjenjem [m]	Radij po anodnem varjenju [m]	Razlika obeh radijev [m]
R210	0,01	134	137	3
R211	0,01	108	101	7
R212	0,01	204	460	-256
R214	0,01	150	275	-125
R201	0,0075	0	0	0
R202	0,005	313	381	86
R205	0,005	349	398	49
R206	0,005	280	938	-658
R207	0,005	320	496	-176
R219	0,0025	242	204	38

S primerjavo obeh rezultatov interferometrije je razvidno, da pri vsebnosti 0,0075 % aluminija ni bilo povzročenih dodatnih napetosti po postopku varjenja. Pri štirih vzorcih je prišlo do sprostitve napetosti, torej so bile napetosti na stekleni površini manjše po končanem postopku varjenja, kar je v preglednici 10 podano z negativnimi vrednostmi v stolpcu »Razlike obeh radijev«. Pri ostalih vzorcih je prišlo do povzročenih napetosti, vendar so vrednosti le-teh zelo nizke.

Na podlagi testa lahko sklepamo, da s takimi vsebnostmi aluminija v kositru ne povzročamo napetosti, kot se je sprva predvidevalo pri testiranju na strižno trdnost. Pri testiranju strižne trdnosti je pri nekaterih vzorcih prišlo do iztrganja stekla na področju zvara. Torej iztrganje stekla iz vzorca ne povzroča dodatne napetosti, ampak kakovosten zvar s stekleno podlago.

6.5. Priprava šipe za vgradnjo zlitine

Za izdelavo gibljivega roba je predhodno potrebno pripraviti šipo velikosti 500 mm x 500 mm s pritrjeno kovinsko folijo. Šipo s kovinsko folijo se nato vgradi v peč, ki omogoča doseganje željene temperature. Celotni postopek je potrebno pred pričetkom gretja zaščititi s plinom, ki zmanjšuje pojav oksidacije.

6.5.1. Priprava šipe 500 mm x 500 mm

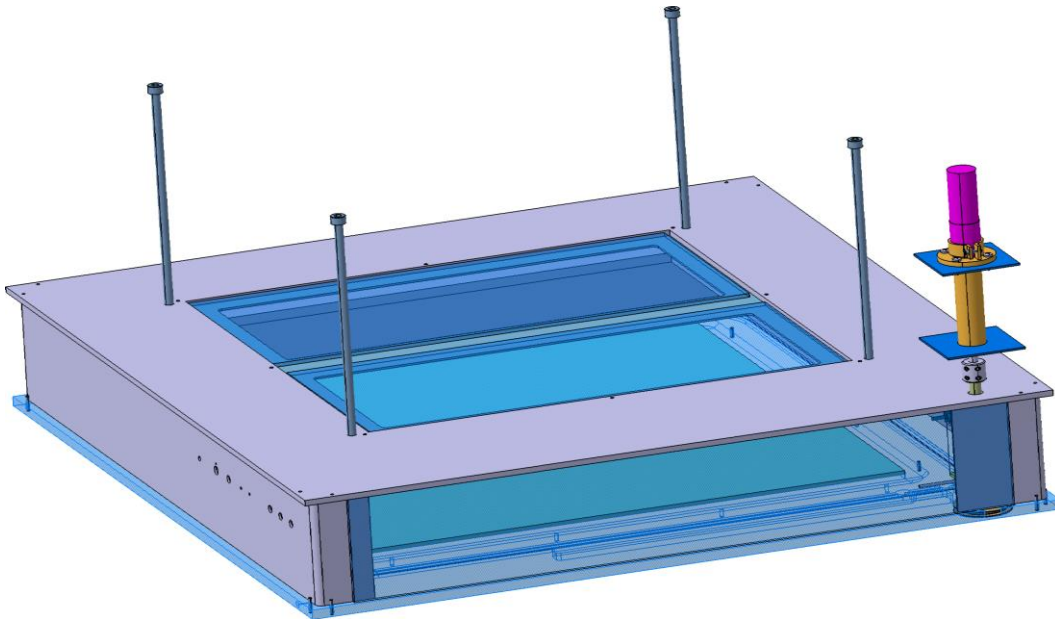
Steklena površina, ki predstavlja eno izmed obeh šip Winsmart okna, zahteva pripravo pred postopkom ogrevanja in injektiranja. Sprva je šipo potrebno očistiti vse nečistoče na njeni površini, kjer se opravlja postopek varjenja. Delci zaradi povišane temperature znotraj peči povzročajo evaporacijo. Opazimo jo kot majhni zračni mehurčki oziroma napake v končnem zvaru. Na robu se prilepi lepilni trak iz teflona, ki je odporen na visoke temperature. Oblikuje se dva tanka trakova, ki sta na razdalji 20 mm po celotnem robu šipe. S tem oblikujemo kanal za zadrževanje injektirane zlitine. Vsak izmed trakov je širine 1,5 mm ter se ga uporabi v šestih plasteh, tako da dobimo skupno debelino 0,342 mm, kar določa kasnejšo višino zvara.

S kovinske folije Dilaton ($\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{48}$) je potrebno pred pritrditvijo na stekleno površino odstraniti oksidno plast. To se stori po že opisanem postopku z brusnim papirjem za kovino P800. Pri brušenju je potrebno odstraniti samo notranji rob folije širine 20 mm. Zunanji rob 25 mm pa mora ostati brez poškodb. Problem se namreč lahko pojavi pri končni sestavi dveh šip s pritrjeno kovinsko folijo Dilaton, kjer se z laserskim postopkom ti dve medsebojno zvarita. Praske na površini povzročajo disperzijo laserja, kar lahko privede do poškodb folije Dilaton.

Tako očiščeno in pripravljeno folijo Dilaton se nato vstavi na šipo velikosti 500 mm x 500 mm, na kateri se sedaj nahaja izdelani kanal iz lepilnega traku. Kovinsko folijo se na šipo pritrdi z lepilnim trakom. Pri Winsmart oknih večjih dimenzij, na katerih se bo izvajala meritev koeficientov U_g in U_w , se lepilnega traku iz teflona na notranji strani, kjer se nahaja vakuum, ne bo moglo uporabljati. Lepilo v vakuumu evaporira ter na ta način zmanjša podtlak v oknu.

6.5.2. Komora za vzdrževanje atmosfere zaščitnega plina

Po naročilu narejena komora (Slika 35) je izdelana tako, da se jo lahko vstavi v peč Raffaello RF435/1D, ki je prvotno namenjena za peko pice. Komora omogoča vzdrževanje atmosfere zaščitnega plina za preprečitev oksidacije ter omogoča postopek anodnega varjenja kovinske folije na stekleno podlago. Omogoča izdelavo gibljivega roba na šipi velikosti 500 mm x 500 mm ter je projektirana tako, da se prilega dimenzijam peči.



