

## 3 SKLO

### 3.1 História skla

### 3.2 Definícia, rozdelenie a vlastnosti skla

#### 3.2.1 Definovanie a rozdelenie skla

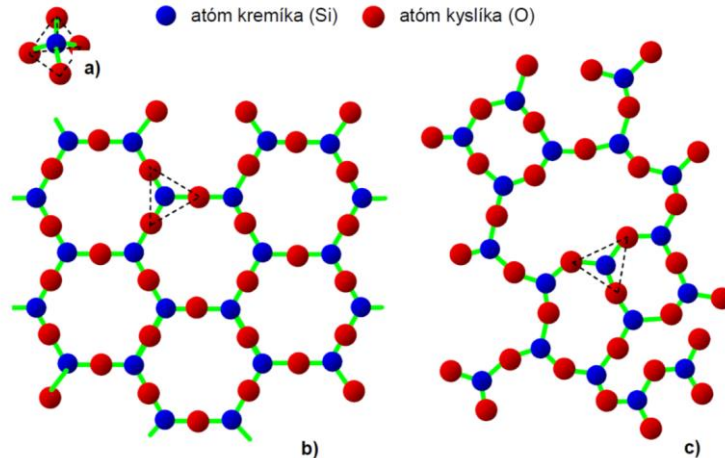
Sklo je anorganický amorfný (nekryštalický) materiál, vyrobený tavením vhodných surovín a následným riadeným ochladzovaním vzniknutej skloviny bez kryštalizácie. Vzniká plynulým prechodom zo stavu kvapalného do stavu pevného; pri ochladzovaní skla dochádza k plynulému rastu viskozity až na tak vysokú hodnotu, že sa materiál navonok javí ako pevná látka. Na rozdiel od kryštalických látok, štruktúra skla je bez pravidelných, symetrických a periodicky usporiadaných základných stavebných jednotiek na dlhšiu vzdialenosť/ bez pravidelného usporiadania atómov na väčšiu vzdialenosť

Sklo sa vyznačuje vysokou priepustnosťou svetla v časti viditeľného spektra. Pri bežných teplotách je tento materiál tuhý a tvrdý, zároveň je však krehký. Je odolný voči poveternostným a chemickým vplyvom, nepriepustný, má vysokú pevnosť v tlaku, relatívne nízku mernú teplotnú a elektrickú vodivosť.

Sklovitú látku možno odlíšiť pomocou dvoch charakteristických znakov:

#### 1. Sklovitá látka nemá pravidelné usporiadanie na dlhú vzdialenosť

Tento poznatok možno demonštrovať na čistom oxide kremičitom ( $\text{SiO}_2$ ) v stave kryštalickom a v stave sklovitom. V oboch stavoch jeho štruktúry je základným opakujúcim sa motívom *tetraéder* (pravidelný štvorsten) tvorený štyrmi atómami kyslíka a jedným atómom kremíka (obr. 1a).



Obr. 1 Štruktúrne usporiadanie  $\text{SiO}_2$

a) tetraéder  $\text{SiO}_4$ , b) kryštalický stav  $\text{SiO}_2$ , c) sklovitý stav  $\text{SiO}_2$

*Kryštalický stav* (obr. 1b) je tvorený štruktúrou, ktorú tvorí pravidelné usporiadanie tetraédrov. Aj usporiadanie jednotlivých druhov atómov možno charakterizovať ako periodicky sa opakujúce na veľké vzdialenosti voči vzdialenosti medzi dvomi najbližšími atómami rovnakého druhu. Preto kryštalický stav látky možno vo všeobecnosti charakterizovať ako pravidelné usporiadanie na dlhú vzdialenosť, ktoré je známe aj ako kryštalická mriežka.

*Sklovitý stav* (obr. 1c) je tvorený nepravidelne sa opakujúcim usporiadaním jednotlivých motívov (tetraédrov). Jednotlivé atómy dodržiujú pravidelné usporiadanie len v rámci motívu (tetraédra). Takéto usporiadanie možno teda charakterizovať ako pravidelné usporiadanie len na krátku vzdialenosť. Z hľadiska popisu štruktúry je toto usporiadanie charakterizované ako sieť.

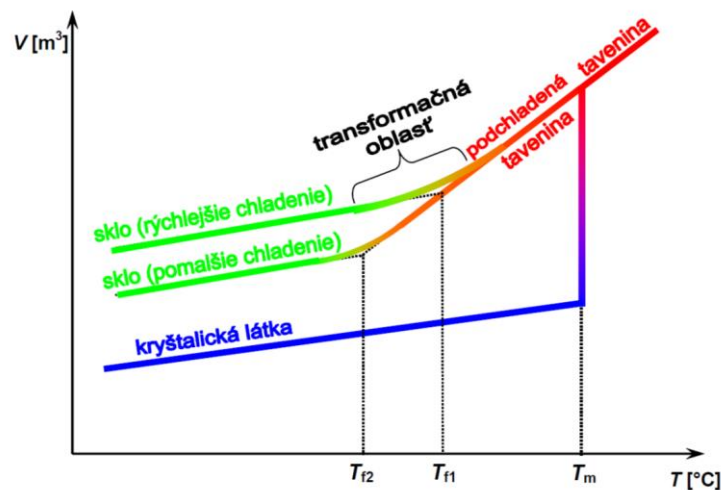
## 2. Sklovitá látka sa vyznačuje charakteristickou transformáciou z kvapalného stavu do sklovitého a naopak

Toto správanie sklovitej látky možno demonštrovať na teplotnej závislosti objemu látky pri jej ochladzovaní z roztaveného stavu (obr. 2).

Ak podmienky ochladzovania látky sú upravené tak, že látka spontánne kryštalizuje, dochádza pri ochladzovaní jej taveniny najprv k postupnému znižovaniu objemu. Pri teplote kryštalizácie  $T_m$  nastáva skoková zmena objemu látky, pričom látka prechádza do kryštalického stavu (má usporiadanie na dlhú vzdialenosť).

Ak sa tavenina látky ochladzuje tak, že pri teplote  $T_m$  nevzniká kryštalická látka, jej objem sa postupne znižuje aj po prekročení teploty kryštalizácie. Pod touto teplotou možno stav látky charakterizovať ako *podchladenú taveninu*. Pri pokračujúcom ochladzovaní rastie viskozita podchladenej kvapaliny. Pri dosiahnutí veľkých hodnôt viskozity ( $\eta > 10^{12}$  Pa·s) v okolí teploty tvorby skla  $T_f$  sa látka začína správať ako tuhá a pružná. Pod touto teplotou je látka už sklom.

Teplotu tvorby skla  $T_f$  nemožno považovať za materiálovú konštantu, pretože jej veľkosť je závislá od podmienok ochladzovania. Pri vyššej rýchlosti ochladzovania látky táto teplota dosahuje vyššie hodnoty.



Obr. 2 Závislosť objemu látky od teploty pri jej ochladzovaní;  
 $T_m$  – teplota kryštalizácie (teplota topenia),  $T_f$  – teplota tvorby skla

Proces transformácie podchladenej taveniny na sklo postupným vzrastom jej viskozity je reverzibilný. To znamená, že zvyšovaním teploty skla dochádza k postupnému poklesu hodnôt viskozity a jeho premena na taveninu. Teplota tejto premeny sa nazýva teplota sklovitého prechodu, teplota sklenia  $T_g$ . ▲

### Výskyt skla v prírode

Sklo sa v prírode v čistej forme nevyskytuje, vyrába sa však z prírodných surovín. V prírode existujú nerasty, ktoré sa mu vonkajším vzhľadom podobajú, napr.

- sopečný *obsidián* – vzniká pri kontakte lávy s chladným prostredím a následnom rýchlom stuhnutí lávy, často sa nachádza vo vulkanických oblastiach, má zloženie porovnateľné so synteticky vyrobeným sklom;
- *tektit* – vzniká stuhnutím roztavených hornín pri náraze meteoritov na zemský povrch;
- *fulgurit* – vzniká zásahom blesku do piesku alebo pôdy s dostatočným množstvom kremičitých častíc;
- *horský krištál* – priehľadná, bezfarebná odroda kremeňa;
- niektoré formy *kremeňa*, ktoré sú pomerne vzácne a v minulosti sa používali hlavne na výrobu šperkov.

