

Avtor: Gorazd Lemajič

## Vsebina

1. Uvod
2. Karakteristike in definicija stekla
3. Materiali
4. Priprava steklarske mešanice in taljenje stekla
5. Oblikovanje stekla
6. Zgodovinski razvoj
7. Literatura

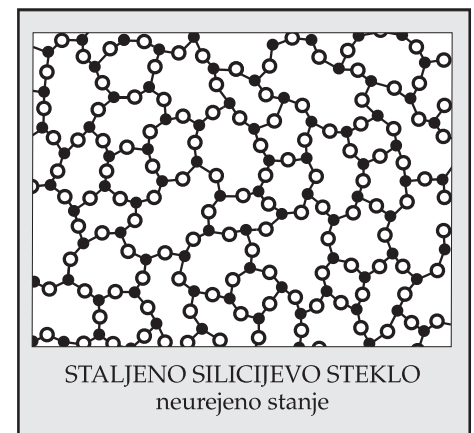
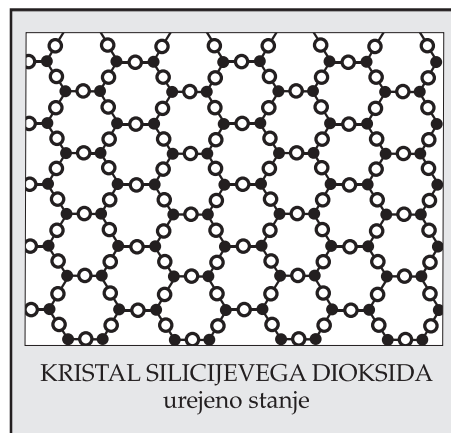
## 1. Uvod

Ne vemo natanko, kdaj je človek začel izdelovati steklo. Najstarejši predmeti iz steklene mase izhajajo iz okoli 3000 let pred našim štetjem. V stoletjih je potekal razvoj v pripravi in sestavi mase ter oblikovanju in danes si težko zamislimo življenje brez stekla. Od vsega začetka je s svojo trdoto, prozornostjo, barvo in drugimi optičnimi lastnostmi spodbujalo človekovo kreativnost, tako da je ta ne le ohranil obrt do današnjih dni, ampak je dosegel vsestranski razvoj in steklo se je nekako uvrstilo na vsa področja naše kulture ter moderne tehnologije. Vsak dan se srečujemo s steklenimi izdelki, ki se uporabljajo v arhitekturi, prehrabni industriji, medicini ter z uporabnimi predmeti in dekorativni predmeti v umetnosti. Leče in ogledala v teleskopih so iz stekla. Okna na raketah so iz treh vrst stekel, ki morajo prenesti visoke temperature med vstopom rakete v Zemljino atmosfero. Stekljena optična vlakna prena-

šajo do tisočkrat več informacij kot bakrena žička v telefonskih povezavah.

## 2. Karakteristike in definicija stekla

Glede na strukturo so lahko materije v kristalnem ali amorfnem stanju. Struktura materije nastane pri prehodu iz raztopine v trdo stanje. Ko so elementarni delci atomi, molekule ali ioni pravilno razporejeni med seboj, tako da tvorijo pravilno prostorsko mrežo (kristalno mrežo), nastane kristalno stanje. Kadar se v trdem stanju ohrani nepravilen raspored kot v raztopini, potem nastane amorfnost stanje. V skupini amorfnih materialov spada steklo v posebno podskupino. Združuje nekatere lastnosti kristalov in tekočin, a je kljub temu izrazito drugačno od obeh. Pravzaprav je tekočina, ki ima zaradi velike viskoznosti vse lastnosti trdnine. (skica 1)



Skica 1: Struktura kristala silicijevega dioksida in staljenega silicijevega stekla

Steklo formiramo s taljenjem materialov na zelo visokih temperaturah. Za steklo potrebujemo tri vrste materialov (glej poglavje Materiali):

- **Osnovne sestavine**
- **Talila**
- **Stabilizatorji**

Praviloma so stekla fizikalno homogeni, trdi in krhki materiali, z različno stopnjo prepustnosti svetlobe, in imajo školjkast izgled preloma. Steklo ima majhno toplotno prevodnost in je tudi električni izolator. Proti koroziji je bolj odporno kot večina materialov, vendar se po dolgotrajnem delovanju agresivnih snovi na njegovi površini odvijajo kemijski procesi, ki povzročijo zameglitev, izgubo sijaja in prozornosti. Kisline in lužine napadajo steklo na različne načine. Lužine zaradi njegove kisle narave vplivajo neposredno na silicijev dioksid, medtem ko kisline topijo alkalne komponente ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ) v sestavini stekla. Navadno steklo prepušča okoli 90% svetlobe, vpija 1% in odbija 8% svetlobe.

Ločimo **naravna stekla** (vulkanska stekla) in **umetna stekla** (tehnična stekla). Naravna stekla nastanejo pri izbruhih vulkanov in pri udarih strel, ko se stopljena kamnina prehitro hladi in ne kristalizira.

Umetna stekla pridobivamo iz silikatnih kot osnovnih ter borovih in fosfatnih talin, za obarvanje pa uporabljamo kovinske okside. Glede na uporabnost ločimo okenska, optična, laboratorijska, kristalna, barvna in druga posebna stekla. Po sestavi surovin pa se delijo na natrijevo-kalcijevo steklo (surovine: kremenov pesek, apnenec, soda), kalijevo-kalcijevo steklo (surovine: kremenov pesek, apnenec, pepelika), svinčevo steklo (surovine: kremenov pesek, minij (svinčevi oksidi), pepelika), boratno-aluminatno steklo (borov oksid in aluminijev oksid zamenjata del silicijevega oksida, doda se še borova kislina ali boraks in aluminijevi silikatni minerali: kaolin

in glinenci) in različna posebna stekla (svetlobno občutljiva stekla z dodatkom srebrovega klorida, ne silikatna stekla (fosfatna) in boratna stekla).

Za boljšo predstavo o razvoju izdelave stekla je treba omeniti nekatere steklaste materiale, kot so steklo, glazura, emajl in na visokih temperaturah sintran kremenov pesek, ki je včasih imenovan egipčanska fajansa.

Steklo, glazura in emajl vsebujejo velike količine natrijevega oksida ali pa kakšno drugo alkalijo, na primer kalijev oksid, medtem ko egipčanska fajansa vsebuje majhne količine alkalij med zrni kvarca (pri procesu se kvarc ne stali, tako da je ta po fizikalnih lastnostih material med steklom in keramiko).