Slika 35: Sestavljena komora za izdelovanje vzorcev velikosti 500 mm x 500 mm

Vir: Projekt Winsmart

Sestavljena komora je prikazana na zgornji sliki 35. Sestavljena je iz spodnje plošče, na katero se vgradi pripravljena šipa. Na spodnjo ploščo se nato postavi kovinsko steno, ki s sprednje strani vsebuje steklo, skozi katero je mogoče kasnejše opazovanje celotnega procesa izdelave. Na kovinsko steno se postavi zgornjo kovinsko ploščo, ki predstavlja strop ter omogoča tesnenje celotne komore. Na stropni plošči se nahajata dve dodatni šipi, ki omogočata osvetlitev notranjosti komore s pomočjo luči, vgrajene v peči. Vse sestavljene komponente komore se pred vstavitvijo v peč dodatno zatesni z lepilnim teflonskim trakom. Na ta način se prepreči dotok svežega zraka skozi luknje, ki se pojavijo pri sestavljeni komori. Ko je komora s steklenim vzorcem 500 mm x 500 mm sestavljena, se jo vstavi v peč.

6.5.3. Kontrola debeline zvara

Injektirana zlitina se zaradi površinske napetosti ter kasnejšega tvorjenja oksidne plasti ni želela razporediti po celotni površini izdelanega kanala iz lepilnega traku. Višina zvara pri Winsmart oknu pa ne sme presegati 0,4 mm. Vzrok so 1,2 mm veliki distančniki med obema šipama. Dodatna obtežba je morala biti po teži dovolj velika, da bi stisnila zlitino na tako majhno debelino. Večja utež, postavljena

direktno na kovinsko folijo Dilaton (kot se je izvajalo pri vzorcih za preizkus strižne trdnosti in testa lupljenja), bi v tem primeru onemogočala injektiranje zlitine med steklo in kovinsko folijo.



Slika 36: Peč z vgrajeno komoro, ki omogoča injektiranje, ter napravo za spuščanje uteži

Zato sem prišel do nove zamisli, pri kateri se celotna utež dvigne na določeno višino ter pri tem omogoči nemoteno injektiranje zlitine. To se stori s pomočjo vijakov M5 velikosti 500 mm, ki segajo skozi predhodno izvrtane odprtine stropnega dela peči. Na zunanjem delu so vijaki pritrjeni na aluminijasti okvir, kar je razvidno s slike 36 prikazane zgoraj. Aluminijasti okvir je pritrjen na ročno dvigovalo, ki nam omogoča dvigovanje in spuščanje uteži v notranjosti peči. Pri tem postopku nismo omejeni z velikostjo uteži ter je le-ta lahko dovolj velika za enakomerno distribucijo zlitine.



Slika 37: Kvadratasta utež znotraj komore s privitim vijakov v vogalu

V komori so vijaki na vsakem vogalu priviti v utež, kar prikazuje zgornja slika 37. Utež je kvadrataste oblike širine 35 mm ter višine 12 mm. Ko se utež spusti s pomočjo ročne dvigovalke na folijo Dilaton, le-ta razporedi zlitino. Vijake se nato odstrani, kar nam omogoča električno izoliranost uteži od ostalih delov za izvedbo postopka anodnega varjenja.

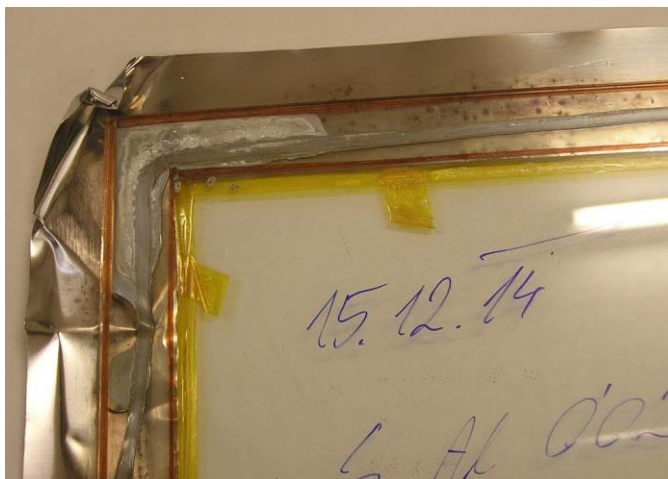
6.6. Vgradnja zlitine za postopek anodnega varjenja

Pri anodnem varjenju se na predizdelani zlitini zaradi izpostavljenosti zraku začne na površini tvoriti oksidna plast. Ta problem se pojavlja na zlitini tudi pri sobni temperaturi. Dlje časa je predizdelana zlitina izpostavljena zraku, večja je plast zaradi oksidacije. Oksidacija na predizdelani zlitini je tako velika, da na delu, kjer je bil predhodno položen kovanec zlitine, ne pride do spoja med kovinsko folijo in stekleno površino. Torej se za površino zvara lahko upošteva samo sveže iztisnjeno zlitino, katera zaradi zaščitnega plina omogoča dobro vez med steklom in kovinsko folijo.

6.6.1. Uporaba žice

Za test z žico se je izdelalo žico debeline 6,0 mm, ki je vsebovala zlitino SnAl 0,6 %. To žico naj bi se uporabilo na podoben način kot kovance, izrezane iz zlitine, pri vzorcih za preizkuse strižne trdnosti ter test lupljenja. S tem postopkom bi izgubili del zvara, kjer je bila predhodno položena žica zaradi oksidacije, vendar bi na enostaven način vgradili zlitino za zvar.

Žico se je položilo po 20 mm širokem robu šipe, kjer je potrebno ustvariti zvar. Na žico se je pred gretjem položila kovinska folija Dilaton, ki je imela predhodno odstranjeno oksidno plast. Poiskus se je izvajal znotraj komore, kjer se je pod stalnim dotokom vbrizgaval zaščitni plin za preprečitev oksidacije. Na celotno dolžino folije se je po dosegu visoke temperature spustila kvadratasta utež, ki je služila za iztisk sveže zlitine iz okrogle žice. Sveža zlitina, iztisnjena iz oksidirane žice, je brez oksidacije ter se zato zelo dobro vari s steklom kot tudi kovinsko folijo Dilaton. Širino in višino zvara se kontrolira s sloji lepilnega traku, s katerim se je izdelal kanal skupne širine 20 mm na robu šipe.



Slika 38: Razlitje zlitine v vogalu iz oksidirane plašča žice

Taka žica je vsebovala oksidacijsko plast, ki je kot ovoj znotraj vseboval svežo zlitino, zato notranji del žice doseže temperaturo tališča mnogo hitreje v primerjavi z zunanjo plastjo. Pri obtežbi najtanjši del oziroma predhodno poškodovani del oksidnega plašča počne. To dejanje povzroči razlitje zlitine na enem mestu, kot prikazuje slika 38. Žica dolžine 200 cm na šipi 500 mm x 500 mm se zato razlije na samo nekaj mestih zvara.