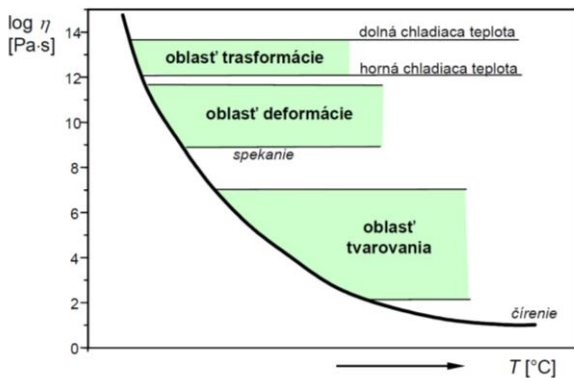
### 3.2.2 Vlastnosti skiel

Pri posudzovaní vhodnosti na výrobu danou technológiou, aplikačných možností a porovnávaní kvality jednotlivých druhov skiel sa zvyčajne hodnotia vybrané vlastnosti, ktoré možno ovplyvniť voľbou východiskových surovín (zložením a ich čistotou), výrobnou technológiou (tavenie, homogenizácia, tvarovanie, chladenie, povrchové úpravy) a pri niektorých výrobkoch aj konštrukčným riešením. Vlastnosti skiel možno rozdeliť do niekoľkých skupín:

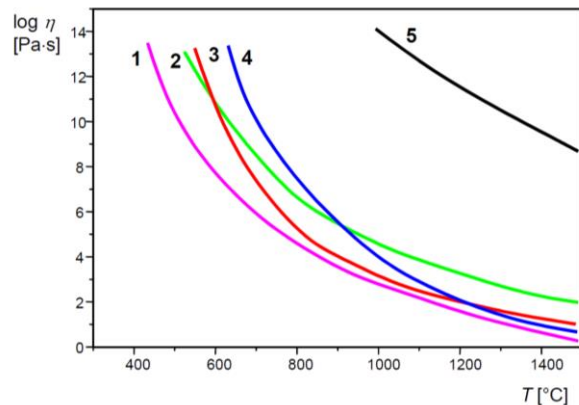
#### a) technologické vlastnosti

- *viskozita* – je mierou tuhosti a plasticity skla. Znižovaním teploty rastie jej hodnota plynulo, pričom sklovina stráca svoj kvapalný charakter až sa stáva tuhým sklom. Určuje rýchlosť dejov pri čírení a homogenizácii skla, jej hodnoty sú určujúce na použitie jednotlivých technologických operácií;

*Viskozita* sa považuje za najdôležitejšiu vlastnosť skla. Určuje najmä veľkosť spracovateľských teplôt pri jednotlivých technologických operáciách (obr. 3). Hoci jednotlivé druhy skiel majú pri rovnakých operáciách rôzne teploty, ich viskozita je prakticky rovnaká (obr. 4), preto kremenné sklo bude mať oproti iným sklám vyššie teploty spracovania.



Obr. 3 Vymedzenie hlavných technologických procesov na viskozitnej krivke skla



Obr. 4 Závislosť viskozity rozličných skiel od teploty; 1 – olovnaté sklo, 2 – boritokremičité sklo, 3 – biele obalové sklo, 4 – E sklo na vlákna, 5 – kremenné sklo

- *povrchové napätie* – je mierou zmáčavosti skloviny. Roztavené sklo sa vyznačuje vysokým povrchovým napätím, ktoré je zvyčajne 3 až 4 krát väčšie ako povrchové napätie vody. Na uľahčenie čírenia (úniku malých bubliniek zo skloviny) je nutné znížiť hodnotu povrchového napätia. Jeho hodnota výrazne ovplyvňuje proces ťahania, prípadne zaobľovania;
- *kryštalizačná schopnosť* – ovplyvňuje všetky technologické procesy v sklárskej výrobe. Je nevyhnutné zabrániť kryštalizácii pri chladnutí skloviny;

#### b) mechanické vlastnosti

- *pevnosť* (v tlaku, ťahu, ohybe) – je mierou schopnosti skla zniesť bez porušenia určité zaťaženie. Jej hodnota je dôležitá najmä pri sklách určených na obaly, stavebné aplikácie a sklené vlákna. Pevnosť skla je možné ovplyvniť zložením, prípadne vytvrdzovaním;
- *tvrdosť* – je mierou schopnosti skla odolávať vníkaniam iných telies do jeho povrchu;
- *krehkosť, húževnatosť* – je mierou energie potrebnej na deštrukciu skleneného výrobku. V prípade skiel je hodnota tejto energie oproti iným materiálom veľmi nízka, pričom je ovplyvniteľná kvalitou povrchu

a obsahom defektov (trhlín, nečistôt) v objeme. Výrazne závisí od rozmerov výrobkov, rýchlosti nárazu a teploty;

- *pružnosť* – je charakterizovaná Youngovým modulom pružnosti E, ktorý vyjadruje vzťah medzi napätím a deformáciou.

#### c) *tepelné vlastnosti*

- *odolnosť proti teplotnému rázu* – vyjadruje schopnosť materiálu odolávať bez porušenia prudkým zmenám teploty veľkého rozsahu. Pri skle, ktoré má pomerne nízke hodnoty tepelnej vodivosti, dochádza k výrazným teplotným rozdielom jednotlivých oblastí. Vplyvom teplotnej rozťažnosti vznikajú medzi oblasťami pnutia, ktoré môžu spôsobiť vznik prasklín. Táto vlastnosť je dôležitá najmä pri chladení skiel väčších rozmerov;
- *tepelná rozťažnosť* – vyjadruje mieru rozmerových zmien pri zmene teploty. Jej hodnota je dôležitá najmä pri návrhoch sklárskych foriem;
- *tepelná vodivosť* – vyjadruje schopnosť látky viesť teplo. Jej hodnoty sú dôležité najmä pri rýchlom tavení sklárskeho kmeňa, pri konštrukčných návrhoch procesov spojených s prenosom tepla, pri tvarovaní a chladení skla;

#### d) *fyzikálne vlastnosti*

- *merná hmotnosť (hustota)* – podiel hmotnosti a objemu (okolo 2 500 kg/m<sup>3</sup>);
- *elektrická konduktivita a rezistivita* – je mierou schopnosti látky viesť elektrický prúd. Dôležitá je u skiel určených pre elektrotechnický priemysel. Jej význam rastie aj pri použití elektricky ohrievaných pecí pri tavení;
- *optické vlastnosti* – pri interakcii žiarenia so sklom môže nastať absorpcia, odraz, polarizácia, lom žiarenia. Tieto javy sú základom analýzy skiel, resp. rôzneho správania vo viditeľnej oblasti spektra – priehľadnosti (číre alebo mliečne sklo), farebnosti/ bezfarebnosti, vzniku zákalu. Pri špeciálnych sklách sa objavujú aj iné fyzikálno-chemické deje uplatňované najmä v optoelektronike a v senzorovej technike;

#### e) *chemické vlastnosti*

- *chemická odolnosť* – predstavuje schopnosť odolávať chemickému pôsobeniu okolitého prostredia. Najčastejšie sa hodnotia vplyvy vody, anorganických kyselín a alkálií. Je dôležitou veličinou skiel určených pre farmaceutický a chemický priemysel;
- *oxidačný stupeň* – sklo je v podstate tuhý roztok tvorený kladnými a zápornými iónmi, pričom niektoré sa môžu nachádzať vo viacerých oxidačných stupňoch. Napríklad chróm sa môže vyskytovať vo forme Cr<sup>3+</sup>, resp. Cr<sup>6+</sup>.

### 3.2.3 Druhy skiel

Pri triedení jednotlivých typov skiel sa používa najmä rozdelenie z hľadiska *chemického zloženia* vyrobeného skla, ktoré v dominantnej miere určuje jeho konečné vlastnosti. Hoci najväčšie zastúpenie majú už tradične sklá na báze oxidu kremičitého SiO<sub>2</sub>, či už bez prímiesí (kremenné sklá), alebo s prímiesami (sodnovápenaté, draselnovápenaté, draselnoolovnaté, hlinitokremičité, borokremičité sklá), v technickej praxi sa používajú sklá s veľmi rôznorodým chemickým zložením (tab. 1). Najväčšiu skupinu tvoria oxidové sklá na báze oxidov kremíka, bóru, fosforu, germánia, telúru, antimónu, ďalej sklá na báze halogenidov, chalkogenidov (zlúčenín S, Se, Te) a kovové sklá.