**Steklo** je material, formiran iz kremenovega peska, apnenca in sode. Te sestavine se pri zadostni temperaturi stalijo v homogeno maso (tekoče steklo). Kemično so steklo, glazura in emajl lahko zelo podobni, vendar raztezni koeficient v času hlajenja pri steklenem izdelku ni tako pomemben kot pri glazuri in emajlu.

**Glazura** je steklasta prevleka, nanesena na drug material (keramika), da bi le-ta postal neprepusten, ima pa tudi estetski pomen. V večini primerov je nanesena po prvem žganju in nato ponovno žgana, da zastekli.

**Emajli** so neprozorna motna stekla, nanesena na kovino s takšno sestavo, da reagirajo s kovino in se s tem poveča oprijem. Doseči je treba dve zahtevi: raztezni koeficient mora biti zelo podoben nosilnemu materialu in tališče mora biti nižje od tališča nosilnega materiala. Da bi dosegli ta kriterij, so sestavljali emajle iz svinčevih ali kalijevih stekel, katere so na material nanašali v obliki prahu.

**Egipčanska fajansa** je sestavljena iz kalciniranega kremenovega peska z dodatkom 2% kalcijevega oksida in

0,25% natrijevega karbonata.

Nastane pasta, ki jo je mogoče oblikovati z roko ali pa vtiskati v kalup. Izdelek se nato peče, dokler natrijev karbonat ali kalijev karbonat ne reagira in kremenove delce med seboj zatali.

### **Vrste stekel**

Skoraj vsa komercialna stekla spadajo v šest kategorij ali vrst.

Te kategorije bazirajo na kemijskih sestavinah. Znotraj vsake kategorije, razen pri staljenem silicijevem steklu, so številne različne sestavine.

1. **Natrijevo-kalcijevo steklo** je najpogostejše in najcenejše steklo. Sestavljeno je iz 60–75% silicijevega dioksida, 12–18% natrijevega oksida in 5–12% kalcijevega oksida.

Odpornost proti visokim temperaturam in hitrim spremembam temperature je slaba. Odpornost proti jedkim kemikalijam ni preveč dobra (steklenice, okna).

2. **Svinčevo steklo** ima visok odstotek svinčevega oksida (20% v mešanici). Je relativno mehko in ima visok sijaj. To vrsto uporabljamo v elektriki, ker je dober izolator. Ne prenaša pa dobro visokih temperatur in hitrih sprememb temperature (termometrične cevi, umetniško steklo).

3. **Bor-silicijevo steklo** je katero koli silicijevo steklo z vsaj 5% borovega oksida v svoji sestavi. Ima visoko odpornost proti temperaturnim spremembam in je kemično zelo odporno (laboratorijsko steklo, steklena posoda).

4. **Aluminij-silicijevo steklo** ima v sestavi aluminijev oksid. Podobno je bor-silicijevemu steklu, vendar ima večjo kemično trpežnost in lahko prenese višje temperature.

5. **96% silicijevo steklo** je bor-silikatno steklo, iz katerega odstranijo skoraj vse nesilicijeve in borove spojine. To ponovno segrejejo na 1200°C, s čimer dosežejo večjo

kompaktnost. Takšno steklo je odporno proti vročinskim skokom do 900°C.

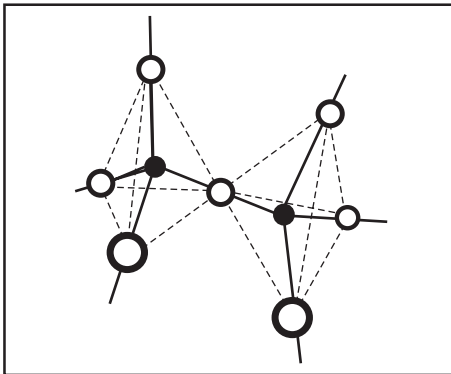
**6. Staljeno silicijevo steklo** vsebuje samo silicijev dioksid v amorfnem stanju. Za izdelavo je to najdražja vrsta stekla in je lahko nekaj časa izpostavljeno temperaturam do 900°C, za kratek čas tudi do 1200°C (ogledala v astronomskih teleskopih, okna na vesoljskih plovilih).

### 3. Materiali

#### Osnovne sestavine

Osnovne sestavine stekla so materiali, ki **formirajo** steklo. V odstotkih je to največja količina materiala, ki jo uporabljamo za steklarsko mešanico. Z dovolj visoko temperaturo se v steklo lahko raztali skoraj vse iz Zemljine skorje.

**Silicijev dioksid** ( $\text{SiO}_2$ ) (**skica 2**) je pri vseh vrstah stekel osnovni material in se uporablja v obliki peska. Steklu poveča kemično odpornost in toplotno obstojnost. Njegova prevelika prisotnost zviša temperaturo taljenja. V sestavo stekla se vnaša s kremenovim peskom.



Skica 2: Tetraedrski prostorski prikaz oblike silicijevega dioksida

**Kremenov pesek** uporabljamo kot surovino za silicijev dioksid. Nastane kot produkt razgrajevanja naravnih silikatnih kamnin, bogatih s kremenom, pod vplivom vode, visokega pritiska in temperature. V tem procesu se v pesku pojavijo tudi drugi mineralni produkti, na osnovi katerih je mogoče raziskati teritorialni izvor peska.

**Bor trioksid** ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) zmanjšuje težnjo stekla h kristalizaciji ter povečuje kemično odpornost. V sestavo stekla se vnaša z borovo kislino in boraksom.

**Aluminijev trioksid** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je steklotvoren v vseh aluminijsko-silikatnih steklih. Znižuje koeficient toplotnega širjenja stekla, povečuje toplotno in mehansko odpornost ter kemično stabilnost. V sestavo stekla se vnaša z naravnim kaolinom.

#### Talila

Talila so materiali, ki znižujejo temperature taljenja.

**Natrijev oksid** ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) poveča koeficient toplotnega širjenja stekla. Če je prisoten v talini, ji zmanjšuje viskoznost, se lažje tali in bistri. V sestavo stekla se vnaša z natrijevim karbonatom in natrijevim sulfatom.

**Natrijev sulfat** ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) je zelo čist sintetični proizvod. Uporablja se za vnašanje natrijevega oksida in bistri steklo.