6.6.2. Injektiranje s pomočjo hidrostatičnega tlaka

Prvotna zamisel injektiranja je bila s pomočjo hidrostatičnega tlaka, ki omogoča iztekanja tekočine skozi vgrajeno cev v vozičku. Voziček je bil zgrajen tako, da se je v njegovo notranjost lahko naložilo predizdelano zlitino teže okoli 300 g. Na sprednji konec vozička se je pritrnila jeklena žica, nato se ga je vstavilo na spodnjo ploščo komore. Pri povišani temperaturi se je zlitina začela izcejati skozi posebno cev, pritrjeno na spodnji del vozička. S pomočjo ročnega navijanja jeklene žice na kolo se je voziček premikal v notranjosti komore. Cev je bila dovolj dolga, da je omogočala injektiranje zlitine na površino stekla, kjer poteka zvar. S predhodnim ožanjem cevi na koncu se je kontrolirala hitrost iztekanja.

Na prvih poizkusih se je injektiralo zlitino na stekleno površino pri normalnem zračnem okolju. To je omogočalo razporeditev zlitine po celotni dolžini gibljivega spoja okna. Zlitina je bila injektirana v enaki količini, brez prekinitve. Oksidna plast, ki se je formirala takoj pri izstopu zlitine iz cevi, je bila namreč višja v primerjavi s površinsko napetostjo. Ta način je preprečil pojavljanje mehurčkov oziroma grupiranje zlitine, kot sem ugotovil kasneje pri injektiranju v atmosferi z zaščitnim plinom.

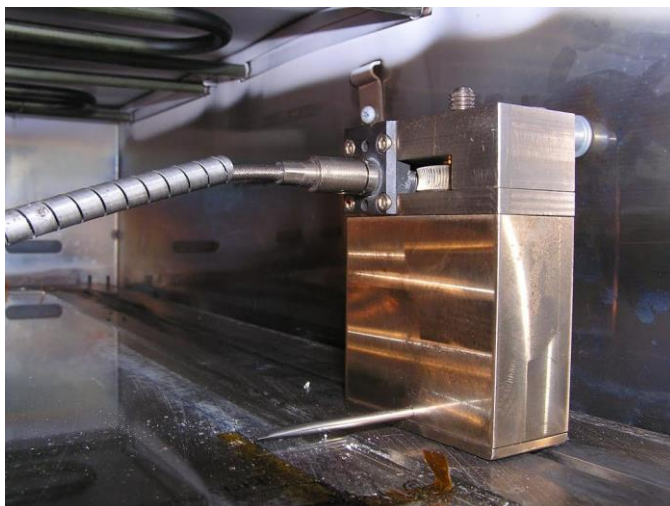
Pri enakem poizkusu, v atmosferi zaščitnega plina, ki je ključen za kakovostni zvar, so se pričeli med procesom injektiranja na površini šipe formirati mehurčki zlitine. Vzrok je bila prevelika površinska napetost v sami zlitini, zaradi katere so se posledično tvorile večje praznine med injektiranjem zlitine. Zaradi tega vzroka se je postopek opustil.

6.6.3. Mehansko injektiranje

Prišel sem do nove zamisli načina mehanskega injektiranja, kjer se zlitina iztiska iz komore s pomočjo bata. S tem postopkom natančno nadzorujemo iztekanje zlitine. Največji problem mehanskega injektiranja znotraj peči je povzročala visoka temperatura okoli 320 °C. Le-ta je previsoka tudi za elektromotorje, ki so odporni na visoke temperature. Na podlagi tega problema je bilo potrebno s pomočjo prenosnih sistemov namestiti elektromotorje na zunanji strani peči. Pri tem motorji niso izpostavljeni visokim temperaturam ter jih je mogoče dodatno hladiti z različnimi hladilnimi sistemi.

6.6.3.1. Voziček za mehansko injektiranje

Potrebno je bilo izdelati voziček, ki omogoča injektiranje med premikanjem. Rešitev sem našel v fleksibilni jeklenici, ki omogoča prenos sile pri različnih položajih vozička. Jeklenica povezuje elektromotor z vozičkom v notranjosti peči, obenem pa omogoča dovolj fleksibilnosti za njegovo nemoteno gibanje.



Slika 39: Voziček znotraj peči za mehansko injektiranje

Voziček za mehansko injektiranje je prikazan na sliki 39. Prenos sil ter povečanje navora nam omogoča polž nameščen na vozičku, na katerega se pritrdi jeklenica. Polž poganja zobato kolo, ki je opazno na zgornji strani vozička. S tem sistemom reduciramo vrtljaje ter posledično povečamo navor. Polž in zobato kolo sta izdelana iz medenine in pritrjena med zgornjo in spodnjo ploščo iz plemenitega jekla. Razmerje trdote kovin nam omogoča drsenje kovine oziroma vrtenje koles. Pri rotaciji zobatega kolesa se vijak s šestkotnim batom v notranjosti vozička premika v željeno smer ter omogoča injektiranje zlitine.

6.6.3.2. Elektromotorja za mehansko injektiranje

Za postopek injektiranja sem uporabil dva elektromotorja proizvajalca Maxonmotor 379184 in 403421. Motorja imata na spodnjem delu vgrajen mehanizem, ki zmanjša število vrtljajev v razmirju glede na željo uporabnika. Najvišji nominalni konstantni navor motorja omogočata pri 4980 rpm, kjer dosejata 11,4 mNm pri električni napetosti 4,5 V. Oba motorja pa lahko dosejata maksimalno priporočeno število vrtljajev 5360 rpm.

Premikanje vozička

Pri prvem elektromotorju (Maxonmotor 379184), ki se uporablja za premikanje vozička znotraj peči, potrebujemo velik navor zaradi velike teže vozička. Zaradi počasnega premikanja okoli 1 cm/s pa potrebujemo veliko redukcijo števila vrtljajev. Mehanizem nam omogoča zmanjšanje števila vrtljajev v razmerju 198:1. Na mehanizem motorja sem namestil dva zobata kolesa iz medenine, katera prikazuje slika 40. Večje kolo je pritrjeno na bat, ki sega v notranjost peči. Razlika v velikosti obeh koles nam omogoča dodatno 3-kratno redukcijo števila vrtljajev ter posledično poveča zmogljivost navora. Na spodnjem delu mehanizma se nahaja bakrena cev, ki omogoča vodno hlajenje motorja zaradi visoke temperature peči.

