



Pregledni rad/Review paper
Primljen/Received: 23. 10. 2019.
Prihvaćen/Accepted: 03. 12. 2019.

PRIMJENA STAKLA KAO NOSIVOG ELEMENTA

Marcin Kozłowski, dr. sc.

Šlesko tehnološko sveučilište, Gliwice, Poljska, docent, marcin.kozlowski@polsl.pl

Andrzej Malewski, mr. sc.

Tehnološko sveučilište u Poznaniu, andrzej.n.malewski@doctorate.put.poznan.pl

Vlaho Akmadžić, dr. sc.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, vlaho.akmadzic@gf.sum.ba

Anton Vrdoljak, mr. sc.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, anton.vrdoljak@gf.sum.ba

Sažetak: Konstrukcije od stakla se već desetljećima sve više koriste u modernim konstrukcijama, a najčešći elementi su noseći zidovi ili fasade. Taj se trend može primijetiti i u razvoju konstruktivnih sustava, proizvodnih pogona i metoda obrade stakla. Članak je zamišljen kao uvod u temu stakla kao nosivog elementa. Navode se osnovna svojstva materijala i vrste najčešće korištenih tipova stakla. Rad također daje kratak pregled trenutno važećih standarda za staklo u Europi.

Ključne riječi: konstrukcijsko staklo, primjena, svojstva materijala, lamelirano staklo, standardizacija

GLASS IN STRUCTURAL APPLICATIONS

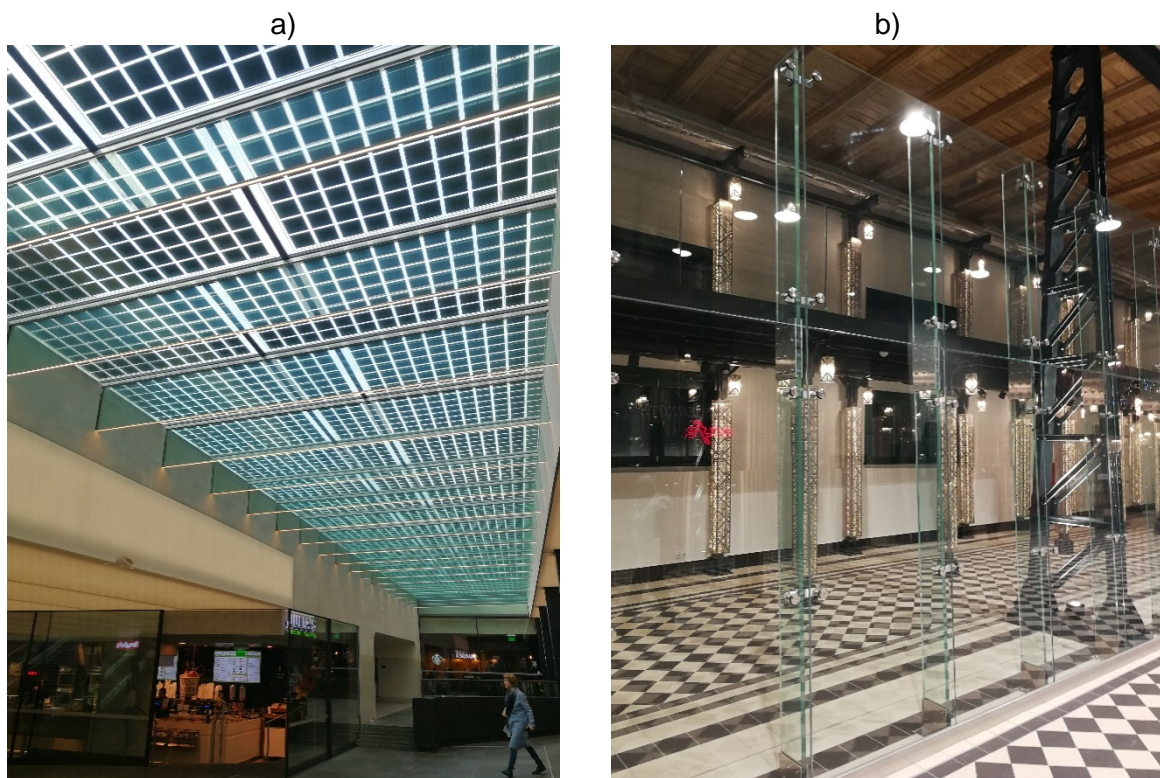
Abstract: Glass structures have been increasingly utilised in modern constructions for decades with load-bearing walls or facades as the most common elements. This trend can be also observed in the development of structural systems, production facilities and processing methods for glass. The article is an introduction to the topic of glass used structurally. It provides basic material properties and types of commonly used glasses. The work also reviews briefly the current standardization for glass in Europe.