Tab. 1 Príklady zloženia bežne používaných skiel (hmot. %)

Sklo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	PbO	K <sub>2</sub> O	BaO	Li <sub>2</sub> O
kremenné sklo	99									
vycor *	96				4					
pyrex *	81	2		4	12					
sklo pohárov	74	1	5	15		4				
okenné sklo	72	1	10	14		2				
plavené sklo	73	1	13	13						
sklo žiaroviek	74	1	5	16		4				
sklené vlákna	54	14	16		10	4				
sklo teplomeru	73	16		10	10					
olovnaté sklo	67			6			17	10		
sklený obklad	50			1			19	8	13	
optický prieszor	70			8		10		8	2	
vlákna E sklo	55	15	20		10					
vlákna C sklo	65		14	9						5
vlákna S sklo	65	25				10				

\* vycor – sklo určené pre vysokoteplotné aplikácie (má extrémne nízky koeficient tepelnej rozťažnosti); pyrex – sklo používané pre kuchynské potreby a laboratórne sklo

### Druhy skla podľa chemického zloženia

*Kremenné sklo* sa vyrába z čistého oxidu kremičitého SiO<sub>2</sub> (kremeň). Oproti bežným sklám má niektoré vlastnosti odlišné. Neabsorbuje ultrafialové žiarenie, má veľmi vysokú teplotu tavenia (okolo 1 650 °C), je tvrdé, chemicky a tepelne odolné, odolné voči poškrabaniu, opticky čisté (neobsahuje prímеси), neskresľuje vlnovú dĺžku prechádzajúceho svetla (farebná chyba). Preto sa používa napr. pre banky halogénových žiaroviek, ktoré pracujú pri vysokých teplotách, banky ultrafialových výbojok a žiaroviek, krycie sklá tepelných spotrebičov, hodínok a pod. Kvôli vysokej teplote tavenia je jeho výroba energeticky náročnejšia a drahšia ako pri bežnom skle. Kremenné sklo sa dá vyrobiť natoľko čisté, že stovky kilometrov skla sú transparentné pre infračervené vlnové dĺžky svetla, čo sa využíva v optických vláknach. Kremenné sklo sa používa tiež v optike na výrobu šošoviek a zrkadiel.

*Sodno-vápenaté sklo* obsahuje 71-75 % oxidu kremičitého (SiO<sub>2</sub>), 12-16 % oxidu sodného (Na<sub>2</sub>O), 10-15 % oxidu vápenatého (CaO) a malé množstvo ďalších zložiek určených k ovplyvneniu špecifických vlastností skla. V niektorých sklách je časť oxidu vápenatého alebo sodného nahradená oxidom horečnatým (MgO) alebo draselným (K<sub>2</sub>O). Používa sa na výrobu fliaš, pohárov, bežného stolového skla a na výrobu plochého skla a okenných tabúl. Sodnovápenaté sklo je priehľadné, má vysokú teplotnú rozťažnosť a odoláva teplote len do 500-600 °C. Prepúšťa UVA žiarenie (340-400 nm), ale neprepúšťa UVB a UVC žiarenie (< 315 nm), preto cez toto sklo slnečné žiarenie neopáľuje.

*Boro-kremičité sklo* (napr. pyrex) obsahuje 70-80 % oxidu kremičitého (SiO<sub>2</sub>), 10-12% oxidu boritého (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 4-8 % oxidu sodného (Na<sub>2</sub>O) alebo oxidu draselného (K<sub>2</sub>O) a 2-7 % oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Tieto sklá majú vysokú chemickú odolnosť a odolnosť voči teplotným zmenám (majú nízku teplotnú rozťažnosť). Ich použitie zahŕňa komponenty pre chemické procesy, laboratórne zariadenia, farmaceutické obaly, svietidlá, varné sklo, kuchynské nádoby a okienka na sporáky, tiež sa používajú na výrobu skleného vlákna.

*Olovnaté sklo* (olovnatý krištál) obsahuje 54-65 % oxidu kremičitého (SiO<sub>2</sub>), 15-25 % oxidu olovnatého (PbO), 10-15 % oxidu sodného (Na<sub>2</sub>O) alebo oxidu draselného (K<sub>2</sub>O) a rôzne ďalšie prímеси.

Typickými výrobkami sú kvalitné nápojové sklo, karafy, misy, dekorované a brúsené sklo. Oxid olovnatý je možné čiastočne alebo úplne nahradiť oxidom barnatým, zinočnatým alebo sodným, z čoho vznikne sklo známe ako krištáľové.

*Hlinito-kremičité sklo* má vysokú pevnosť a používa sa do sklolaminátov a na banky halogenových žiaroviek.

*Špeciálne sklo* zahŕňa rozmanité druhy skiel určených pre špecializované výrobky vyrábané v menšom objeme. Ich zloženie sa výrazne mení podľa požadovaných vlastností konečného výrobku. Používa sa ako optické sklá, sklá pre elektrotechniku, obrazovky, pájkové sklo, sintrované sklo, elektródy, sklokeramika atď.

### Druhy skla podľa použitia

Sklo sa najčastejšie rozdeľuje podľa chemického zloženia alebo podľa použitia. Podľa tohto kritéria možno sklá rozdeliť na:

- *obalové sklo* – fľaše, demižóny, konzervové sklo, obaly pre farmáciu a parfumériu; v rámci EÚ predstavuje až 60% výroby skla;
- *ploché (tabuľové) sklo* – aplikácie predovšetkým v stavebníctve a v automobilovom priemysle, napr. obklady budov, sklenené výplne okien, dverí, nábytku, obrazov, skleníkov, zrkadlá a pod.; predstavuje asi 36% všetkého vyrobeného skla (z toho 40% podiel je určený pre automobilový priemysel, zvyšok tvorí predovšetkým stavebníctvo);
- *úžitkové sklo* – poháre, sklenené nádoby, nápojové sklo, dekoratívne sklo od bežného využitia až po umelecké sklo;
- *technické a laboratórne sklo* – sklenené výrobky pre chemický a potravinársky priemysel a zdravotníctvo;
- *optické sklo* – lupy, astronomické a fotografické objektívy;
- *sklené vlákno* – optické vlákna určené na prenos dát, výstuže kompozitov s plastovou maticou.

## 3.3 Základné sklárske suroviny

Sklárske suroviny potrebné na výrobu skla možno hodnotiť z hľadiska chemického zloženia, prítomnosti nežiaducich prímies, granulometrického zloženia, ceny a dostupnosti. Najčastejšie sa suroviny zatriedujú podľa obsahu látky, zvyčajne oxidu, ktorá výrazne ovplyvňuje usporiadanie siete skla. Podľa tohto kritéria možno sklárske suroviny rozdeliť na *hlavné* a *pomocné sklárske suroviny*.

### 3.3.1 Hlavné sklárske suroviny

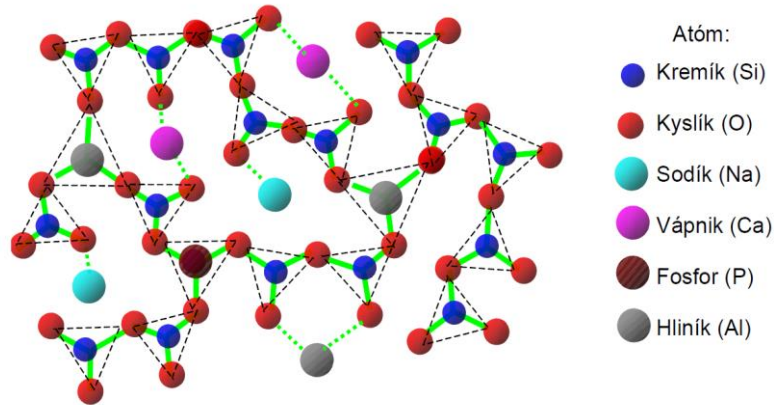
*Hlavné sklárske suroviny* obsahujú látky podieľajúce sa na tvorbe siete skla. Rozdiely medzi jednotlivými typmi hlavných sklárskych surovín sú vysvetlené na kremičitých druhoch skiel (obr. 5). Základnou stavebnou jednotkou siete týchto skiel je tetraéder  $\text{SiO}_4$ . V jednozložkových sklách tvoria uvedené tetraédre súvislú priestorovú sieť. Vo viaczložkových sklách po pridaní ďalšieho oxidu môže tento v priestorovej sieti zaujať dve pozície:

- a) zachová základnú priestorovú sieť, pričom vytvorí vlastný tetraéder, tzv. *sieťotvorný oxid*;
- b) preruší priestorovú sieť medzi tetraédrami, tzv. *modifikátor*.

Podľa toho je možné rozdeliť hlavné sklárske suroviny na:

- *sieťotvorné oxidy* – oxidy, ktoré zachovávajú základnú priestorovú sieť, pričom vytvoria vlastný tetraéder (napr. kremík čiastočne nahradený fosforom);
- *nepremosťujúce modifikátory* – oxidy, ktoré prerušia priestorovú sieť medzi tetraédrami a pri roztrhaní dochádza k vzniku nepremosťujúcej väzby (napr. Si-O-Na; Si-O-K); roztrhanie pôvodných väzieb má za následok zníženie pevnosti, taviacej teploty a zhoršenie chemickej odolnosti;

- *premostujúce modifikátory* – oxidy, ktoré prerušia priestorovú sieť medzi tetraédrami, avšak pri roztrhaní dochádza k vzniku premostujúcej väzby (napr. Si-O-Ca-O-Si; Si-O-Pb-O-Si); premostujúca väzba má za následok zlepšenie chemickej odolnosti, pevnosti a zvyčajne aj zníženie elektrickej vodivosti;
- *intermediárne oxidy* – môžu sa v závislosti od rôznych faktorov správať buď ako modifikátory alebo ako sieťotvorné oxidy (napr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).