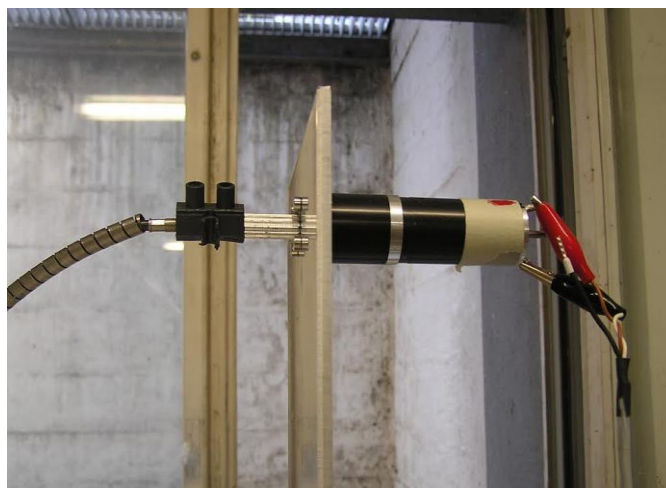


Slika 40: Elektromotor z mehanizmom za premikanje vozička

V notranjosti peči se nahaja tretje kolo, ki omogoča s pomočjo bata navijanje žice. Kolo v peči je izdelano tako, da ima na sredini vrezan utor, na katerega se navija žica debeline 0,62 mm. Z navijanjem žice, ki je na drugem koncu pritrjena na voziček, le-tega premikamo po progi spodnje plošče komore.

Injektiranje zlitine

Injektiranje omogoča jeklenica, ki povezuje motor (Maxonmotor 403421) na zunanji strani peči z mehanizmom pritrjenim na voziček. Z mehanizmom, vgrajenim na motorju, dosežemo redukcijo 14:1, kar nam omogoča moč navora 0,6 Nm pri 4,5 V. Motor in mehanizem s pritrjeno jeklenico je prikazan na spodnji sliki 41.



Slika 41: Elektromotor za injektiranje zlitine

S pomočjo vijaka se jeklenica pritrdi na poseben nastavek, ki se nahaja na zgornjem delu vozička. Nastavek je podaljšek polzastega kolesa, katerega vrtenje omogoča pogon zobatega kolesa. Prenos

polžastega kolesa na zobato kolo omogoča razmerje vrtljajev 80:1 ter posledično mnogo večji navor, ki je nujen za enakomerno in neprekinjeno injektiranje.

6.6.3.3. Uporaba programa za mehansko injektiranje

Za injektiranje se je izdelal program, ki omogoča kontrolo nad hitrostjo injektiranja ter primikanje vozička znotraj peči. Pri tako avtomatiziranem postopku pride do višje kontrole in boljšega izpopolnjevanja v primerjavi z ročno nastavitvijo hitrosti elektromotorjev. Program omogoča nadzor električne napetosti, kot tudi višino električnega toka skozi celotni postopek injektiranja. Število obratov nadziramo z velikostjo električne napetosti, višino navora motorja pa z električnim tokom. Električni tok ne omejujemo, saj potrebujemo za konstantno premikanje obeh motorjev čim višji navor. Za lažjo izpopolnitev programa injektiranja sem se odločil za konstantno hitrost vozička po celotnem delu vzorca.

Premikanje vozička

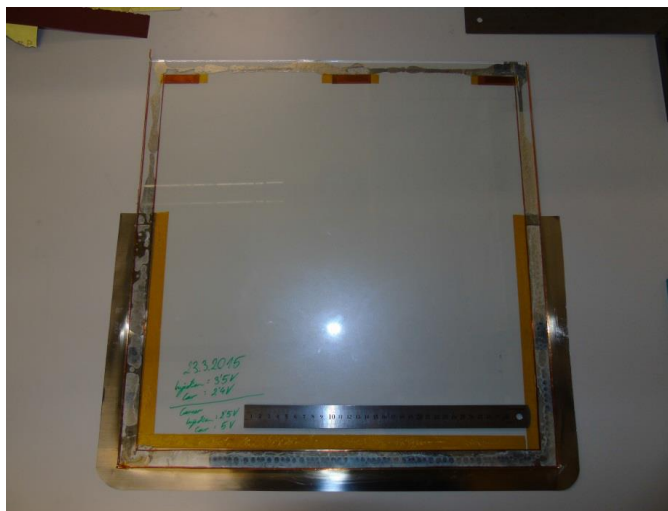
Problem se pojavi pri navijanju žice na kolo, ki je debeline 0,62 mm ter omogoča premikanje vozička. Pri navijanju se večja njegov obseg zaradi dolžine žice 230 cm. Pri tem je potrebno upoštevati konstantno višanje hitrosti vozička. S programom se tako premo sorazmirno nižja električno napetost za pridobitev enakomerne hitrosti vozička na celotni poti okoli vzorca.

Injektiranje zlitine

Program omogoča sedem stopenj spreminjanja hitrosti injektiranja. Štiri stopnje so namenjene ravnim delom steklene površine, tri stopnje pa so namenjene vogalom, kjer se injektiranje popolnoma prekine. Količina injektirane zlitine mora biti čim bolj približana dejanski potrebni injektirani količini, ki znaša $2,907 \text{ cm}^3$ za dolžino 500 mm gibljivega roba okna. Torej lahko zaradi redukcije vrtljajev s 1120 obrati elektromotorja injektiramo dolžino 135 mm oziroma $0,787 \text{ cm}^3$.

6.6.3.4. Problemi pri mehanskem injektiranju

Če je injektirane zlitine premalo, ta ne zavzame celotne širine zvara na robu šipe, kar privede do slabše kakovosti na tem delu oziroma v slabšem primeru do netesnjenja gibljivega spoja. Temu problemu se lahko izognemo s počasnejšim premikanjem vozička. Hitrejše injektiranje privede do tako močnega pritiska, da se zlitina, ki je pri visoki temperaturi v zelo nizkem duktilnem stanju, odbije z območja zvara. To se pojavi zaradi majhne odprtine na koncu cevi za injektiranje, ki mora biti dovolj majhna, da ne privede do predhodnega oziroma nekontroliranega iztekanja.



Slika 42: Izpopolnjevanje mehanskega injektiranja na vzorcu 500 mm x 500 mm

V primeru, da se zlitino injektira v preveliki količini, se ta pri spustu uteži prične izcejati z območja zvara. Pri tem se ustvari povezava iz oksidov med spodnjo ploščo komore ter zlitino na območju zvara. Oksidna povezava, nato omogoči srk zlitine z območja zvara tudi v bližnji okolici. Tako za zvar širine 20 mm ne ostane dovolj zlitine, kar je razvidno z zgornje leve strani slike 42. Dodatno oksidna povezava tvori kratek stik, zaradi katerega ni mogoče ustvariti postopka anodnega varjenja na šipo vzorca.