Key words: structural glass, application, material properties, laminated glass, standardisation

1. Uvod

Staklo je materijal koji je posljednjih godina u širokoj upotrebi kod arhitekata. To je uglavnom zbog njegovih posebnih svojstava, kao što su prozirnost, visoka tlačna čvrstoća, razmjerno visoka vlačna čvrstoća, trajnost i otpornost na faktore okoliša [6]. Prozirna staklena pročelja pružaju vizualni kontakt između korisnika zgrade i vanjskog okruženja, što je vrlo važan psihološki faktor koji pozitivno utječe na zdravlje i kvalitetu života ljudi koji žive i/ili rade u zgradama. Već 1935. godine, izvanredni arhitekt razdoblja modernizma Charles-Édouard Jeanneret (Le Corbusier) u nizu svojih članaka opisuje staklo kao „temeljni materijal suvremene arhitekture“ [7]. Na sličan način, Michael Wigginton opisuje staklo kao "najfiniji materijal kojeg je izumio čovjek" [22].

U današnje vrijeme čini se da je staklo jedan od najprivlačnijih građevinskih materijala. Unatoč činjenici da je staklo poznato već nekoliko tisuća godina, tek posljednjih desetljeća je došlo do dinamičnog razvoja na području ostakljivanja konstrukcija [5]. U početku su se staklene ploče koristile samo za ispunjavanje nosivog prozorskog okvira, obično drvenog ili čeličnog. Trenutno je ovaj materijal postao potpuno pouzdan građevinski materijal za staklene fasade i nosive građevinske elemente, poput staklenih stupova, greda, međukatnih konstrukcija i rebara za ukrućivanje fasada (slika 1).



Slika 1. Primjeri primjene stakla u konstrukcijama: a) Nosive staklene grede svjetlarnika na željezničkoj stanici u Eindhovenu, Nizozemska, b) Nosiva staklena rebra pregradnog zida na željezničkoj stanici u Šleskoj, Poljska (foto M. Kozłowski)

Ova tendencija se izravno prenosi u dinamiku razvoja industrije stakla. Prema izvješću „Proizvodnja stakla i proizvoda od stakla - globalna tržišta do 2020. godine“, koje je izradila organizacija „Globe Newswire“, globalno tržište stakla i proizvoda od stakla 2017. godine je vrijedilo 199,4 milijarde dolara, a procjenjuje se da će do 2020. godine iznositi 232,4 milijarde dolara. Prema „Statističkom godišnjaku industrije - 2017.“ kojeg je objavio Središnji



statistički ured Poljske, vrijednost proizvodnje stakla i proizvoda od stakla u Poljskoj 2017. godine iznosila je 11,8 milijardi poljskih zlota. Trenutna izgradnja dvaju pogona za lijevano staklo ukupnog proizvodnog kapaciteta od preko milijun tona godišnje, zajedno s postojećim postrojenjima, dovodi Poljsku na čelo proizvođača stakla u Europi, što potvrđuje razvoj na polju proizvodnje stakla.

Prema 'Tematskom biltenu TB 05 - Industrijska proizvodnja BiH - PRODCOM rezultati - 2017.' koji je objavila Agencija za statistiku Bosne i Hercegovine [20], vrijednost proizvodnje stakla i proizvoda od stakla u BiH u 2017. godini iznosila je 40,8 milijuna KM.

Upotreba stakla u graditeljstvu uklapa se u ideju održivog razvoja [1]. To proizlazi iz mogućnosti recikliranja stakla i suvremenih tehnologija koje omogućuju uštedu energije koju zgrada troši, kao i mogućnosti njenog iskorištavanja. Suvremeni proizvodi od stakla, poput izoliranog stakla s posebnim funkcionalnim prevlakama, omogućuju značajne uštede energije smanjujući troškove grijanja zimi i hlađenja ljeti [15].