**Soda** ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) je najpogostejši oksid v sestavi. Uporabljali so jo v vsej zgodovini proizvodnje stekla. Zmes, ki vsebuje natrijev oksid, se lažje tali in bistri. Čisto kremenovo steklo se tali pri temperaturi 1700°C, če mu dodamo 25 ut. % natrijevega oksida, pa se temperatura taljenja zniža na 800°C. V preteklosti so se steklarji oskrbovali s sodo iz slanih jezer, ki so le v južnem in vzhodnem delu Sredozemlja (današnji Egipt in Bližnji vzhod).

**Kalijev oksid** ( $\text{K}_2\text{O}$ ) daje steklu sijaj in prosojnost ter poveča lomni količnik. Uporablja se v proizvodnji visokokvalitetne steklene posode, kristalnega in optičnega stekla. V sestavo stekla se vnaša s pepeliko.

**Pepelika** ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) je staro ime za kalijev karbonat. Veliko je je v pepelu listavcev – zato pepelika. V procesu taljenja razpade na  $\text{K}_2\text{O}$ , ki se veže v sestavo stekla, mehurčki  $\text{CO}_2$  pa bistrijo steklo. Pepelika je končni produkt kalciniranja – segrevanja

raztopine rastlinskega pepela. Na območju srednje in severne Evrope so uporabljali pepeliko za zniževanje tališča, predvsem v obdobju visokega srednjega veka. Lesa je bilo v izobilju, primanjkovalo pa je sode.

**Svinčev oksid** ( $\text{PbO}$ ) v sestavi stekla vpliva na njegovo specifično težo in tališče, kar omogoča delo na nižjih temperaturah. Svinčevo steklo je mehkejše in se lažje brusi. Talina ima manjšo viskoznost in upočasnjeno trdenje, kar olajša oblikovanje.

#### Stabilizatorji

Stabilizatorji se vežejo z osnovnimi sestavinami in talili. Ohranjajo strukturo in enotnost stekla ter povečujejo stabilnost.

**Kalcijev oksid** ( $\text{CaO}$ ) dobro vpliva na fizično-mehanske lastnosti in kemijsko odpornost. Olajša proces taljenja in bistrenja. V talini dobro vpliva na viskoznost in površinsko napetost, tako da se oblikovalni procesi lažje odvijajo. V sestavo stekla se vnaša v obliki apnenca, krede ali marmorja.

**Apnenec** ( $\text{CaCO}_3$ ) je sedimentna in metamorfna kamnina. Naravni apnenčasti skladi so nastali kot sedimenti lupin morskih organizmov. Poleg kalcijevega oksida lahko vsebuje tudi primese, od katerih so najmanj zaželeni oksidi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  in organske materije, ker obarvajo steklo. Na temperaturi 900°C razpade na kalcijev oksid ( $\text{CaO}$ ) in ogljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ). Kalcijev oksid se veže v sestavo stekla, mehurčki ogljikovega dioksida pa steklo bistrijo.

**Magnezijev oksid** ( $\text{MgO}$ ) v steklu vpliva na njegove kemijske in mehanske lastnosti. Če v sestavo stekla namesto kalcijevega oksida vnesemo magnezijev oksid, se zmanjša koeficient toplotnega širjenja. V sestavo stekla se vnaša z dolomitom.

**Dolomit** ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ) vsebuje 30–45% kalcijevega oksida ( $\text{CaO}$ ),

21–87% magnezijevega oksida (MgO) in 47–70% ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>). Uporablja se v sestavi stekla, ko je treba vnesti tako kalcij kot magnezij. Ko se tali, razpade na CaO in MgO. Ogljikov dioksid v obliki mehurčkov bistri steklo.

**Barijev oksid** (BaO) uporabljamo predvsem za proizvodnjo optičnih in kristalnih stekel, ker v sestavi stekla povečuje lomni količnik in ostale optične lastnosti. Barijeva stekla imajo povišan sijaj in specifično težo.

**Cinkov oksid** (ZnO) daje steklu dobro toplotno in kemijsko odpornost. Takšna stekla dobro prenašajo hitre temperaturne spremembe. Uporablja se v proizvodnji motnega stekla, ker poveča njegov sijaj in belino.

#### Sekundarna surovina

**Zdrobljeno steklo** se vnaša v sestavo steklarske mešanice v količini 25–30%. Velikost koščkov stekla ne sme biti prevelika (20–30 mm), ker to vpliva na homogenost stekla, premajhni koščki pa otežujejo proces bistrjenja. Lahko se uporablja kot tehnološki odpadki, ki nastajajo v raznih fazah proizvodnje, ali pa kot sekundarna surovina (steklena embalaža).

#### Sredstva za barvanje stekla

Steklo je obarvano, če so v njem barvajoče prvine. Z barvo steklo pridobi estetski videz ali doseže specifične lastnosti (razni filtri, zaščitna stekla). Steklo se lahko barva med samim procesom taljenja ali pa po površini, kar pa že spada v dodelavo steklenih predmetov. Sredstva za barvanje stekla lahko primešamo pripravljene steklarski masi ali jih dodajamo v samo talino. Glede na fizikalno-kemične karakteristike in način reagiranja v talini stekla razlikujemo molekularno in koloidno barvajoče materiale (*fizikalna razlaga: molekularno pomeni, da se delci raztopijo do atomskega nivoja, koloidno pa so v stekleni masi razpršeni majhni delci (1 mikron), tako da je steklo še vedno prosojno, mu pa dajo barvo*).

**Molekularno barvajoči materiali**  
**Spojine mangana** obarvajo steklo vijoličasto. Tako intenzivnost kot niansa se spreminjata glede na prisotnost drugih oksidov. Razna sredstva za bistrjenje stekla zmanjšujejo intenzivnost vijoličaste barve.

**Spojine kobalta** obarvajo steklo modro. Kobaltov oksid (CoO) je kemično stabilen, tako da pogoji taljenja ne vplivajo na barvo stekla. Intenzivnost barve je odvisna od količine kobaltovega oksida in vrste stekla. Kalijeva stekla imajo večjo intenziteto kot natrijeva pri enaki količini kobaltovega oksida. Kobalt je močno barvajoče sredstvo, saj že 0,001% zadostuje za opazno nianso modre barve. Z mešanjem spojin kobalta, bakra in kroma dobimo različne nianse, od zelenomodrih do zelenih.

**Spojine niklja** obarvajo natrijeva stekla vijoličasto, kalijeva pa rdečevijoličasto. Pogoji taljenja ne vplivajo na barvo stekla, intenzivnost pa je odvisna od količine NiO.