Obr. 5 Štruktúrne usporiadanie viaczložkového kremičitého skla

### Suroviny obsahujúce sieťotvorné látky

*Oxid kremičitý* ( $\text{SiO}_2$ ) je základnou zložkou väčšiny skiel. Výrazne ovplyvňuje tavenie aj následné spracovanie skiel. Zvyšuje tvrdosť skiel, pevnosť, pružnosť, odolnosť voči teplotným rázom, viskozitu, povrchové napätie, taviacu teplotu aj teplotu spracovania (zhoršuje tavitelnosť a tvarovateľnosť), chemickú odolnosť, elektrický odpor. Znižuje teplotnú rozťažnosť, hustotu skiel a odolnosť skla voči kryštalizácii. Do skla sa vnáša vo forme sklárskeho piesku, kremeňom, horninovými surovinami a vo forme chemických zlúčenín.

*Oxid boritý* ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) zlepšuje úžitkové vlastnosti, najmä chemickú a mechanickú odolnosť, elektroizolačné a optické vlastnosti, pričom výrazne nezhoršuje tavitelnosť a tvarovateľnosť. Jeho množstvo v sklovine zvyčajne neprekračuje 15 %.

*Oxid fosforečný* ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) sa používa na špeciálne sklá, ktorým dodáva odolnosť voči kyseline fluorovodíkovej (HF). Zvyšuje priepustnosť žiarenia v ultrafialovej oblasti spektra a tepelnú absorpciu skiel.

*Oxid germaničitý* ( $\text{GeO}_2$ ) ovplyvňuje najmä optické vlastnosti skiel. Používa sa na výrobu špeciálnych optických skiel.

### Suroviny obsahujúce nepremostujúce modifikátory

*Oxid sodný* ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) má silný taviaci účinok (znižuje teploty tavenia aj spracovania), znižuje chemickú odolnosť, mechanické vlastnosti, tepelnú odolnosť. Zvyšuje elektrickú vodivosť a teplotnú rozťažnosť. Do skla sa vnáša pomocou rôznych chemických zlúčenín, najmä uhličitan sodný – sóda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Síran sodný ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), chlorid sodný ( $\text{NaCl}$ ) a dusičnan sodný ( $\text{NaNO}_3$ ) sa používajú aj na urýchlenie tavenia ako číridlo.

*Oxid draselný* ( $\text{K}_2\text{O}$ ) je významné tavivo ušľachtilejších skiel (olovnatých, chemicky odolných a krištáľových). Má nižší taviaci účinok a menej zhoršuje elektrické vlastnosti ako oxid sodný ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Do skla sa vnáša ako uhličitan draselný – potaš ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) a dusičnan draselný ( $\text{KNO}_3$ ), ktorý sa používa aj ako číridlo a oxidovadlo.

*Oxid lítový* ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) v porovnaní s oxidom sodným a draselným menej zhoršuje chemickú odolnosť, výraznejšie znižuje taviacu teplotu. Do skla sa vnáša ako uhličitan lítový ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ).

### Suroviny obsahujúce premost'ujúce modifikátory

*Oxid vápenatý* (CaO) je najdôležitejší a najpoužívanejší premost'ujúci modifikátor. Jeho prítomnosť v sklách zvyšuje ich chemickú odolnosť a stálosť, lesk, sklon ku kryštalizácii, chladiacu teplotu výrobkov. Veľmi často sa kombinuje s oxidom horečnatým (MgO). Do skla sa vnáša najmä ako vápenec – uhličitan vápenatý (CaCO<sub>3</sub>).

*Oxid horečnatý* (MgO) znižuje hustotu, teplotnú rozťažnosť, zlepšuje tvarovateľnosť. Do skla sa vnáša v podobe dolomitu – uhličitanu horečnatovápenatého (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>), magnezitu – uhličitanu horečnatého (MgCO<sub>3</sub>) a oxidu horečnatého (MgO).

*Oxid olovnatý* (PbO) zlepšuje optické vlastnosti, elektroizolačné vlastnosti, chemickú odolnosť a hustotu. Znižuje taviacu teplotu a teplotu tvarovania. Do skla sa vnáša ako oxid olovnato-olovitý (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) a dusičnan olovnatý (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Zlúčeniny olova sú jedovaté.

*Oxid bárnatý* (BaO) zlepšuje tavitelnosť a číritelnosť, zvyšuje hustotu, zlepšuje tvarovateľnosť. Výrazne ovplyvňuje optické vlastnosti skiel (zvyšuje index lomu, znižuje disperziu žiarenia, zlepšuje farbiacu schopnosť farbív). Čiastočne môže nahradiť oxid olovnatý (PbO), pretože je lacnejší. Do skiel sa vnáša ako uhličitan bárnatý (BaCO<sub>3</sub>), síran bárnatý (BaSO<sub>4</sub>) a dusičnan bárnatý (Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Síran a dusičnan sa používajú ako číridlá.

### Suroviny obsahujúce intermediárne látky

*Oxid hlinitý* (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sa používa do technických, plochých, chemicky odolných a obalových skiel. Zvyšuje povrchové napätie, viskozitu, chemickú odolnosť, mechanickú pevnosť, odolnosť voči teplotným nárazom a kryštalizácii. Znižuje teplotnú rozťažnosť. Do skiel sa vnáša ako sprievodná časť niektorých sklárskych surovín. Zámerne sa vnáša najmä horninami na báze hlinitokremičitanov (živec, kaolín), prípadne synteticky ako hydroxid hlinitý (Al(OH)<sub>3</sub>).

### 3.3.2 Pomocné sklárske suroviny

**Pomocné sklárske suroviny** sa pridávajú do skla zvyčajne v malých množstvách; výrazne neovplyvňujú základné vlastnosti skiel, ovplyvňujú najmä technologické vlastnosti a prostredie pri príprave skiel. Pomocné suroviny možno rozdeliť na:

- *farbivá a odfarbovateľná;*
- *číridlá;*
- *kalivá;*
- *oxidovateľná a redukovateľná;*
- *chemické urýchľovače;*
- *sklárske črepy;*

**Farbiace suroviny a odfarbovateľná** ovplyvňujú v dominantnej miere najmä optické vlastnosti. Princíp farbenia je založený na vnášaní iónov, resp. atómov vybraných prvkov, ktoré sa rozpúšťajú v objeme skiel, napr. Co<sup>2+</sup> (modrofialové), Ni<sup>2+</sup> (Na-skla fialové; K-skla hnedožlté), Cr<sup>3+</sup> (zelené), (CrO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> (žlté), Mn<sup>3+</sup> (fialové), Cu<sup>2+</sup> (modré), Er<sup>3+</sup> (červené), CdS (žlté), CdSe (červené). Pri atómoch s možným výskytom v rôznych oxidačných stupňoch závisí zafarbenie od oxidačného stupňa, napr. Fe<sup>2+</sup> (zelené) a Fe<sup>3+</sup> (hnedé).

Odfarbenie skla možno uskutočniť chemicky, t.j. zmenou oxidačného stupňa prímеси na menej intenzívne zafarbojúci, napr. Fe<sup>3+</sup> 10- až 15-krát menej zafarbuje sklo ako Fe<sup>2+</sup>. Pri fyzikálnom odfarbovaní sa pridávajú do sklárskeho kmeňa suroviny, ktoré vytvárajú komplementárnu farbu k farbe skla, čím vzniká neutrálna sivá farba skla, ktorú ľudské oko ťažko postrehne. Na fyzikálne odfarbovanie sa najčastejšie používajú zlúčeniny selénu, niklu a kobaltu.



**Číridlá** sú látky na regulovanie a urýchlenie číriaceho a homogenizačného procesu. Čírenie (zbavenie skloviny viditeľných bublín) a homogenizácia sa môže uskutočniť aj samovoľne, avšak za neúmerne dlhší čas. Pri teplote čírenia tieto látky reagujú za vzniku plynov, alebo prchajú, pričom podľa chemických vlastností sa rozoznávajú oxidačné, neutrálne a redukčné číridlá.

Medzi oxidačné číridlá (látky uvoľňujúce kyslík) možno zaradiť síran sodný, bárnatý a vápenatý, prípadne kombinácie dusičnanov s oxidom azenitým ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), resp. antimonitým ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ). Redukčné číridlá (látky, ktoré viažu kyslík v sklovine) majú oproti oxidačným číridlám nižší účinok. K redukčným číridlám patrí uhlie, grafit, mletý koks, karbid kremíka ( $\text{SiC}$ ) a kovový kremík. Neutrálne číridlá nemenia chemický charakter prostredia pri čírení. Medzi neutrálne číridlá patria zlúčeniny fluóru, chloridy a amónne soli.