Konstruktivno staklo se koristi ne samo u građevinskoj industriji, već se sve više koristi i u drugim sektorima. Na primjer, u automobilskoj industriji prozori vozila obično su izrađeni od lameliranog stakla koje zbog svoje visoke krutosti djeluje kao dodatni element za učvršćenje, omogućujući smanjenje težine karoserije automobila [19]. Još jedan primjer je pomorska industrija u kojoj se mala ravna stakla u trupu broda zamjenjuju u korist velikih zakrivljenih lameliranih staklenih ploča [10].

2. Primjena stakla u zgradama

U građevinskoj industriji najčešće se koristi natrij-kalcij-silikatno staklo [6]. Sirovine za njegovu proizvodnju su kvarcni pijesak, otpaci stakla i dodaci, najčešće natrijev i kalcijev karbonat te topitelji u obliku oksida bora i olova. Trenutno se 90% stakla proizvodi u takozvanom plutajućem procesu koji je razvio Pilkington pedesetih godina dvadesetog stoljeća u [3]. Ovaj proces uključuje taljenje mljevenih sirovina u peći, a zatim izlivanje tekuće mase na podlogu od rastaljenog kositra, koji osigurava formiranje neprekidne ploče sa savršeno ravnim površinama [23]. U sljedećoj fazi proizvodnje stakla, ploča se prenosi na valjcima do sljedeće faze, gdje se polako hladi kako bi se smanjio toplinski stres. Time se stvara osnovni proizvod od stakla - takozvano žareno ravno staklo. Standardne dimenzije proizvedenih staklenih ploča su 6,00 × 3,21 m, ali moguće je proizvesti ploče mnogo veće duljine, do 18 m [13]. Ravno staklo se tradicionalno proizvodi s debljinom od 2 do 25 mm, dok se za građevinske primjene obično koriste debljine od 8, 10 i 12 mm.

Što se tiče konstrukcijskog ponašanja, staklo se značajno razlikuje od ostalih materijala koji su u širokoj upotrebi u gradnji, poput čelika, armiranog betona ili drveta. Ono je savršeno elastično, izotropno i krhki materijal [6]. Nema plastičnosti pa se stoga lokalne koncentracije naprezanja ne mogu smanjiti preraspodjelom unutarnjih sila, kao što se događa npr. sa željezom. Najveći nedostatak stakla je njegova krhkost. Staklo se prilikom preopterećenja razbije naglo i bez upozorenja. Drugi nedostatak je veliko rasipanje vlačne čvrstoće stakla i činjenica da ta vrijednost nije stalna tijekom vremena i ovisi o mnogim faktorima, kao što su trajanje opterećenja, veličina uzorka, mjesto maksimalnog naprezanja itd. Nadalje, konstruktivno ponašanje elementa od lameliranog stakla je u velikoj mjeri ovisno o temperaturi i vremenu zbog reološke prirode među sloja koji se koristi za spajanje staklenih ploča. Time se projektiranje staklenih elemenata usložnjava i zahtijeva specijalizirano znanje i iskustvo.

Dodatnu poteškoću predstavlja činjenica da savijanje staklenih ploča pod opterećenjem može nekoliko puta premašivati njegovu debljinu, što prisiljava projektante da uzmu u obzir membransko naprezanje i na taj način pri projektiranju koriste geometrijsku nelinearnost [6].

Ključni element u procesu projektiranja konstrukcija od stakla je ograničiti koncentraciju naprezanja u staklu razradom detalja konstrukcije i uporabom elastičnih materijala niske



krutosti između stakla i učvršćivača koji je obično od čelika. Još jedan aspekt je osigurati sigurnu uporabu elemenata u stanju bez pukotina, kao i u izvanrednim situacijama kada se elementi lome. Staklene ploče se mogu razbiti iz raznih razloga, najčešće se to događa zbog njihovog preopterećenja koje uzrokuje koncentraciju naprezanja što dovodi do razvoja pukotina, kao i zbog udaranja tvrdim predmetom. Čest uzrok pukotina je također i toplinski stres.