**Spojine kroma** obarvajo steklo rumenozeleno ali zeleno. V redukcijskih pogojih taljenja nastane kromov (III) oksid in steklo se obarva zeleno, v oksidacijskih pogojih pa se steklo obarva rumenozeleno.

**Spojine bakra** obarvajo steklo z različnimi niansami od modre do modrozeleno. Pri redukcijskih pogojih taljenja se steklo ne obarva, tako da zelene nianse dosežemo le v oksidacijskih pogojih taljenja. Tako obarvana talina se težko bistri in ji je treba dodati sredstvo za bistrjenje.

**Spojine železa** obarvajo steklo rumenozeleno ali modrozeleno. V redukcijskih pogojih taljenja in s prisotnostjo žvepla se steklo obarva zamolklo sivo.

**Spojine urana** obarvajo steklo rumenozeleno.

**Spojine selena** obarvajo kalijeva stekla z roza odtenkom, natrijeva pa zamolklo rumeno. Dobro obarvanje

dosežemo le v oksidacijskih pogojih taljenja.

#### *Koloidno barvajoči materiali*

**Zlato** obarva steklo rdeče. Intenzivno temno rdeče steklo se imenuje zlati rubin.

**Srebro** obarva steklo zlatorumeno. To dosežemo po ponovnem segrevanju. Taljenje se odvija pri visokih temperaturah in v oksidacijskih pogojih.

**Baker** obarva steklo svetlo rdeče. Taljenje stekla se odvija v redukcijskih pogojih, kar preprečuje prehod v bakrov oksid (CuO), ki bi steklo obarvalo modro.

**Selen** obarva steklo tudi koloidno, vendar samo, kadar je prisoten kadmijev sulfit (CdS).

#### Sredstva za doseganje motnosti stekla

Kadar v sestavo stekla vnesemo materije, ki se ne topijo, dobimo motno ali mlečno steklo. Motnost nastane zaradi majhnih delcev v steklu, na katerih se svetloba razprši v vse smeri. Takšno lastnost stekla dosežemo z uporabo spojin fluora, v manjših primerih s fosfati, nekaterimi sulfati, kloridi in tudi s kositrovim oksidom SnO<sub>2</sub>.

#### Sredstva za bistrjenje stekla

V procesu taljenja se v stekleno talino ujamejo plinasti mehurčki različnih velikosti. Proces bistrjenja odstrani mehurčke in homogenizira talino. V procesu bistrjenja uporabljamo več sredstev.

**Natrijev sulfat** na visokih temperaturah razpada in izločita se SO<sub>2</sub> ter kisik. Pri tem nastanejo plini, ki se povežejo v velike mehurje. Ti na svoji poti skozi talino povlečejo za seboj drobne plinaste mehurčke, nastale pri taljenju.

**Natrijev klorid** ne razpade, ampak na visokih temperaturah izpareva, meša talino in na tak način združuje

manjše mehurčke v večje, ki lažje zapuščajo talino.

*Arzenik* bistri steklo, ko je prisoten v večjih količinah. Počasi izpareva in ustvarja mehurje, ki mešajo stekleno maso.

*Amonijeve soli* na nizkih temperaturah razpadajo, izparevajo in mešajo stekleno talino.

#### Sredstva za razbarvanje stekla

Veliko brezbarvnih stekel ima nežno modro ali zeleno nianso, ki nastane zaradi nečistoč, prisotnih v osnovnih surovinah, ali zaradi korozije sten peči. Steklo se lahko razbarva na fizikalni ali kemični način.

*Fizikalni način* razbarvanja raztopine stekla dosežemo z vnosom majhnih količin neke materije, ki daje komplementarno barvo in nevtralizira obstoječo obarvanost stekla. Kadar obarvanost stekla povzroča oksid železa, za razbarvanje uporabljamo manganov dioksid ( $MnO_2$ ), selen (Se) ali natrijev selenat ( $Na_2SeO_3$ ). Vsa sredstva, ki jih uporabljamo za razbarvanje stekla, vplivajo na njegovo transparentnost.

*Kemični način* razbarvanja raztopine stekla spreminja barvajoče primese v drugo kemično obliko, z manjšo obarvanostjo, ali pa obarvanost odstranjuje. Zmanjševanje intenzivnosti obarvanja dosežemo s spremembo valentnega stanja barvajočega oksida.

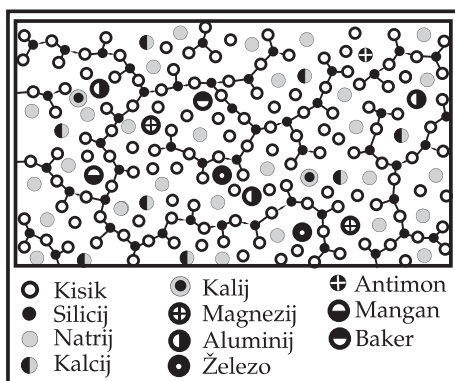
Steklarji so v preteklosti z Bližnjega vzhoda tudi uvažali steklarsko mešanico v obliki velikih kosov stekla, ki so ga razrezali in ga uporabili za izdelavo izdelkov (*slika 1*).

Raziskave so pokazale podobno kemično sestavo evropskih stekel s stekli iz vzhodnega Sredozemlja. Uporabljali so tudi rastlinski pepel, ki so ga pridobivali iz obrežnih rastlin v predelih vzhodnega Sredozemlja, kar kaže na visoko vsebnost MgO v steklih starega veka. Pri steklih visokega srednjega veka so



*Slika 1: Kos staljenega stekla*

odkrili povečano količino kalija, magnezija in fosforja, kar kaže na pridobivanje alkalijskih oksidov iz rastlinskega pepela različnih vrst dreves.



*Skica 3: Primer tipičnega rimskega stekla*

## 4. Priprava steklarske mešanice in taljenje stekla

Naravni materiali ne izpolnjujejo vseh zahtev glede kvalitete in jih je zato treba pripraviti za steklarsko mešanico. Metode, ki jih uporabljamo za izboljšanje in doseganje potrebne kakovosti za steklarsko mešanico, so: pranje, elektromagnetno ločevanje, kemično prečiščevanje, drobljenje in mletje, sušenje in sejanje. Za vsako vrsto surovine je treba izbrati ustrezno metodo.