Injektiranje je na vsakem izmed vogalov šipe potrebno tudi popolnoma prekiniti, kajti na tem delu voziček zaradi oddaljenosti proge od površine stekla opravi daljšo pot. To se zgodi pri premiku iz enega roba šipe na drug rob, kjer ima proga za premik vozička zaokrožitev z radijem 50 mm. Na tem delu se pojavi problem zaradi površinske napetosti zlitine. Če se cev za injektiranje nahaja znotraj injektirane zlitine, privede do tako imenovanega srka. Zaradi srka zlitina kljub majhni odprtini na cevi prične iztekati sama, kar je posledica toka znotraj mehurčka injektirane zlitine. V mehurčku je zlitina namreč brez oksidne plasti, ki preprečuje oziroma zmanjšuje hitrost iztekanja. Posledično lahko v nekaj sekundah izteče tudi do 100 g zlitine iz vozička. Dodatno zaradi predhodnega nekontroliranega srka pride do zakasnitve pri ponovnem injektiranju, kar privede do velike neinjektirane površine.

6.7. Izdelava gibljivega roba

Izdelava gibljivega roba na šipi velikosti 500 mm x 500 mm poteka znotraj komore, ki se nahaja v peči. Predhodno je na postopek mehanskega injektiranja potrebno vgraditi zlitino v voziček. Po dosegu željene temperature voziček omogoča injektiranje na površino stekla. Po spustu uteži je potrebno izvesti anodno varjenje ter vzorec kasneje pustiti, da le-ta doseže sobno temperaturo.

6.7.1. Predpriprava vozička na postopek injektiranja

V voziček za mehansko injektiranje se naloži predizdelana zlitina teže 200 g. Ker je bila zlitina pripravljena v grafitni posodi valjaste oblike, komora za zlitino znotraj vozička pa je šestkotne oblike, ta pri ponovnem topljenju zniža svojo začetno višino. Na ta način se nam površina zlitine oddalji od prednastavljenega šestkotnega bata za injektiranje. Posledično bi na vzorcu prišlo do zamude pri iztekanja zlitine. Zaradi tega problema se voziček pred izvedbo injektiranja na steklu vzorca segreje na temperaturo 320 °C. Po dosegu temperature je zlitina znotraj vozička v tekočem stanju ter se lahko prične predhodno injektiranje. Prikluči se elektromotor, ki omogoča pomikanje šestkotnega bata v vozičku s pomočjo jeklenice. Po določenem času se bat spusti na površino zlitine, kar povzroči iztekanje zlitine skozi vgrajeno cev vozička. Ko opazimo iztekanje zlitine, injektiranje zaključimo. Bat nam zato nalega na površino zlitine, pri dosegu sobne temperature vozička pa je le-ta pripravljen na postopek injektiranja za izdelavo vzorca.

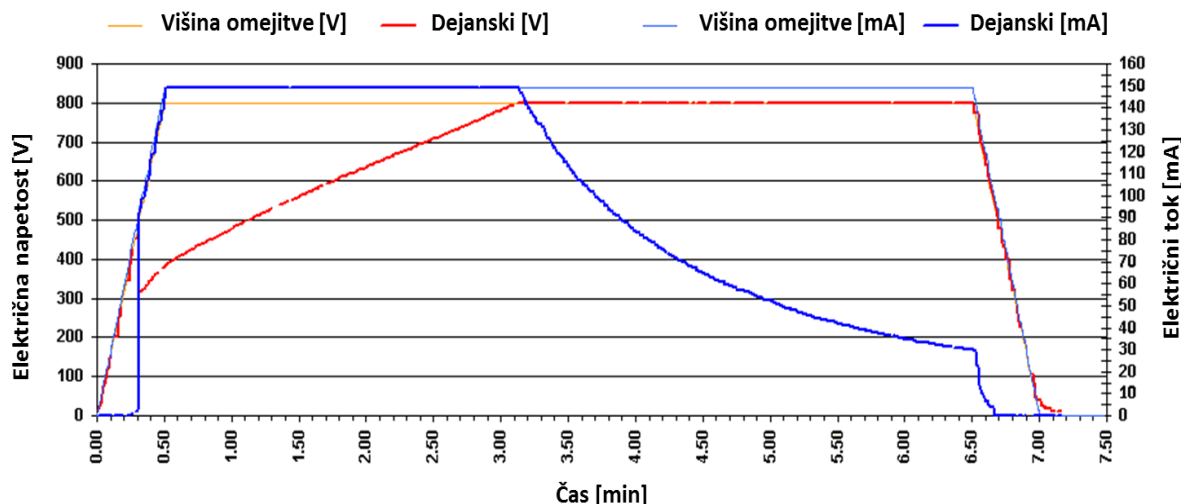
6.7.2. Postopek gretja in mehanskega injektiranja

Pripravljen voziček z zlitino v njegovi notranjosti se vstavi v komoro, ki se sedaj z vzorcem nahaja v peči. Pritrdi se šipa komore z lepilnim trakom iz teflona ter zaprejo se vrata peči. Peč se nastavi na temperaturo 320 °C in vzpostavi dotok zaščitnega plina, katerega sestava je vodik v dušiku 5 %. Gretje peči zaradi slabe izolativnosti ter velike kovinske komore traja 100 minut. Po tem času se doseže temperatura 320 °C, katero se vzdržuje nadaljnih 20 minut. Po preteku tega časa je zlitina znotraj vozička ponovno v tekočem stanju ter se lahko prične postopek injektiranja.

Po končanem injektiranju med stekleno površino in kovinsko folijo Dilaton nam dolžina proge omogoča odmik vozička. Voziček se odmakne iz predela vzorca tako, da cev, ki je omogočala injektiranje, ne nalega na vzorec. Po odmiku vozička ter odstranitvi jeklenice se spusti kvadratno utež z mehanizmom, nameščenim na vrhu peči. Ko utež počasi nalega na kovinsko folijo Dilaton, omogoča distribucijo injektirane zlitine po celotni širini zvara.

6.7.3. Anodno varjenje in hlajenje vzorca

Ko se kvadratna utež nalega na površino kovinske folije, se iz nje odstranijo vijaki. Z visokonapetostno napravo se preko predhodno nameščene žice, ki je odporna na visoke temperature, dovede 800 V. Pri tem zaradi velike površine zvara dobimo veliko višji električni tok v primerjavi z grafom anodnega varjenja za vzorce strižne trdnosti in testa z lupljenjem. Zaradi električne naprave, ki je omejena na dobavo električnega toka v višini 150 mA, na začetku ne dosežemo končne višine pretoka električnega toka. To je razvidno iz grafikona 27 kot modra črta, ki je konstantna na višini 150 mA. Rdeča črta, ki prikazuje višino električne napetosti, naprava zadržuje dovolj nizko, da ne preseže omejene velikosti električnega toka. S časom pretok električnega toka pada. Po določenem času je le-ta dovolj nizek, da se doseže 800 V.