**Kaliace suroviny** majú veľký význam pri sklách osvetľovacích telies, kde sa využíva rozptyl žiarenia. Zakalené sklá môžu byť biele, ako aj rôzne sfarbené. Zákal sa tvorí vtedy, keď v základnom skle sú rozptýlené čiastočky s dostatočnou veľkosťou a iným indexom lomu.

Podľa charakteru zakaľujúcich čiastočiek sa zákaly rozdeľujú na kryštalické, emulzné, spôsobené vylúčením fázy v tvare kvapiek a plynové, ktoré tvoria bubliny plynu v skle. Ako príklad možno uviesť použitie oxidu arzenitého ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) v olovnatých sklách. Podstatu tohto zákalu tvoria kryštáliky  $\text{PbO}_3(\text{AsO}_4)_2$ .

**Chemickým urýchľovačom** možno nazvať každú chemickú zlúčeninu, ktorá v malom množstve po pridaní do sklárskeho kmeňa urýchli aspoň jednu fázu tavenia (tavenie sklárskeho kmeňa, čírenie a homogenizáciu skloviny). Chemické urýchľovače rozrušujú povrch najhoršie taviteľných zložiek sklárskeho kmeňa, znižujú povrchové napätie medzi sklárskymi surovinami a sklovinou, znižujú viskozitu skloviny, zlepšujú a urýchľujú čírenie skloviny a zvyšujú tepelnú vodivosť. Najčastejšie sa používajú fluoridy, chloridy, amónne soli, zlúčeniny bóru, jodidy, sírany a pod.

Medzi najvýznamnejšie chemické urýchľovače patria fluorid vápenatý ( $\text{CaF}_2$ ) a fluorokremičitan sodný ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ). Fluór urýchľuje proces tvorby skloviny, znižuje viskozitu a povrchové napätie skloviny, čo urýchľuje homogenizáciu a čírenie skloviny.

Pri boritých sklách a pri elektricky tavených sklách sa ako chemický urýchľovač používa chlorid sodný ( $\text{NaCl}$ ), ktorého účinok sa prejavuje najmä pri tvorbe taveniny. Teplota tvorby skloviny je až o  $200\text{ }^\circ\text{C}$  nižšia ako pri kmeni bez  $\text{NaCl}$ .

**Sklárske črepy** sú tvorené technologickým odpadom pri výrobe skla. Môžu byť rôznej veľkosti z vlastných zdrojov alebo z iných výrobní. Pre ich aplikáciu je dôležitá ich čistota a konštantnosť chemického zloženia. Pred použitím sa upravujú triedením, umývaním, drvením a magnetickou separáciou.

Sklenené črepy sa používajú na tavenie všetkých druhov a farieb skla. Podiel črepor pri tavení skla sa pohybuje od 0 až do 80 %, čo závisí od druhu taveného skla, jeho farby a predovšetkým technologickéj čistoty črepor. Optimálne množstvo črepor na tavenie skloviny je 30 až 40 %.

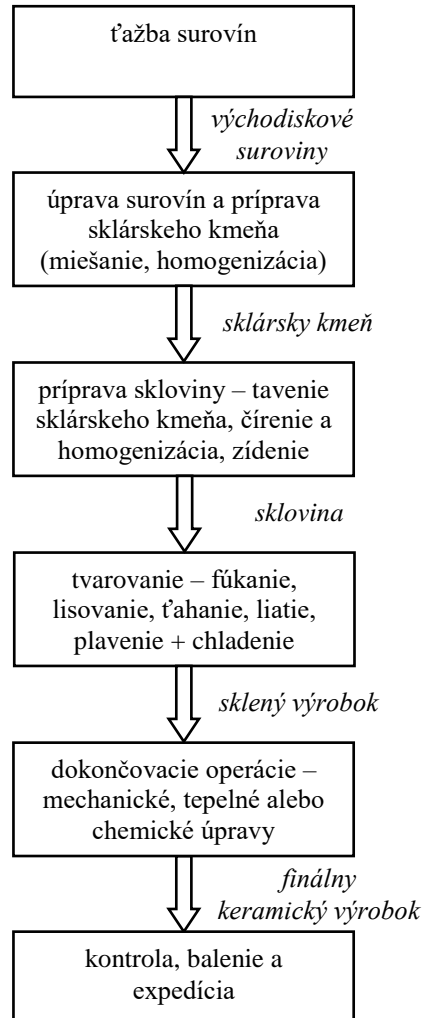
### 3.4 Príprava skla a sklárskych výrobkov

**Technologický postup pri klasickej výrobe skla** možno zhrnúť do niekoľkých charakteristických etáp, ktoré sa prakticky opakujú pri rôznych druhoch sklárskych produktov. Prvá etapa predstavuje obstaranie východiskových surovín a je zvyčajne určovaná požiadavkami na cenu, kvalitu, dostupnosť a množstvo suroviny. Východiskové suroviny na ďalšie technologické spracovanie (sklárske kmeň) treba pripraviť v správnom hmotnostnom pomere a forme. Nasleduje príprava roztavenej skloviny v rôznych druhoch sklárskych pecí, jej tvarovanie (napr. lisovaním, valcovaním, plavením, fúkaním) a chladenie. Vzniknuté sklárske produkty možno ešte prípadne mechanicky opracovať brúsením, leštením. Na koniec technologického postupu je zvyčajne zaradená kontrola, balenie a expedícia.

Konvenčná technológia prípravy skla a sklárskych výrobkov teda pozostáva z nasledujúcich etáp (obr. 6):

1. **úprava surovín a príprava sklárskeho kmeňa**, ktorá zahŕňa miešanie a homogenizáciu, spekanie, granulovanie, mletie, vlhčenie => sklársky kmeň;
2. **tavenie**, pozostávajúce z tavenia sklárskeho kmeňa, čírenia a homogenizácie, zídienia => sklovina;

3. **tvárovanie**, t.j. fúkanie, lisovanie, ťahanie, liatie, plavenie **a chladenie** => sklený výrobok;
4. **dokončovacie operácie**, ktoré zahŕňajú mechanické úpravy (brúsenie a leštenie, rytie a pieskovanie), tepelné úpravy (leštenie ohňom, mramorovanie) alebo chemické úpravy (leptanie, maľovanie, glazúrovanie a pokovovanie) => finálny sklený výrobok.



Obr. 6 Schematické znázornenie jednotlivých etáp klasickej sklárskej výroby

### 3.4.1 Úprava sklárskych surovín a príprava sklárskeho kmeňa

Sklársky kmeň je zmes sypkých až zrnitých sklárskych surovín, pripravená v predpísanom hmotnostnom pomere, dôkladne premiešaná a zhomogenizovaná. Jeho príprava popri *miešaní* a *homogenizácii* východiskových surovín zahŕňa aj operácie na zvýšenie rýchlosti a účinnosti následného tavenia. Medzi spôsoby úpravy sklárskeho kmeňa možno zaradiť:

- *spekánie* – proces natavovania kmeňa mimo sklárskej pece, čo má význam najmä v prípade dostupnosti odpadového tepla;
- *granulovanie* – zabezpečuje lepší styk medzi jednotlivými zložkami kmeňa, čím sa zvyšuje najmä jeho tepelná vodivosť a rýchlosť tavenia lepším vzájomným kontaktom jednotlivých zložiek kmeňa;
- *mletie* – niekoľkonásobne zvyšuje povrch surovín, čím urýchľuje tavenie najmä ťažkotaviteľných zložiek kmeňa, nevýhodou je zvýšenie prašnosti a vyššia finančná náročnosť;

- *vlhčenie* – podporuje naleptanie ťažkotaviteľných zložiek ( $\text{SiO}_2$ ) alkalickou súčasťou kmeňa (KOH, NaOH), čím sa súčasne znižuje prašnosť kmeňa.

### 3.4.2 Tavenie

Tavenie je najdôležitejšou časťou technologického procesu. Chyby vzniknuté pri tavení skla sa zvyčajne nedajú odstrániť následnými technologickými operáciami. Tavením vzniká sklovina, ktorá sa ďalej spracúva v nasledujúcich častiach technologického procesu.