Sigurnost uporabe elemenata od stakla ugrađenih u zgrade se može osigurati na tri razine [2]. Prva je razina materijala kod koje vrsta stakla koji se koristi određuje nosivost elementa (npr. uporaba kaljenog stakla povećava nosivost elementa za 2-3 puta). Sljedeća je razina elementa, gdje uporaba lameliranog stakla poboljšava ponašanje nakon loma (nakon pucanja pojedinog stakla, element pokazuje rezidualni kapacitet i krutost). Slično je i u slučaju spregnutog stakla, u kojem kombinacija stakla s drugim materijalima osigurava njegovo duktilno popuštanje [11]. Posljednja je razina cijele konstrukcije, koja bi trebala biti projektirana na način da lom pojedine komponente ne dovodi do progresivne katastrofe.

3. Mehanička svojstva stakla

Staklo ima gustoću sličnu armiranom betonu (25 kN/m^3) i Youngov modul jednak aluminiju (70 GPa) [6]. Unatoč izuzetno visokoj tlačnoj čvrstoći (oko 1000 MPa), staklo pokazuje mnogo nižu vlačnu čvrstoću, što primarno određuje njegovu prikladnost za konstrukcijske primjene [6]. Teorijska vrijednost vlačne čvrstoće iznosi približno 6,5-8,5 GPa, međutim ispitivanja razaranjem pokazuju da je kritično vlačno naprezanje samo neznatan dio te vrijednosti (30-60 MPa). Razlog tako velikog neslaganja između teorijske i praktične vlačne čvrstoće stakla je taj što u stvari ovaj materijal pokazuje površinske nedostatke, što je karakteristično za krhke materijale. Na primjer, površina staklene ploče ima mnogo dubokih mikro-ogrebotina za razliku od površine staklenih vlakana. Što je manji poprečni presjek vlakana, to je manje oštećenja materijala, a otuda i veća vlačna čvrstoća.

Tablica 1. Osnovna svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla [6]

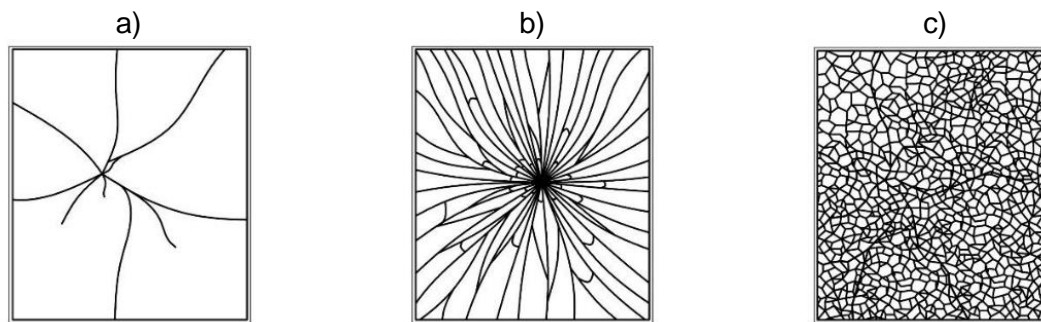
Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	2500 kg/m^3
Youngov modul	70 000 Mpa
Poissonov koeficijent	0,23
Karakteristična vlačna čvrstoća	45 Mpa
Koeficijent toplinskog širenja	$9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Toplinska vodljivost	$1 \text{ Wxm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Vlačna čvrstoća stakla nije stalna vrijednost, ona ovisi o mnogim faktorima kao što su stanje površine staklenog elementa, njegova veličina, povijest i trajanje opterećenja, zaostalo naprezanje (nastalo iz procesa očvršćavanja stakla) i radni uvjeti elemenata [6]. Staklo, kao i većina građevinskih materijala, korodira [17]. Dobro je poznata pojava zamućivanja staklenih ploča horizontalno uskladištenih u uvjetima velike vlage ili izloženih stalnom kontaktu s vodom. Također, prirodna vlaga okoliša nagrizava staklene ploče izložene stalnom naprezanju, osobito ako ono dugo traje. Svaka molekula H_2O reagira sa silikatnom strukturom stakla formirajući dvije Si-OH grupe koje se ne mogu međusobno spojiti i ostavljaju prazninu u silikatnoj strukturi stakla. Ako se ova reakcija dogodi na vrhu pukotine, praznina se postupno povećava atomskim korakom i zbog toga smanjuje čvrstoću stakla. Velike promjene temperature dodatno ubrzavaju procese nagrizanja. Postupno smanjenje čvrstoće stakla tijekom vremena naziva se statičkim zamorom [17]. Osnovna svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla su prikazana u tablici 1.