Določanje natančne količine zastopanosti različnih materialov v steklarski mešanici je izrednega pomena za kvaliteto stekla. Napake se kažejo v slabših kemičnih in fizikalnih lastnostih. Vse materiale je treba dobro premešati v posebnih mešalnikih.



*Slika 2: Steklarska peč*

### Taljenje stekla

Proces taljenja stekla se začne z vnosom steklarske mešanice v peč (*slika 2*).

Med počasnim segrevanjem potekajo fizikalne in kemične spremembe prašnatega surovinskega materiala, dokler se mešanica na določeni temperaturi ne spremeni v steklasto talino. Do tega pride med 700 in 1500°C, odvisno od osnovnih in pomožnih surovinskih materialov. Ves proces lahko razdelimo na več stopenj: nastajanje silikatov (400–600°C), nastajanje stekla (1100–1200°C), bistrenje taline (do 1550°C), homogenizacija taline (1400–1500°C) in hlajenje taline do temperature, ki omogoča oblikovanje stekla.

*Nastajanje silikatov* se začne pri nizkih temperaturah in dokler je steklarska mešanica še čvrsta, se odvija počasi. Ko pride do tekočega stanja, se proces nastajanja silikatov zelo pospeši. V začetni fazi izpareva vlaga, ko pa temperatura steklarske mešanice naraste, se začnejo kemične reakcije in nastajanje raznih silikatnih spojin. Na temperaturah med 1100 in 1200°C se začne proces *nastajanja stekla*. Začne se popolno taljenje nastalih alkalnih in zemeljskoalkalnih silikatov ter

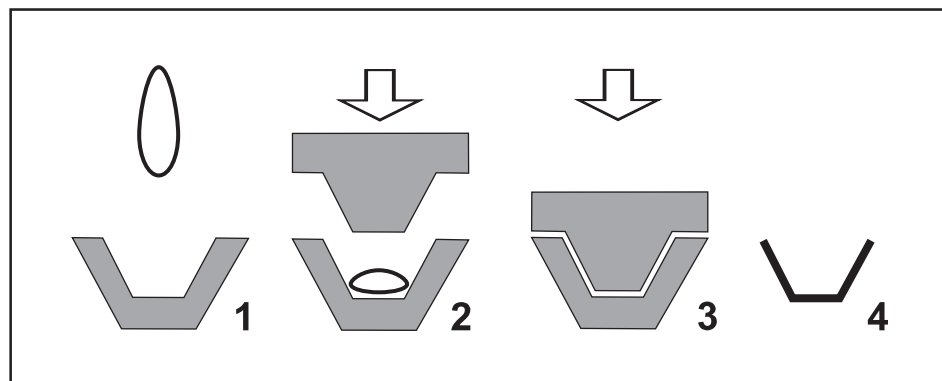
raztapljanje nekaterih zrn kremenovega peska. Proces nastajanja stekla se odvija mnogo počasneje od procesa nastajanja silikatov (8- do 9-krat). Na koncu tega procesa je steklo že prozorno, ne vsebuje več neraztopljenih delcev, vendar zaradi ujetih plinastih mehurčkov še nima potrebne homogenosti. **Bistrenje taline** je proces, ki se odvija na visokih temperaturah, lahko tudi do 1550°C. Pri tako visokih temperaturah pade viskoznost steklene taline in mehurčki lažje uhajajo iz taline. Proces lahko pospešimo z dvigom temperature, intenzivnim mešanjem taline ali dodajanjem sredstev za bistrenje stekla. **Homogenizacija taline** je njena popolna kemična in fizična homogenost. Ta proces se odvija vzporedno z bistrenjem na temperaturah med 1400 in 1500°C. Po zaključku bistrenja in homogenizacije ima steklena talina vse potrebne lastnosti za oblikovanje stekla razen dveh – visoke temperature in nizke viskoznosti. Potreben je še proces **hlajenja taline** do ustrezne temperature (glej poglavje Tehnike oblikovanja), ki omogoča oblikovanje stekla.

V preteklosti, ko so steklarji v pečeh dosegali le temperature do 1000°C, je bilo težko narediti homogeno steklarsko maso. V masi je bilo polno zračnih mehurčkov (**slika 3**) in neraztopljenih materialov (**slika 4**).

Pri višjih temperaturah viskoznost talini pade in mehurčki lahko iz taline uidejo. Če so hoteli narediti



**Slika 3:** Zračni mehurčki v steklu

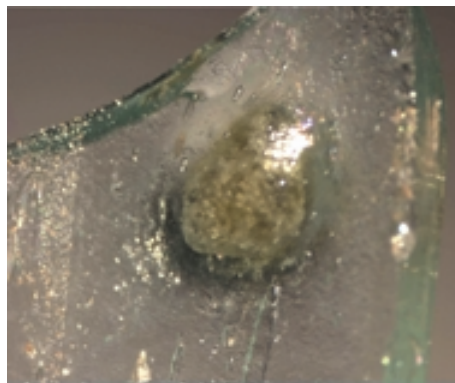


**Skica 4:** Stiskanje steklene mase v kalup

homogeno stekleno maso, je bilo treba procesu priprave steklarske mase dodati še nekaj postopkov. Pripravljeno mešanico je bilo sprva treba zagreti do stopnje, da so materiali med seboj reagirali in se zlili v polstekleno gosto maso. To so ohladili in jo zdrobili v prah. Na tej stopnji so lahko odstranili razne nestopljene materiale (kamne) in po potrebi ponavljali proces taljenja, drobljenja in čiščenja. Ko so dosegli zadovoljivo kvaliteto mešanice, so tudi na nižjih temperaturah dobili homogeno stekleno talino, potrebno za izdelavo predmetov.

## 5. Oblikovanje stekla

Steklo je material, ki ga lahko oblikujemo s preprostimi ali pa tehnološko zapletenimi metodami. Talino lahko ulivamo v kalupe, lepimo ali valjamo kot vosek in glino, brizgamo pod pritiskom kot plastične mase. Za izdelavo steklenih cevi talino vlečemo, med seboj je mogoče staliti



**Slika 4:** Kamen v steklu

različna stekla v večslojne proizvode, talino lahko pihamo v kalupe ali pa jo oblikujemo brez njih. Steklena vlakna lahko tkemo kot ostale tekstilne materiale. Oblikovanje stekla je proces, pri katerem iz taline dobimo proizvod določene oblike. V tej fazi talina prehaja iz plastične v trdo obliko. Ves proces lahko razdelimo na nastajanje oblike in njeno utrjevanje. Utrjevanje je počasno hlajenje oblikovanega predmeta.