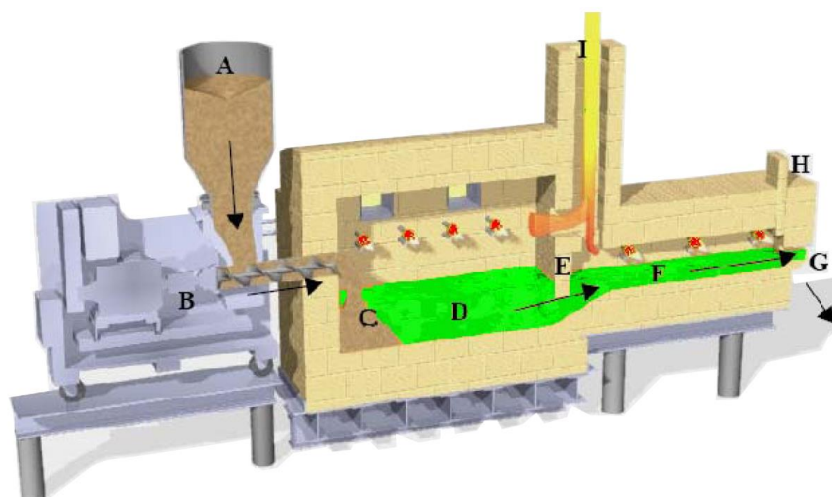
Proces tavenia tvoria tri štádiá:

- *tavenie sklárskeho kmeňa* – počas tohto štádia sa uskutočňujú chemické reakcie medzi zložkami sklárskeho kmeňa a vzniká sklovina. Vzniknutá sklovina je nehomogénna, obsahuje veľké množstvo bublín;
- *čistenie a homogenizácia* – odstraňovanie bublín a vyrovnávanie chemického zloženia skloviny. Základnou podmienkou je nízka viskozita (vysoká teplota skloviny), ktorá podporuje prúdenie skloviny a rýchlosť odchádzajúcich bublín. Účinok možno zvýšiť aj použitím prídavku číriacich látok, resp. prebublávania (fúkania) skloviny;
- *zídanie* – ochladenie skloviny na teplotu potrebnú na ďalšie spracovanie. V tomto štádiu sa sklovina zbavuje zvyšných bublín a homogenizuje sa, pretože znižovaním jej teploty stúpa rozpustnosť plynov v sklovine;

Tavenie je pomerne zložitý chemický proces charakterizovaný množstvom prebiehajúcich chemických reakcií najmä v závislosti od aktuálnej teploty. Popri tavení sa niektoré zložky sklárskeho kmeňa vyparujú (napr. voda); iné sa rozkladajú.

Náklady na tavenie majú zvyčajne značný podiel na celkových nákladoch na výrobu sklárskych výrobkov. Z tohto dôvodu je výrazná snaha proces tavenia urýchliť nielen prídavkom pomocných látok (urýchľovačom), ale aj maximálnym využitím celého radu iných opatrení. Vo všeobecnosti možno tavenie urýchliť zvyšovaním taviacich teplôt, správnou voľbou sklárskych surovín, úpravou sklárskych surovín, použitím príhrevu, použitím mechanického miešania skloviny, použitím nových konštrukcií taviacich agregátov a pod.

Proces tavenia v sklárskej peci je znázornený na obr. 7.



Obr. 7 Tavenie v sklárskej peci

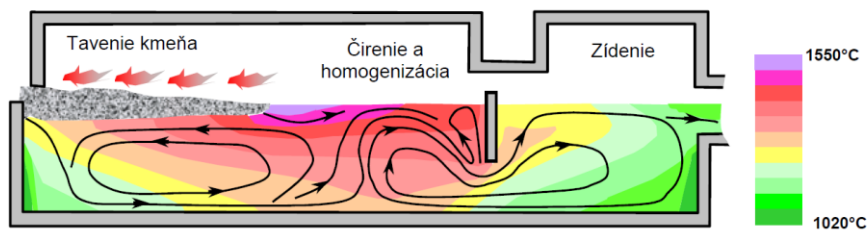
- A – zásobník sklárskeho kmeňa, B – zakladač, C – oblasť tavenia sklárskeho kmeňa,  
 D – oblasť čistenia a homogenizácie, E – prepážka medzi teplejšou a studenšou zónou, F – oblasť zídania skla,  
 G – výtok skloviny, H – regulačná prepážka, I – odvod spalín

Pre tavenie sa najčastejšie používajú *panvové* alebo *kontinuálne pece*.

Pri tavení v *panvových peciach* nasledujú jednotlivé etapy za sebou. Tavenie začína vyhriatím pece na požadovanú teplotu a opakovaným nakladaním sklárskeho kmeňa do panvy. Po naložení nasleduje tavenie sklárskeho kmeňa. Nasledujúcim fúkaním sa sklovina intenzívne premiešava – homogenizuje vzostupom bublín. Po fúkaní sa sklovina nechá ustátiť. Poslednou etapou je zidenie, pri ktorom sklovina riadeným poklesom jej teploty získava požadovanú viskozitu na ďalšie spracovanie. Tento postup umožňuje prípravu viacerých druhov skloviny vo viacerých panvách, zvyčajne v menšom množstve, je však ekonomicky menej efektívny.

Podobný postup tavenia je pri tavení v *dených vaniach*. V porovnaní s tavením v panvových peciach je výhodou, že v dennej vani sa taví len jeden druh skloviny.

Pri tavení v *kontinuálnych peciach* prebieha tavenie nepretržite. Kontinuálne pece sa skladajú z dvoch častí – taviacej a pracovnej, všetky štádiá tavenia prebiehajú naraz v rôznych častiach pece (obr. 8). Sklársky kmeň je rovnomerne dopĺňaný pomocou zakladača a pri tavení vplyvom prúdov postupuje k zóne čírenia a homogenizácie. Vplyvom nárastu teploty pri pohybe, teda poklesom viskozity, rastie aj účinnosť čírenia a homogenizácie skloviny. Na dosiahnutie požadovanej viskozity pre následné spracovanie sa sklovina v poslednej zóne postupne pri pohybe ochladzuje na pracovnú teplotu.



Obr. 8 Princíp tavenia v kontinuálnej peci

Hoci sa sklárska technológia v oblasti tavenia principiálne nemení, je možné sa stretnúť aj s inými konštrukciami sklárskych pecí, ktoré svojimi vlastnosťami zlepšujú najmä kvalitu pripravovanej skloviny.

Vysokú tepelnú efektívnosť majú *rúrové rotačné pece*. Vyznačujú sa dobrým čírením aj homogenizáciou skloviny. Najlepšie odovzdávanie tepla majú *fluidizačné pece*, ktoré taví sklársky kmeň v plynnom víre. Chemicky málo ovplyvňovanú sklovinu možno získať pomocou *elektricky vyhrievaných pecí* (odporovo alebo indukčne).

### 3.4.3 Tvarovanie a chladenie

Sklovina sa ďalej spracováva rôznymi spôsobmi tvárnenia, ktoré závisia od konkrétneho druhu vyrábaného sklárskeho výrobku (ploché sklo, obalové sklo a pod.). Najčastejšie spôsoby tvarovania skla sú:

- *fúkanie* – robí sa pomocou sklárskej píšťaly;
- *ťahanie* – pás skla sa vtiahne medzi valce, vytiahnuté sklo sa ochladí a rozreže; ťahaním sa vyrába tabuľové sklo, tyče, rúry;
- *liatie* – sklovina sa leje na hladkú liatinovú platňu a prevalcuje sa liatinovým vyhrievaným valcom;
- *plavenie* – sklovina sa leje na roztavený cín; liatím a plavením sa vyrába ploché, tabuľové sklo, zrkadlové sklo, sklo s drôtenou vložkou, ornamentálne sklo;
- *lisovanie* – robí sa v ručných alebo v automatických lisoch v ocelových tvárniciach; sklovina natečie do tvárnice, potrebná časť sa odstrihne, tvárnica sa zasunie do lisu, vsunie sa do nej jadro a sklovina sa tak vylisuje;
- *napeňovanie* – výroba penového skla z nízkotavitelnej skloviny, ktorá sa napeňuje vo formách vhodnými speňovadlami.

## Fúkanie skla

Sklárska píšťala je kovová (ocel'ová alebo mosadzná) rúrka, dlhá asi 1,5 m. Na jednom jej konci je drevené držadlo s mosadzným náustkom a na druhom konci je rozšírená kužeľovitá hlavica z ocele. Sklár si na píšťalu naberie z pece trochu skloviny a opatrne do nej fúka. Sklo sa vydúva do bubliny a z nej sa pomocou rôznych nástrojov a foriem vytvaruje fľaša, pohár, váza, tienidlo na svietidlo a pod. Niektoré výrobky sa vyfukujú voľne, iné pomocou tvárnic a iného náradia. Tvárnice sú z bukového alebo hruškového dreva alebo liatiny. Vyfúknutá nádoba sa odklepne z píšťaly a dá sa do chladiacej pece. Po ochladení sa obrúsia ostré hrany alebo sa otavia. (?)