4. Vrste stakla za konstrukcijske primjene

Tri najčešće korištene vrste stakla u konstrukcijskim primjenama su žareno, termički ojačano i kaljeno staklo [6]. Na tržištu postoji i kemijski ojačano staklo (koje se koristi i za zaštitne slojeve za mobilne telefone). S obzirom da je način loma sličan žarenom staklu i čvrstoća usporediva s kaljenim staklom, tržišni udio ove vrste stakla je zanemariv, većinom zbog velikih troškova proizvodnje. Trenutno se tehnologija kemijskog ojačavanja uglavnom koristi za dvostruko zakrivljene staklene ploče, na koje se standardni postupak toplinske obrade ne može primijeniti.

Svaka vrsta stakla ima karakteristična svojstva koja su ključna za nosivost i razinu sigurnosti konstrukcijskih elemenata. Žareno staklo je osnovni proizvod plutajućeg procesa, njegova karakteristična čvrstoća na savijanje je 45 MPa. Ova vrsta stakla je jako osjetljiva na toplinski udar i neravnomjerno zagrijavanje ploče, koje mogu uzrokovati npr. djelomično zasjenjivanje staklene fasade po sunčanom danu, što može dovesti do pucanja, ili bilo koja vrsta naljepnica stvaranjem mrlja koje upijaju više energije. Glavno obilježje žarenog stakla je njegova savršeno ravna površina, tako da ova vrsta stakla ne pokazuje optička izobličenja niti anizotropiju. Još jedna karakteristika je način loma - ova vrsta stakla se razbija u velike komade s oštrim rubovima, što ih praktički isključuje iz primjene kao monolitne ploče (slika 2a).



Slika 2. Usporedba načina loma različitih vrsta stakla: a) žareno staklo, b) toplinski ojačano staklo, c) kaljeno staklo [11]

Čvrstoća žarenog stakla se može povećati podvrgavanjem staklene ploče procesu toplinske obrade koji podrazumijeva zagrijavanje ploče na temperaturu blisku temperaturi preoblikovanja stakla i brzo hlađenje strujom hladnog zraka [6]. Rezultat ovog procesa je stvaranje tlačnih površinskih napreznja (debljine od oko 20% debljine ploče) i vlačnih napreznja u sredini debljine. Uvođenje napreznja tijekom procesa očvršćivanja povećava čvrstoću žarenog stakla za dva do tri puta i povećava njegovu otpornost na toplotni udar i statički umor. Ovisno o vrijednosti napreznja koje se uvodi u procesu toplinskog očvršćivanja, mogu se razlikovati dvije vrste stakla: toplinski ojačano staklo i kaljeno staklo. Obje vrste stakla nastaju istim postupkom toplinske obrade, međutim, u slučaju toplinski ojačanog stakla, brzina hlađenja je manja, što stvara manje napreznje duž debljine ploče. Vrijednost površinskog tlačnog napreznja za toplinski ojačano staklo je 40-80 MPa, dok za kaljeno staklo ono iznosi 80-120 MPa. Kaljeno staklo se raspada na male komade (veličine kocke), što značajno smanjuje opasnost od teške ozljede i ozljeđivanja ljudi u njegovoj blizini (slika 2c). Iz tog razloga ova vrsta stakla se obično naziva sigurnosno staklo. Međutim, naziv može biti zavaravajući jer se često element od kaljenog stakla ne raspada na pojedine djeliće (kockice), i često se oni povezuju, stvarajući masu koja u slučaju pada sa značajne visine može prouzročiti teške ozljede osobama koje se nalaze ispod. Element od toplinski ojačanog



stakla, raspada se u obliku dugih odlomaka, što je ključno za osiguravanje krutosti lameliranog stakla nakon popuštanja (slika 2b).