Za proces oblikovanja sta zelo pomembni dve lastnosti steklene taline: viskoznost in površinska napetost. Faza oblikovanja je mogoča samo znotraj določene stopnje viskoznosti (glej poglavje Tehnike oblikovanja). Primer: viskoznost vode pri sobni temperaturi je 0,1 poisa (enota za viskoznost), motornega olja približno 1 poise, viskoznost večine stekel pri sobni temperaturi pa je  $10^{19}$ – $10^{22}$  poiso.

Viskoznost je količina, ki nam pove, kako lahko ali težko tekočina teče, površinska napetost (medfazna napetost) pa opisuje lastnost razlivanja in mešanja.

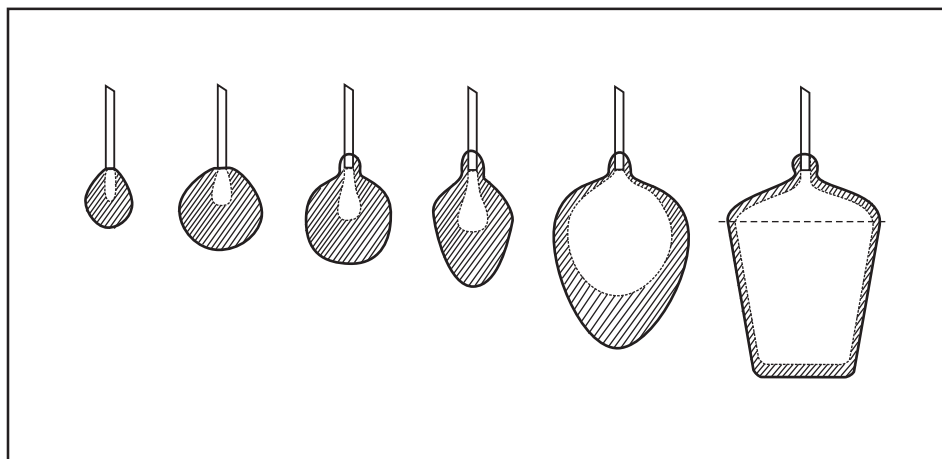
### Tehnike oblikovanja

Večino steklenih izdelkov danes oblikujemo s stiskanjem v kalupe, pihanjem, vlečenjem in vlivanjem.

**Stiskanje** steklene mase (**skica 4**) v kalupe se odvija pri temperaturi 650–1050°C in ko je viskoznost med  $10^5$  in  $10^9$  poiso. To tehniko lahko



Slika 5: Oblikovanje stekla s steklarsko pipo



Skica 5: Oblikovanje stekla s steklarsko pipo

izvajamo z ročnimi ali avtomatiziranimi prešami in je eden od najstarejših načinov oblikovanja stekla. Imeti moramo zunanji kalup, ki daje proizvodu zunanjo obliko, in notranji kalup, če želimo, da ima proizvod notranjo obliko.

**Pihanje** uporabljamo za izdelavo steklene embalaže, različnih posod in tehničnih stekel. Postopek je lahko ročni (slika 5, skica 5) ali mehaniziran. Temperatura steklene mase mora biti 750–1150°C, viskoznost pa med  $10^3$  in  $10^7$  poisov. S to tehniko oblikujemo votle steklene predmete z uporabo kalupa (slika 6) ali brez (slika 7). Oblikovanje se odvija s steklarsko pipo (železna cev). Od orodja uporabljamo še lesene šablone, pincete, škarje in kalupe.



Slika 6: Leseni kalup



Slika 7: Rimska vaza na sliki št. 1 oblikovana s tehniko pihanja v kalup Rimska vaza na sliki št. 2 oblikovana samo s tehniko pihanja

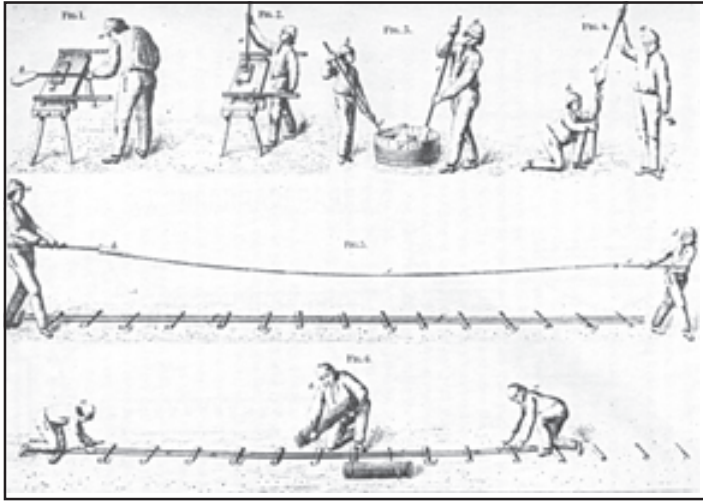
**Ulivanje** je tehnika za proizvodnjo ravnega in armiranega stekla in se odvija pri temperaturi taline 800–1150°C in viskoznosti med  $10^3$  in  $10^7$  poisov. Ta način je skupaj s stiskanjem v kalupe med najstarejšimi tehnikami oblikovanja.

**Vlečenje stekla** je kot tehnika zelo podobno pihanju, saj tudi pri pihanju vlečemo steklo iz kroglastega mehurja v bolj dolgo elipsasto obliko. Na tak način izdelujemo ravno steklo, steklene profile in cevi (sliki 8,9). Delovna temperatura steklene taline

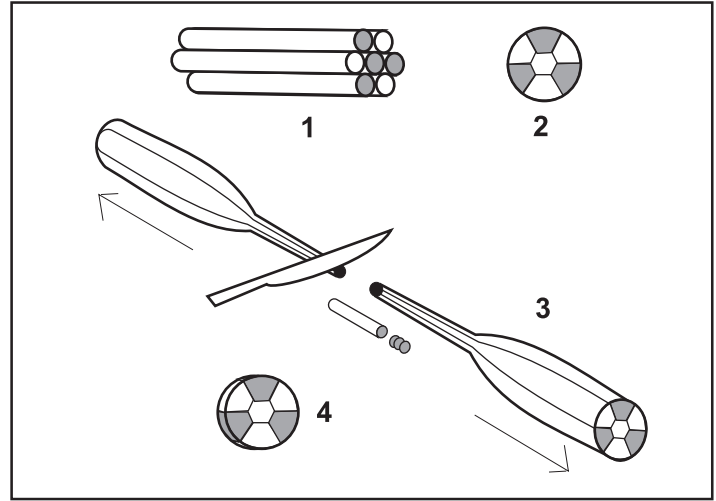
je 700–1050°C, viskoznost pa med  $10^4$  in  $10^8$  poisov. Postopek je lahko ročni ali mehaniziran.