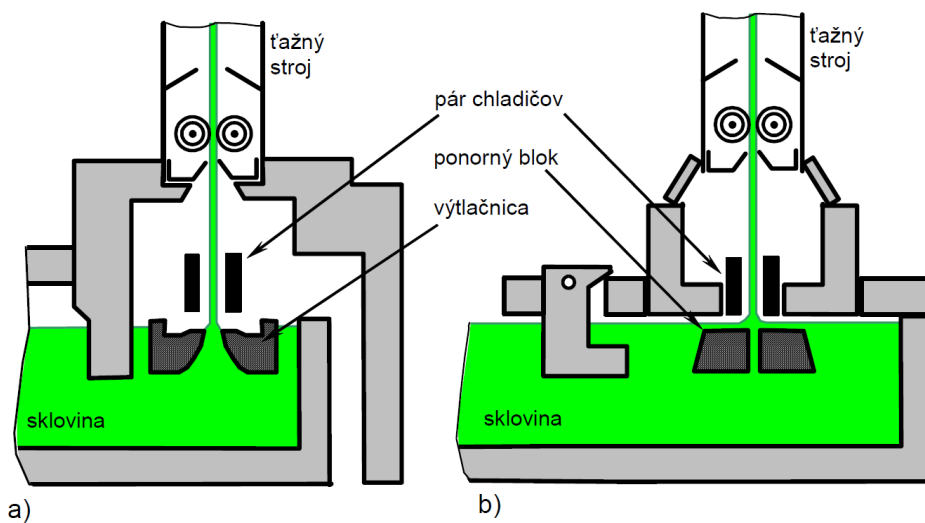
## Výroba plochého skla

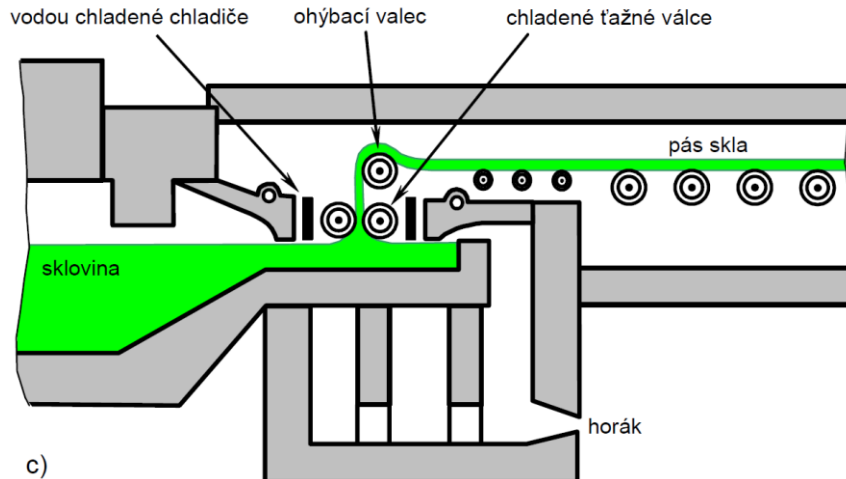
Ploché sklo patrí medzi široko zastúpený produkt obklopujúci naše okolie. Princípiálne možno technológiu výroby rozdeliť na prípravu:

- ťahaním;
- liatím a valcovaním;
- plavením.

Princíp výroby **ťaháním** je v podstate jednoduchý. Pri ponorení naberačej kovovej mreže do skloviny s vhodnou viskozitou a jej ťahaní unáša táto so sebou pás skla. Na prekonanie povrchových síl (zabránenie zužovania a následného pretrhnutia pásu skla) sa využíva prirodzená zmáčavosť šamotu sklovinou. Používa sa šamotová výtláčnica alebo ponorný blok. Plynulé zásobovanie výtláčnice (obr. 9a) sa dosahuje pomocou hydrostatického tlaku, pretože ústie jej štrbiny je nižšie ako hladina okolitej skloviny. Pri použití tohto spôsobu je výrobný postup prerušovaný z dôvodu obnovy nástrojov (výmena výtláčnice) a je veľmi náročný na reguláciu hladiny a teploty skloviny. Umožňuje výrobu skla s hrúbkou 0,5 až 14 mm. Podobný postup je pri použití ponorného bloku (obr. 9b), ktorý je úplne ponorený do skloviny. Ponorný blok pôsobí ako regulátor teploty a ovplyvňuje aj prúdenie skloviny. Dôležitú úlohu v oboch prípadoch majú aj vodné chladiče, ktorých úlohou je zníženie voľnej hladiny skloviny a spodnej časti skleneného pásu skla absorpciou žiarenia.

Ďalší spôsob je tvorený krátkou ťažnou komorou s ohýbacím valcom (obr. 9c). Sklovina sa vyťahuje pomocou dvoch vodou chladených ťažných valcov, pričom sa následne ohýba do vodorovného smeru pomocou ohýbacieho valca. Tento výrobný postup je plynulý a umožňuje výrobu skla s hrúbkou 0,5 až 30 mm.

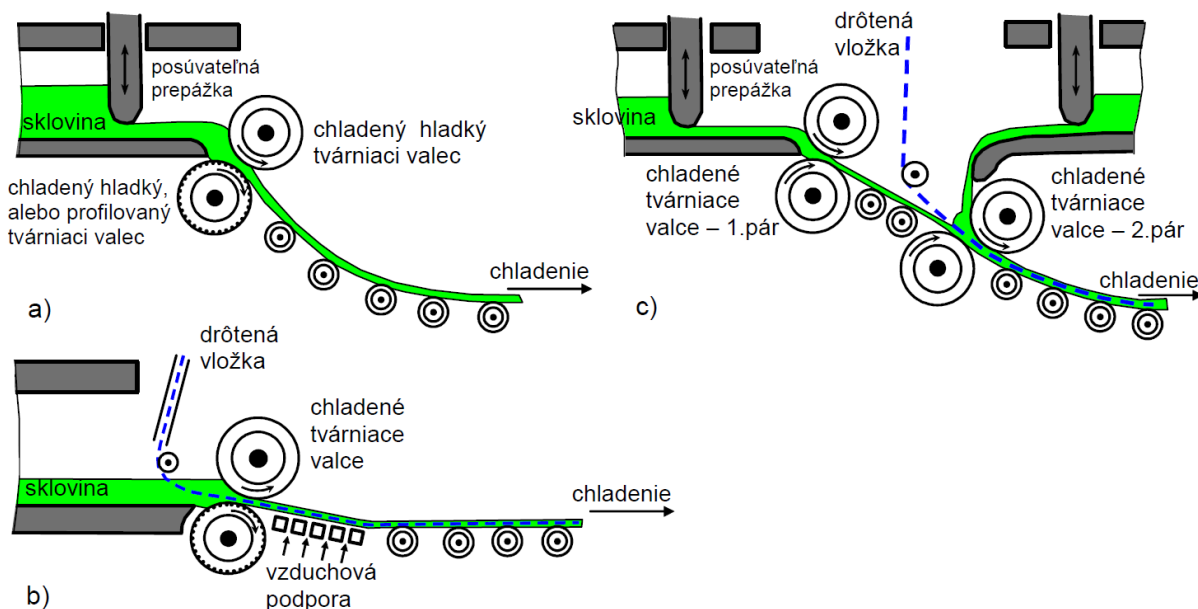




Obr. 9 Výroba plochého skla ťahaním

Pri výrobe plochého skla **liatím s následným valcovaním** ide o mechanické tvarovanie skloviny valcovaním na platni alebo medzi dvomi vodou chladenými valcami (obr. 10a), pričom celý proces môže prebiehať plynulo alebo prerušovane. Tento spôsob možno využiť aj na prípravu skla s drôtenou vložkou (obr. 10b,c), prípadne na sklo profilované, pričom dolný tvárniaci valec je profilovaný a horný je hladký.

Množstvo pritekajúcej skloviny sa reguluje posúvateľnými prepážkami zo žiaruvzdorného materiálu. Dvojica tvárniacich valcov sa otáča oproti sebe a je chladená vodou. Horný valec je hladký, spodný môže byť pri výrobe profilovaného skla profilovaný. Sklovina pri tvárnení prechádza po klzných valcoch valčekovej trate k chladiacej peci, pričom môže byť výrazne schladená použitím prúdu vzduchu pred prvým klzným valcom. Pri liatí možno do pásu skla vniesť drôtenú vložku privádzanú valčekom vedením. Týmto spôsobom sa vyrába ploché sklo s hrúbkou do 30 mm.