Karakteristično svojstvo toplinski ojačanog stakla su optička izobličenja koja su posljedica procesa očvršćavanja [14]. Prva vrsta izobličenja je povezana s činjenicom da se tijekom procesa toplinske obrade zagrijano staklo prenosi na keramičkim valjcima u komoru za kaljenje i zbog vlastite težine lagano ulekne između valjaka, što dovodi do stvaranja valovite površine. Pored takozvanih pojava „valova od valjaka“, ova vrsta stakla pokazuje i druge vrste nesavršenosti, poput povijanja ruba i podizanja ruba koji potencijalno mogu prouzročiti probleme raslojavanja. Druga vrsta izobličenja odnosi se na specifično djelovanje opalescencije do kojeg može doći pod specifičnim sunčevim svjetlom, a osobito u prisutnosti polarizirane svjetlosti. Optička izobličenja su prirodno obilježje kaljenog stakla i posljedica procesa njegove proizvodnje. Te pojave ne treba smatrati oštećenjima, već prirodnim fizičkim svojstvima sigurnosnog stakla visoke čvrstoće.

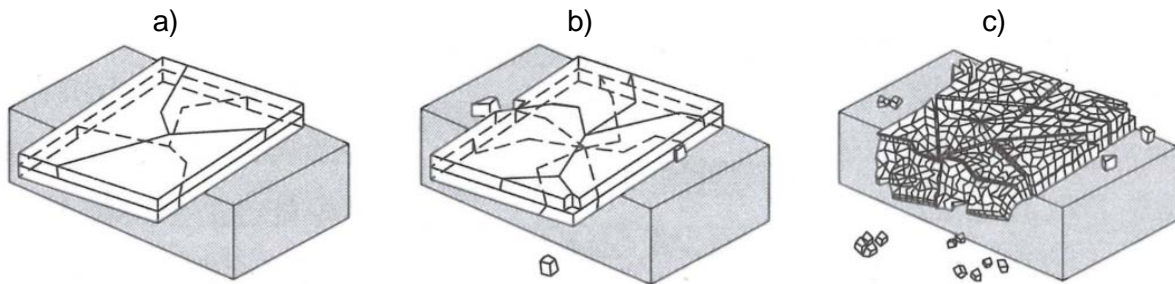
Inkluzije niki sulfida u masi stakla su jedan od glavnih nedostataka kaljenog stakla [9]. Nikl sulfidi nastaju pri proizvodnji ravnog stakla i oni su odgovorni za njegovo nepredvidivo i spontano pucanje, tj. bez uplitanja vanjskih mehaničkih faktora. Pucanje je uzrokovano povećanjem volumena inkluzija zbog povećane temperature. Često ploča puca ubrzo nakon procesa otvrdnjavanja, ali pucanje zbog inkluzija niki sulfida se također bilježi i nekoliko godina nakon što se ploča proizvede. Inkluzije nije moguće eliminirati, ali postoji način da se pronađu neispravne ploče. Postupak izlaganja toplini kaljenog stakla koji se naziva *thermal soaking* podrazumijeva stavljanje ploče od kaljenog stakla u posebnu komoru na nekoliko sati i podizanje temperature stakla na približno 290 °C kako bi se ubrzao proces fazne pretvorbe niki-sulfida. Na taj način se staklene ploče koje sadrže inkluzije raspadaju u komori za zagrijavanje, smanjujući rizik od mogućeg loma ploče nakon njenog postavljanja, npr. na pročelju zgrade.

5. Lamelirano staklo

Zbog svog krhkog ponašanja nakon loma, monolitne ploče se ne mogu koristiti za izradu konstrukcijskih elemenata. Stoga je u građevinarstvu u širokoj uporabi lamelirano staklo, koje predstavlja složeni sustav koji se sastoji od najmanje dvije ploče stakla spojene posebnom polimernom folijom [6]. Lameliranje se odvija u autoklavu pri temperaturi od oko 140 °C i tlaku od oko 14 bara. Za razliku od monolitnog stakla, lamelirano staklo pokazuje kapacitet popuštanja nakon loma stakla jer se komadići stakla drže za među sloj i ostaju na svom mjestu [2].