Grafikon 27: Anodno varjenje vzorca velikosti 500 mm x 500 mm (0,0075 % aluminija)

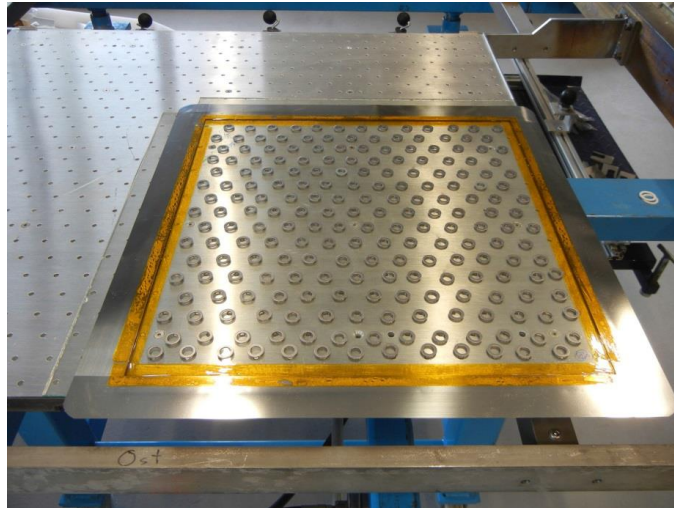
Po končanem 7-minutnem ciklu visoke napetosti se prične hlajenje vzorca. Hlajenje poteka v peči v nespremenjeni atmosferi z zaščitnim plinom, ki preprečuje oksidacijo kovinske folije. Premik komore z vzorcem izven peči zaradi zvara, ki je v tekočem stanju, ni mogoč. Zaradi velikosti peči hlajenje poteka 12 h.

6.8. Izdelava zasteklitve VIG z gibljivim robom

Po končani izdelavi vzorcev 500 mm x 500 mm s celotnim privarjenim robom kovinske folje Dilaton je potrebno dve šipi z laserskim varjenjem zavariti. To se opravi v vakuumski komori na FhG-ISE v Friburgu. Pri tem je potrebno poudariti problem vzorcev dolžine 500 mm za postopek laserskega varjenja. Lasersko varjenje je izdelano za varjenje vzorcev velikosti 901 mm x 814 mm. Ker se laser za varjenje nahaja izven vakuumske komore, je potrebno za vsako varjenje strani 500 mm vzorca izpustiti vakuum ter vzorec dveh šip zamakniti za 180°. Vakuumsko komoro se zaradi tega problema prezračuje, kar privede do nanosa prašnih delcev v medstekelni prostor VIG okna.

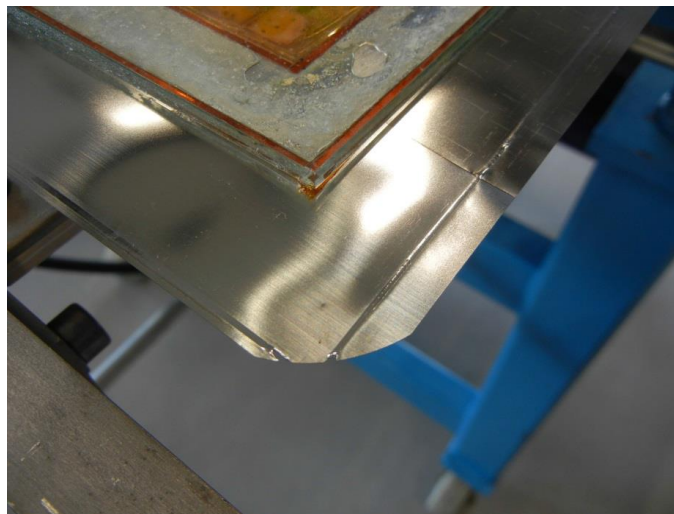
6.8.1. Lasersko varjenje dveh kovinskih folij

Postavitev distančnikov na površino za ločevanje dveh steklenih površin se izvede s pomočjo kovinske plošče, na katero so pritrjeni magneti. Pri rotaciji vzorca za 180° pride do premika distančnikov. Zaradi tega se za takšne vzorce uporabi distančnike cilindrične oblike velikosti 16 mm x 1 mm, kar je prikazano na sliki 43. Zaradi velikih distančnikov in prašnih delcev v medstekelnem prostoru se merjenje koeficienta U_g na takih oknih ne bo izvajalo. Okna so namenjena testiranju čim daljše prisotnosti vakuuma v medstekelnem prostoru.



Slika 43: Postavitev distančnikov na spodnjo šipo Winsmart okna velikosti 500 mm x 500 mm

Izdelal sem 6 vzorcev velikosti 500 mm x 500 mm, ki imajo privarjeno kovinsko folijo Dilaton po celotnem robu. Vzorce sem dostavil na FhG-ISE za postopek laserskega varjenja. Prva dva vzorca za sestavo okna sta se uporabila za kalibracijo laserskega varjenja ter določitev oddaljenosti varjenja na kovinski foliji. Oddaljenost laserja je namreč zelo pomembna zaradi okroglega roba kovinske folije, ki je nujen za postopek anodnega varjenja.

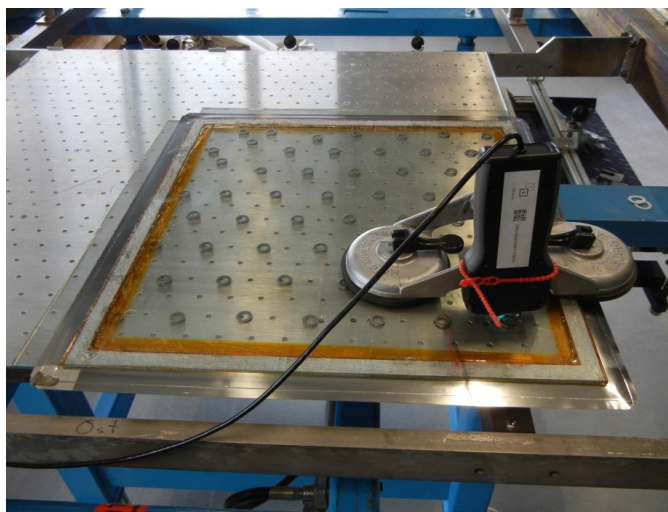


Slika 44: Prevelika oddaljenost laserskega varjenja od roba steklene površine

Pri preveliki oddaljenosti laserja ne pride do prekrivanja v vogalu (Slika 44) ter se posledično ne more ustvariti vakuumu. Premajhna oddaljenost laserskega varjenja pa privede do večjih napetosti na zvaru anodnega varjenja kovinske folije in stekla. Ostali štiri vzorci so se zavarili s prekrivanjem laserskega varjenja v vogalu. Torej je prišlo do izdelave dveh vakuumskih zasteklitev z gibljivim robom.