Pri oblikovanju uporabljamo tudi kombinacije tehnik. Oblikujemo lahko končne proizvode ali polproizvode, ki dobijo svojo končno obliko z različnimi načini dodelave steklenih izdelkov.

Zgoraj so navedene štiri osnovne tehnike, s katerimi oblikujemo steklo. Pri večini drugih tehnik tako ali drugače uporabimo enega od osnovnih načinov.



Slika 8: Risba iz 19. stoletja prikazuje ročno izdelovanje steklenih cevi



Skica 6: Izdelava koščkov stekla za tehniko mozaika



Slika 9: Vlečenje stekla

Mozaik je tehnika, pri kateri že prej narejene koščke iz stekla razporedimo v kalup in jih nato žgemo, dokler se koščki ne zlijejo med seboj (skica 6). Koščke izdelamo iz steklenih palčk (sliki 10, 11).



Slika 10: Posoda, narejena s tehniko mozaika



Slika 11: Prerez steklenih palčk

Podobna tehnika kot mozaik je *Reticella*, pri kateri namesto iz koščkov stekla oblikujemo posodo s steklenimi palčkami, ki se pri žganju zlijejo med seboj.

V preteklosti so uporabljali nekatere načine za izdelavo steklenih izdelkov, ki se danes ne uporabljajo več, predvsem zaradi razvoja tehnologije.

Predmete iz stekla, **nanesenega na jedro**, so našli na območju Bližnjega vzhoda, Mezopotamije in Egipta. Izdelovali so jih tako, da so na obliko, narejeno iz gline in živalskega blata, nanašali steklo. Ko se je steklo ohladilo, so jedro odstranili in dobili uporabno votlo posodo (skica 7).

Okensko steklo so izdelovali s pihanjem v obliko diska (slika 12, skica 8) in s pihanjem v kalup (skica 9). Danes ravno steklo izdelujemo s tehniko vlečenja in ulivanja.

#### Dodelava steklenih izdelkov

Nekatere steklene izdelke po končanem toplotnem oblikovanju še dodatno obdelujemo. Z različnimi obdelavami izboljšamo lastnosti ali pa dosežemo svojevrsten estetski izgled. Predmete obdelujemo toplotno, kemično in mehansko.

#### Toplotna obdelava:

S to metodo odstranjujemo tako imenovane kape, ki ostanejo kot sled steklarske pipe in zatalijo se ostri robovi.

#### Kemična obdelava:

Metode kemične obdelave površine so matiranje, poliranje, jedkanje in dekoracija.

#### Mehanska obdelava:

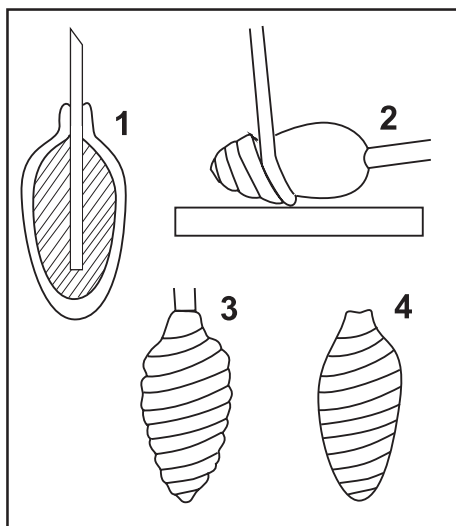
K mehanski obdelavi proizvodov spadajo brušenje robov, poliranje, reliefno brušenje in graviranje.

## 6. Zgodovinski razvoj

Preden so odkrili, kako izdelovati steklo, je človek tisočletja uporabljal steklo, ki ga je ustvarila narava. Med tako imenovana naravna stekla štejemo vulkansko kamnino (slika 13), ki se formira pri izbruhu vulkana, ko se stopljena granitna kamnina hladi prehitro in ne kristalizira. Je črne barve in je prisotna na vseh vulkanskih področjih sveta.

Steklo lahko nastane tudi pri padcu meteoritov in je verjetno najstarejša oblika naravnega stekla, saj so nekateri primerki nastali pred 4,5 milijarde let, hkrati z nastankom Zemlje. Zelo zanimivo obliko stekla lahko v pesku s svojo vročino





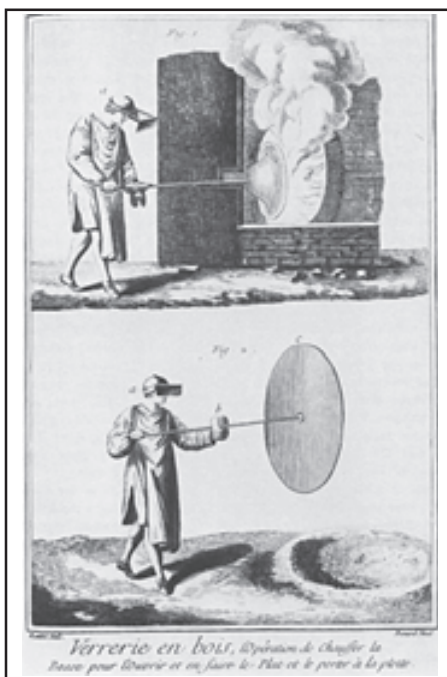
Skica 7: Nanašanje stekla na jedro

ustvari strela. Nastanejo steklene cevi, dolge tudi po nekaj metrov. Lehnjak je naslednja oblika, ki nastane pri izbruhu vulkana, ko stopljeni materiali zaradi hitrega ohlajanja osteklenijo. Plini, ki se ob izbruhu sproščajo, se ujamejo v steklo in ustvarijo penast material. Steklene vlakna so še ena oblika, ki nastane iz stopljene bazaltne vulkanske kamnine, katero močan veter razpiha v tanke pramene. Iz naravnega stekla so izdelovali nože in glave puščic. Nekateri izdelki iz lusk vulkanske kamnine segajo v čas paleolitika.