Rezidualni otpor lameliranog stakla nakon otkazivanja prvenstveno ovisi o veličini slomljenih odlomaka stakla, tj. Izravno o vrsti korištenog stakla [21]. Elementi od lameliranog stakla pokazuju veliku otpornost na lom kada su izrađeni od žarenog ili toplinski ojačanog stakla, koje se nakon popuštanja raspada na velike komade. Istovremeno, ti elementi pokazuju manju nosivost i otpornost na udarce u usporedbi s lameliranim staklom od kaljenih ploča. Lamelirano staklo izrađeno od kaljenog stakla karakterizira najveća nosivost, dok je zbog činjenice da se ova vrsta stakla lomi u obliku sitnih komada otpornost na lom takvog elementa zanemariva (slika 3).

Horizontalno ugrađeni elementi u zgradama kao što su stakleni krov ili podne ploče su najčešće izrađeni od toplinski ojačanog stakla zbog njegove krutosti nakon loma. S druge strane, fasade, osobito točkasto učvršćene, su izrađene od kaljenog stakla zbog koncentracije naprezanja na rupama. Izbor vrste stakla je osobito važan za staklene pregrade koje sprječavaju pad korisnika, ugrađene na balkonima ili na mjestima visinske razlike [12].



Slika 2. Ponašanje nakon loma lameliranog stakla izrađenog od: a) žarenog stakla, b) toplinski ojačanog stakla, c) kaljenog stakla [6]

Ponašanje lameliranog stakla nakon popuštanja stakla također ovisi i o materijalu među sloja [18]. Najčešće korišteni među sloj je polivinil-butiral (PVB), čija nazivna debljina je 0,38 mm. Obično jedan sloj čine dvije ili četiri folije, 0,76, odnosno 1,52 mm. Mehanički parametri folije jako ovise o trajanju opterećenja i temperaturi, i njihova vrijednost se smanjuje s porastom temperature i trajanja opterećenja [4]. U slučaju lameliranog stakla s PVB folijom, na izloženim rubovima elementa često započinje raslojavanje, koje može dovesti do smanjenja njegove nosivosti.

Posljednjih godina razvijeni su novi prozirni među slojni materijali koji su otporniji na klimatske uvjete, raslojavanje i istovremeno pokazuju veću krutost, veliku temperaturnu otpornost, vlažnu čvrstoću i otpornost na kidanje. Uporaba krute folije također omogućava smanjenje konačne debljine lameliranog stakla, što može biti od značaja za nadogradnju postojećih konstrukcija.

6. Standardizacija za staklo

Razvoj standarda za ostakljivanje konstrukcija ne može ići u korak s dinamičnim razvojem industrije stakla i njezinim potrebama [12]. Do danas u Europi nije objavljen niti jedan službeni i usklađeni standard za projektiranje komponenti od stakla [16]. Europski prEN standardi pripremani su tijekom nekoliko godina, međutim ostali su u fazi nacрта, najviše zbog nedostatka jednoglasnosti među državama članicama. Nekoliko zemalja ima nacionalne standarde i smjernice koje predstavljaju različite filozofije projektiranja i u različitim stupnju su konzervativne.

Europsko povjerenstvo za standardizaciju (CEN) je 2016. godine osnovalo povjerenstvo za konstrukcijsko staklo CEN / TC 250 / SC 11 čiji je zadatak razviti zajednički standard za projektiranje stakla za sve zemlje članice s radnim nazivom "Eurocode 10" [8]. Standard će se konačno sastojati od tri dijela, o osnovama projektiranja i općim načelima, proračunima elemenata opterećenih okomito na svoju ravan i proračunima elemenata opterećenih u ravnini i analize spojeva. Pojedini dijelovi „Eurocode 10“ trenutno imaju status nacрта tehničkih specifikacija i u sljedećim godinama bit će predmet savjetovanja u nacionalnim povjerenstvima za standardizaciju.

7. Zaključci

Staklo je jedan od najprivlačnijih građevinskih materijala poznat ljudima, međutim zbog svoje krhkosti, nepredvidivog ponašanja nakon loma i nedostatka usklađenih standarda za projektiranje, ono je ujedno i jedan od najsloženijih materijala za primjenu u konstrukcijama.