Velikost podtlaka v medsteklenem prostoru

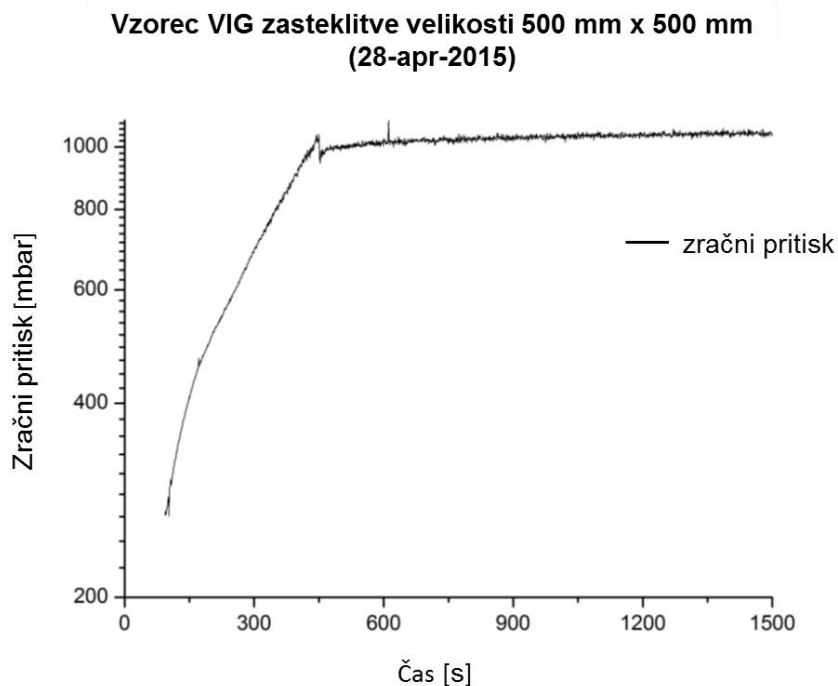
Za izmero dotoka zunanjega zraka v VIG zasteklitev se oceni na podlagi fluorescentne sonde. Sonda je nameščena v medstekelni del VIG okna pred pričetkom postopka laserskega varjenja. Sonda, ki je občutljiva na parcialni tlak, z osvetljevanjem monokromatske svetlobe sproži fluorescentni odziv. Odziv sonde je odvisen od velikost zračnega tlaka. Z izmero signala, katerega prikazuje spodnja slika 45, lahko ocenimo tlak v medstekelnem prostoru VIG okna.



Slika 45: Zasteklitev okna Winsmart (500 mm x 500 mm) ter izmera tlaka v medstekelnem prostoru

Pri prvem vzorcu vakuumske zasteklitve je prišlo do puščanja roba takoj po vzpostavitvi normalnega zračnega pritiska v notranjost vakuumske komore. Posledično na takem vzorcu ni bilo mogoče opraviti testiranja kakovosti vakuuma.

Na drugem vzorcu vakuumske zasteklitve se je opravila izmera velikosti podtlaka v medsteklenem prostoru. Izkazalo se je, da velikost podtlaka s časom hitro pada. Torej je vzorec na robu gibljivega spoja vseboval majhno odprtino. Odprtina je povzročila, da je po odvzemu iz vakuumske komore znotraj medstekelnega prostora okna po 8 minutah prišlo do vzpostavitve normalnega zračnega pritiska. To znaša približno $0,6 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$, na podlagi česar lahko izračunamo, da je tretja VIG zasteklitev vsebovala odprtino s premerom $80 \mu\text{m}$.



Grafikon 28: Izguba podtlaka v VIG zasteklitvi z giblivim robom

Vir: Projekt Winsmart

Iz izgube vakuumu oziroma dotoka zraka v VIG zasteklitve, ki jo prikazuje zgornji grafikon 28, lahko sklepamo, da je do napake najverjetneje prišlo na zvaru dveh kovinskih folij. Pri napakah na zvaru anodnega varjenega roba stekla in kovinske folije bi namreč privedlo do takojšnjega vdora zraka v VIG okno, kot se je to izkazalo pri prvih dveh oknih. Na območju anodnega varjenja stekla in kovine nepopolnost zvara privede do večjih netesnenih odprtih.

7. ZAKLJUČEK

Vakuumska izolativna zasteklitve lahko dosega U_g vrednosti nižje od $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Trenutni izdelki na trgu se ne približajo tej vrednosti zaradi uporabe togega roba okna. Zaradi izdelave togega roba pri večji temperaturni razliki na notranji in zunanji strani okna privede do upogibanja oziroma do porušitve zasteklitve. Vzrok tega pojava je toplotni raztezek stekla. Dodatni problem trenutnih izdelkov je izsesavanje zraka po izdelavi roba. S takim postopkom na enem izmed vogalov vakuumske zasteklitve ostane šoba, ki je služila za izsesavanje zraka. Zaradi odličnih lastnoti vakuuma je pri projektu Winsmart, ki je bil sprejet na podlagi razpisa Sedmega okvirnega programa (FP7, 2006–2013) prišlo do zamisli izdelave gibljivega roba. Z izdelavo gibljivega roba bi eliminirali problem toplotnega razteza stekla, s končnim postopkom varjenja v vakuumski komori pa bi se izognili izdelovanju šobe za izsesavanje.

V okviru študije izdelave gibljivega roba vakuumske zasteklitve so bila izvedena različna testiranja. Raziskovalo se je na področju novega postopka anodnega varjenja (Kobel M. 2011), ki sestavlja gibljivi rob. Z anodnim varjenjem naj bi se po celotnem robu šipe privarilo kovinsko folijo debeline $0,1 \text{ mm}$. Z različnimi testiranjmi se je poizkušalo izdelati čim bolj kakovostni zvar. Zvar mora biti sposoben prenašati ogromne pritiske, ki jih povzročata uporaba vakuuma. Zaradi gibljivega roba pa mora biti dovolj trden, da vzdrži vsakodnevne premike šip zasteklitve, ki jih povzročata toplotni raztezek. Izdelati je bilo potrebno napravo, ki omogoča vgradnjo zlitine za spoj steklene podlage in kovinske folije. Zaradi zlitine, ki je sestava aluminija v kositru, je potrebno celotni postopek vgradnje izdelati pri povišani temperaturi. Dodatne probleme povzročata oksidacija na površini zlitine. Za preprečitev oksidacije se postopek vgradnje zlitine opravi v atmosferi z zaščitnim plinom. Za sestavo vakuumske zasteklitve je potrebno izdelati dve šipi s privarjeno kovinsko folijo na robu. Šipi se nato vstavita v vakuumsko komoro, kjer se kovinski foliji medsebojno zvari. Pri tem nam fleksibilnost kovinske folije omogoča neodvisne premike šip zasteklitve ter eliminira vpliv toplotnega razteza.