Proizvodnja stekla se je začela nekje v Mezopotamiji, kakšnih 3000 let pred našim štetjem. Zelo malo izdelkov se je ohranilo iz tistega časa, ker je bila kemična sestava mase nestabilna. V egipčanskih grobnicah so našli neprozorne steklene kroglice iz obdobja med letoma



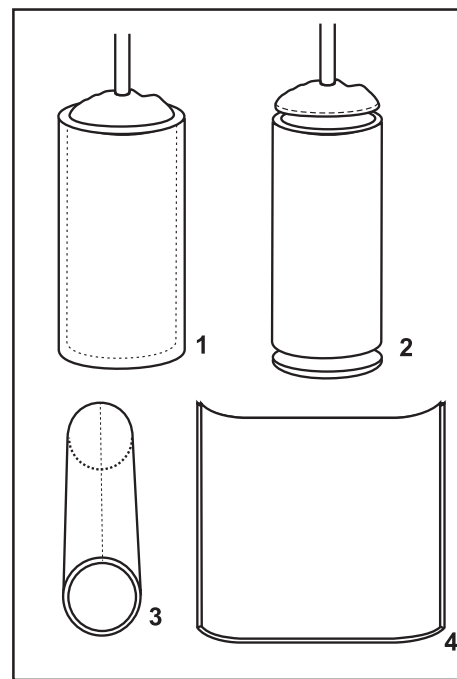
Slika 13: Vulkanska kamnina



Slika 12: Izdelovanje ravnega stekla s tehniko pihanja (ilustracija iz 18. stoletja)

3300 in 2800 pr.n.št. Iz vzorcev iz leta 1600 pr.n.št. je že razvidno, da so poznali tehniko ulivanja, brušenja in barvanja stekla. Steklene mozaične ploščice se pojavijo okoli leta 1200 pr.n.št. Proizvodnja stekla v starem Egiptu se razcveti okoli leta 300 pr.n.št., s središčem v Aleksandriji. Izdelki iz časa starega Egipta so v obliki neprozornih majhnih koščkov stekla različne debeline, ki so jih uporabljali predvsem za okraševanje.

Prvi primeri steklenega posodja spadajo v obdobje med letoma 700 in 500 pr.n.št. Izdelano je bilo z uporabo štirih tehnik: nanašanja stekla na jedro (glina in živalsko blato), mozaik tehniko, ulivanjem v kalup in brušenjem (glej Tehnike oblikovanja). Posode s tehniko mozaika izhajajo iz 15. in 14. stoletja pr.n.št. iz Mezopotamije in zahodne Azije. V zadnjem stoletju pr.n.št. večino proizvodnje stekla steklarski mojstri prenesejo iz Aleksandrije v Rim. Okoli leta 40 pr.n.št. iznajdejo steklarsko pipo in tehniko pihanega stekla, kar zelo razširi proizvodnjo in oblikovanje



Skica 8: Izdelovanje ravnega stekla s tehniko pihanja v kalup

stekla. Sprva se znanje proizvodnje stekla širi po vsem ozemlju rimskega imperija, še v prvem stoletju pa doseže tudi Španijo, Francijo, Nemčijo in Anglijo. S padcem zahodnega rimskega imperija se središče proizvodnje stekla preseli v Konstantinopol, kamor cesar Konstantin pripelje steklarske mojstre iz Rima. Proizvodnja se v tem času hitro razvija in v 5. stoletju je v Konstantinoplu že središče proizvodnje stekla. V naslednjih stoletjih zelo razvijejo izdelavo stekla in okoli leta 795 se pojavijo že obarvana okna, ki bodo kasneje krasila cerkve. Nekje v tem času se začne razvijati tudi mojstrstvo beneškega stekla. Proizvodnja je bila skoncentrirana na otoku Murano in se razcveti v času po križarskih vojnah, ko v Benetke na silo privedejo mojstre iz Konstantinopla. Konec 13. stoletja se že pojavijo prva očala in v začetku 14. stoletja steklena ogledala.

Po padcu Carigrada veliko steklarjev pride v Benetke in proizvodnja se zelo razširi, tako po količini kot po raznovrstnosti. Murano postane prvo

središče proizvodnje in nima konkurence vse do 18. stoletja. V Benetkah so zelo skrbno varovali večino proizvodnje stekla. Mojstrom ni bilo dovoljeno, da bi se odselili in tako svoje znanje prenesli kam drugam. Kljub temu pa so nekateri tudi tvegali svoja življenja na begu v druga evropska mesta, kjer so jim obljubljali visoke nagrade za njihovo znanje. Že konec 16. stoletja se proizvodnja razširi po deželah Evrope. Izdelavo stekla zelo razvijejo na Češkem, iz katere, kot prej iz Benetk, odhajajo mojstri po vsej Evropi.

Poleg izkušenj muranskih mojstrov in kasneje čeških na proizvodnjo stekla vplivajo razne tehnične iznajdbe. Leta 1635 začnejo v Angliji

za kurjenje v steklarskih pečeh uporabljati oglje. Leta 1670 začnejo polirati in matirati steklo s kislinami. V Franciji leta 1688 že vlivajo steklena ogledala. Konec 18. in v začetku 19. stoletja ustanovijo steklarske tovarne povsod po Evropi.

Leta 1870 odkrijejo peč za kontinuirano topljenje stekla, kar omogoči proizvodnjo velikih količin stekla. Konec 19. stoletja smo že priča mehaniziranim postopkom pihanja in vtiskovanja stekla. V obdobju do druge svetovne vojne se zelo razvije mehanizirana proizvodnja votlega in ravnega stekla. Danes je skoraj ves postopek proizvodnje stekla mehaniziran, ki za najrazličnejša področja ustvarja visokokvalitetne proizvode.

## 7. Literatura

1. R. W. Douglas & Susan Frank, *A history of glassmaking*, Oxfordshire 1972
2. Giovanni Serpellon, 1990, *Miniature masterpieces*, Munich–New York
3. *Kovine, zlitine, tehnologije 33*, Sašo Štrum & Breda Mirtič, *Določanje izvora in starosti arheološkega stekla s preiskavo primarnih surovin*, Ljubljana 1999, str. 189–192
4. Roy Newton & Sandra Davison, *Conservation of glass*, Oxford 1989
5. Živan Siridžanski, *Tehnologija stakla*, Beograd 1979
6. Charles Bray, *Dictionary of glass materials and techniques*, London 1995
7. Janet Margaret Cronyn, *The elements of Archaeological Conservation*, London 1990
8. Henry Hodges, *Artefacts*, London 1964
9. Herman Kühn, *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken und Antiquitäten 2*, München 1981