Projektiranje stakla također zahtijeva specijalizirana znanja i numeričke alate. Unatoč ogromnom broju postojećih konstrukcija od stakla, mnogi aspekti projektiranja konstrukcija



su i dalje ostali neriješeni, uključujući izvanredne scenarije opterećenja kao što su požar, poplava ili eksplozije.

8. Literatura

1. Achintha, M.: *Sustainability of glass in construction*, Sustainability of construction materials, Woodhead Publishing, Duoxford, 2016.
2. Bos, F.P.: *Safety Concepts in Structural Glass Engineering: Towards an Integrated Approach*, PhD thesis, TU Delft, Delft, 2007.
3. Bourhis, E.: *Glass: Mechanics and Technology*, Wiley, 2014
4. Botz, M., Siebert, G., Kraus, M.: *Experimental determination of the shear modulus of polymeric interlayers used in laminated glass*, Proceedings of GlassCon Global, Chicago, 2018, pp. 31-38.
5. De Lima, C.J., Veer, F., Çopuroğlu, O., Nijse, R.: *Advancements and Challenges in Glass Concepts, Manufacturing and Applications*, Proceedings of 13th International Congress on Advances in Civil Engineering, Izmir, 2018.
6. Haldimann, M., Luible, A., Overend, M.: *Structural Use of Glass*, IABSE, Zürich, 2008
7. Le Corbusier, Stirton, P., Benton, T.: *Glass, The Fundamental Material of Modern Architecture*, Tcheco-Verre, 1935, Vol. 2, pp. 1-4.
8. Feldmann, M., Kasper, R., Di Biase, P.: *European Structural Design of Glass Components – Notes on European standardization*, Stahlbau, 2016, Vol. 85, pp. 219-229.
9. Karlsson, S.: *Spontaneous fracture in thermally strengthened glass - A review & outlook*, Ceramics-Silikáty, 2017, Vol. 61(3), pp. 188-201.
10. Kozłowski, M., Bao, M.: *Warm bent glass for marine applications*, Proceedings of Engineering Transparency Conference, Düsseldorf, 2016, pp. 275-284.
11. Kozłowski, M.: *Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams*, PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology, Gliwice, 2014.
12. Kozłowski, M.: *Balustrady szklane. Analizy doświadczalne i obliczeniowe, podstawy projektowania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2019.
13. Kumar, R.V., Buckett, J.: *Float Glass*, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01850-6>.
14. Mercier, B.: *Benefits of optical distortion measurement – How Moiré technology drives the efficiency of glass production chains*, Proceedings of Engineering Transparency, Düsseldorf 2018, pp. 149-152.
15. Pariafsai, F.: *A review of design considerations in glass buildings*, Frontiers of Architectural Research, 2016, Vol. 5 (2), pp. 171-193.
16. Siebert, G.: *German and European design code for glass elements - Review and comparison*, Proceedings of GlassCon Global, Chicago, 2018, pp. 423-430.
17. Schneider, J., Hilcken, J.: *Cyclical fatigue of annealed and of thermally tempered soda-lime-silica glass*, Proceedings of MATEC Web of Conferences, Vol. 165 (1031):18003, 2018.
18. Schneider, J., Smith, C.A.: *Comparison of structural interlayers properties and performance*, Proceedings of GlassCon Global, Chicago 2018, pp. 399-404.
19. Sjögren, T.: *Laminated Safety Glass and Adhesives: A Literature Survey on Experimental Techniques and Experimental Data*, SP Rapport, Borås, 2012.
20. Tematski bilten: *Industrijska proizvodnja u BiH – PRODCOM rezultati, 2017.*, Agencija za statistiku BiH, Sarajevo, 2018, http://www.bhas.ba/tematskibilteni/IND_00_2017_TB_0_BS.pdf.



21. Vandebroek, M., Louter, C., Caspeepele, R., Ensslen, F., Belis, J.: *Size effect model for the edge strength of glass with cut and ground edge finishing*, Engineering Structures, 2014, Vol. 79, pp. 96-105, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.004>.
22. Wigginton, M.: *Glass in Architecture*, PHAIDON, London, 2004.
23. Wurm, J.: *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*, Birkhäuser Verlag AG, Basel, 2007.