S testiranjem postopka lupljenja se je selektivno izločilo slabše kakovosti zvara med kovinsko folijo in stekleno podlago, katere povzročajo različne vsebnosti aluminija v zlitini. Pri tem smo z rezultati testiranja ugotovili, da dosežemo najbolj kakovostni zvar z uporabo $0,0075 \%$ aluminija v kositru. Vzorci, na katerih se je testirala strižna trdnost spoja stekla in kovinske folije z različnimi prevlekami, so podali preslabe rezultate za nadaljnje delo na tem področju. Tako smo prišli do ugotovitve, da je najbolj optimalna uporaba kovinske folije brez dodatne prevleke. Na steklu se je s pomočjo interferometrije v računalniškem programu μShape (TM) Professional v6.17 (TRIOPTICS Berlin GmbH, 2011) izmerilo napetosti na stekleni površini. Napetosti naj bi povzročal postopek anodnega varjenja, pri čemer se ustvari močna adhezija med zlitino, ki je sestava aluminija v kositru in stekleno podlago. S primerjavo rezultatov smo prišli do spoznanja, da anodno varjenje ne povzroča napetosti na stekleni površini. Za izdelavo gibljivega roba VIG zasteklitve se je izdelalo novi postopek avtomatiziranega injektiranja zlitine. Izdelalo se je napravo, ki omogoča injektiranje pri visoki temperaturi. S pomočjo programa se je postopek avtomatiziral ter izpopolnil. Na ta način se je izdelalo šipe $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ s privarjenim robom kovinske folije Dilaton.

Dve šipi velikosti $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ se je nato na nemškem inštitutu (Fraunhofer–Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E.V.) vstavilo v vakuumsko komoro. Na spodnjo šipo se je razporedilo distančnike za vzdrževanje debeline medsteklenega prostora. Vakuumska komora nato

omogoča ustvarjanje tlaka velikosti 10^{-5} mbar. Po ustvarjenem podtalaku se s pomočjo laserskega varjenja dve kovinski foliji, ki sta privarjeni na obe šipi, medsebojno zvari. Po končanem laserskem varjenju ter prezračenju vakuumske komore zasteklitev vsebuje v medsteklenem prostoru vakuum. Kovinski foliji na robu pa omogočata dovolj fleksibilnosti za neodvisno premikanje obeh šip zasteklitve.

Postopek laserskega varjenja bi bilo potrebno dodatno izpopolniti. S testiranjem sestavljene VIG zasteklitve velikosti 500 mm x 500 mm se je namreč izkazalo, da se pri laserskem varjenju soočamo z napravnostmi na spoju dveh kovinskih folij. Posledica je bilo počasno izgubljanje vakuuma v zasteklitvi. Za rešitev problema se je izvedel postopek testiranja z iztekanjem vodika. Med dve kovinski foliji, zavarjeni s postopkom laserskega varjenja, se je dovajal vodik, na drugi strani pa se je nahajala naprava za mirjenje iztekanja. Testiranje je pokazalo več drobnih odprtih na območju zvara.

Prihodnost injektiranja zlitine na način, s katerim sem izdeloval zasteklitve, ni mogoč. Tudi velik uspeh izdelave prototipov je prenizek za doseganje prodora izdelkov na trg. Dodatni problem takega načina izdelave sta tudi dolgotrajni postopek izdelave ter zahtevnost izdelave vzorca. Namesto injektiranja predizdelane zlitine s pomočjo vozička bi se lahko uporabilo žico določene velikosti, katero sestavlja SnAl z določeno vsebnostjo aluminija. Žico bi nato avtomatizirani mehanizem vstavljala v cev enakih dimenzij. Električni grelnik na koncu cevi bi omogočal topljenje zlitine ravno pred injektiranjem na stekleno površino. Vstavljanje žice enakih dimenzij v cev bi onemogočalo iztekanje zlitine v obratni smeri, s hitrostjo vstavljanja žice pa bi se kontrolirala hitrost injektiranja. Za dodatno pospešitev izdelovanja končnih izdelkov bi se lahko izdelalo štiri take naprave za vsako ravnino šipe. S tem bi pospešili proizvodnjo ter preprečitev nastajanja oksidacije na površini injektirane zlitine.

VIRI

Deplazes A. 2008. Constructing Architecture. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH): 555 str.

Rasmussen S. C. 2012. How Glass Changed the World. Berlin, Springer-Verlag: 85 str.

Žarnić R. 2005. Lastnosti Gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Hajdinjak R. 2009. Gradimo s Steklom. Gornja Radgona, REFLEX d.o.o.: 367 str.

Žegarac Leskovar V., Premrov M. 2013. Energy-Efficient Timber-Glass Houses, Springer-Verlag London: 178 str.

Kister J. 2008. Neufert: Projektiranje v stavbarstvu. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 550 str.

Pilkington Group Limited 2015. Spacia, tehnični podatki proizvajalca
<http://www.pilkington.com/> (Pridobljeno 17. 5. 2015.)

Košir M., Krainer A., Dovjak M., Kristl Ž. 2011. Automatically controlled daylighting for visual and nonvisual effects. Lighting research & technology, ISSN 1477-1535, št. 4: str. 439-455

EN 410:2011, Steklo v gradbeništvo - Določanje svetlobnih in sončnih karakteristik stekla.

Koebel M., El Hawi N., Lu J. idr. 2011. Anodic bonding of activated tin solder alloys in the liquid state. Solar Energy Materials and Solar Cells, 11. izdaja: str. 3001–3008.

Elrefaey A., Janczak-Rusch J., Koebel M. 2014. Direct glass-to-metal joining by simultaneous anodic bonding and soldering with activated liquid tin solder. Journal of Materials Processing Technology, 11. izdaja: str. 2716–2722.

Pilkington Group Limited 2012, Global Glass Handbook, European Technical Centre, Anglija,: 223 str.

Projekt Winsmart 2015. Seventh Framework Programme.
<http://winsmart.dti.dk/> (Pridobljeno 25. 5. 2015.)

Mitchell R., Kohler C., Arasteh D. idr. 2014. Window 7.2, Windows and Daylighting Group, Lawrence Berkeley National Laboratory. California.

TRIOPTICS Berlin GmbH 2011. Program μ Shape (TM) Professional v6.17. Berlin.

Maxon motor ag 2014. Motor/gear, tehnični podatki proizvajalca

<http://www.maxonmotor.com/> (Pridobljeno 21.11.2014.)

Pajak L. 2012. Parametrična študija osvetljenosti in porabe energije za ogrevanje, Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Pajek): 30 f.