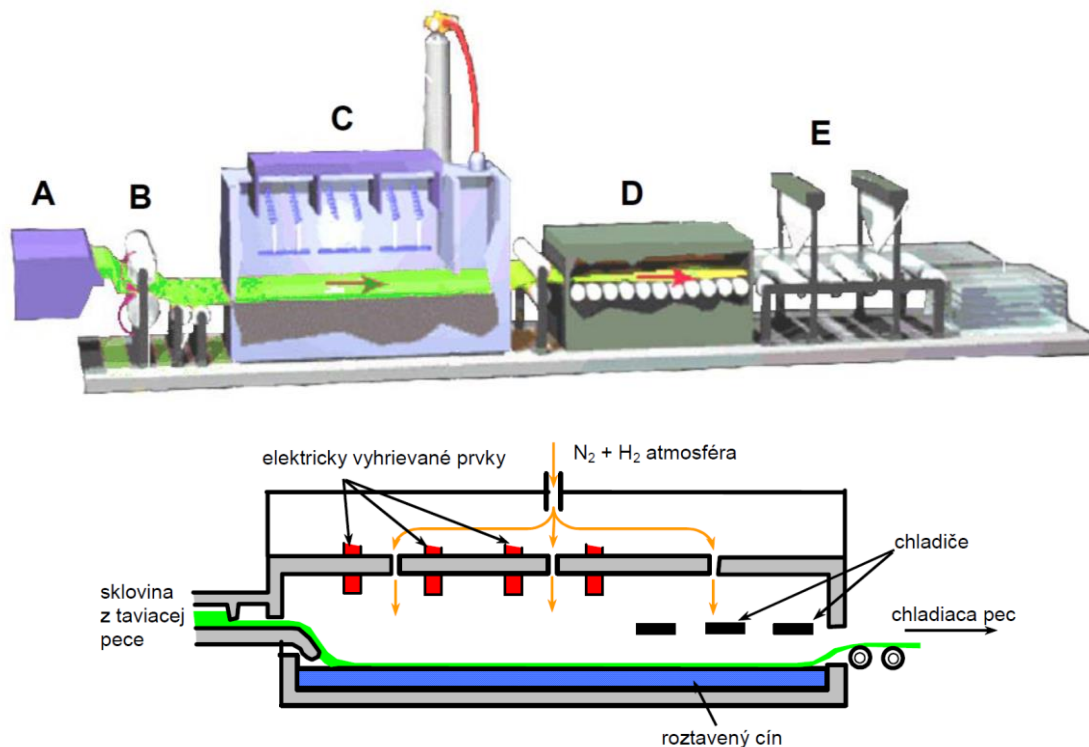


Obr. 10 Výroba plochého skla liatím s následným valcovaním;

- a) výroba plochého alebo jednostranne profilovaného skla, b) výroba skla s drôtenou vložkou s jedným párom tvárniacich valcov, c) výroba skla s drôtenou vložkou s dvomi páromi tvárniacich valcov

Najkvalitnejšie ploché sklo možno vyrobiť **plavením v kúpeli roztaveného kovu** (obr. 11). Zo skúmaných kovov najlepšie vyhovuje cín, pretože najlepšie spĺňa fyzikálne a chemické podmienky. Pri teplote okolo 1000 °C veľmi málo reaguje so sklovinou, má výrazne vyššiu mernú hmotnosť, malý tlak pár (vyparuje sa v nepatrnej miere), v teplotnom intervale spracovania skloviny (600 – 1050 °C) je v tekutom stave. Pri jeho použití treba zabrániť jeho oxidácii, pretože oxid cínatý (SnO) a sulfid cínatý (SnS) negatívne ovplyvňujú kvalitu povrchu vyrábaného skla (vznik škvŕn, modrasté zafarbenie). Z tohto dôvodu je nutné použiť ochrannú atmosféru na potlačenie reakcií (dusík s prídavkom vodíka).

Pri výrobe skla plavením priteká sklovina nátokom zhora na hladinu roztaveného kovu, rozteká sa a vytvára pás skla, ktorého hrúbka môže dosiahnuť až 30 mm.



Obr. 11 Výroba plochého skla plavením;

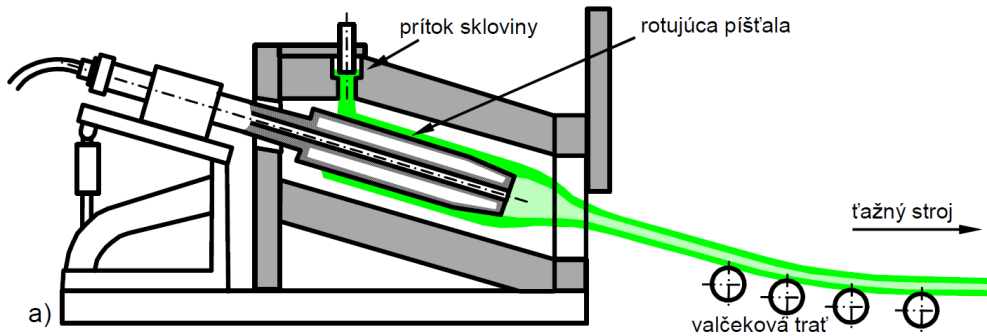
A – vaňová taviaca pec, B – ležací valcovací stroj, príp. nátok zo žiaruvzdorného materiálu,  
C – plaviaci cínový kúpeľ, D – chladiaca pec, E – priečne rezanie

### Výroba rúrok a tyčí

Tvarovanie rúrok a tyčí je principiálne veľmi jednoduché, avšak vlastná výroba je veľmi náročná vzhľadom na prísne požiadavky na dodržiavanie rozmerov a niektorých fyzikálnych hodnôt. Používajú sa 3 základné spôsoby tvarovania:

- horizontálne ťahanie;
- ťahanie vertikálnym smerom nahor;
- ťahanie vertikálnym smerom nadol.

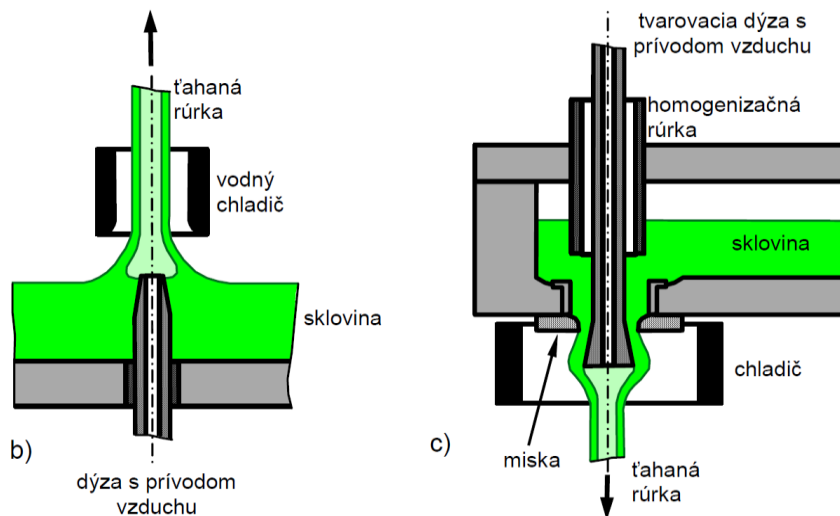
Pri **horizontálnom ťahaní** rúrok a tyčí (obr. 12) sklovina priteká kanálom na rotujúcu píšťalu, ktorá je mierne sklonená (15 až 25°) a zasunutá v teplotne regulovanej komore. Sklovina sa nabaľuje na píšťalu a postupne steká na jej koniec. Sklovina s dutinou vytvorenou prívodom tlakového vzduchu postupuje po valčekovej trati k ťažnému stroju, ktorý vyvoláva stály ťah. Priemer a hrúbka ťahanej rúrky závisí od množstva pritekajúcej skloviny, teploty v komore, tlaku vzduchu a ťažnej rýchlosti.



Obr. 12 Výroba sklenenej rúrky horizontálnym ťahaním

Pri **vertikálnom ťahaní nahor** (obr. 13b) rúrka vzniká pomocou píšťaly, ktorá je umiestnená až do výšky hladiny skloviny. Pomocou tlakového vzduchu je sklovina ťahaná a intenzívne chladená. Chladienie povrchu rúrky je také intenzívne, že následne môže byť zovretá ťažnými kladkami vytvárajúcimi stály ťah.

**Vertikálne ťahanie nadol** (obr. 13c) možno považovať za univerzálny spôsob, pretože pomocou neho možno vyrobiť rúrky aj kapiláry. Sklovina priteká žľabom s vykurovacím a regulačným systémom, homogenizuje sa pomocou otočnej rúrky. Následne sklovina vyteká otvorom tvaru medzikružia. Tvaruje sa vplyvom tlakového vzduchu a tvarom konca píšťaly. Tvar rúrky sa stabilizuje ochladením pomocou chladiča. Následne sa rúrka posúva po valčekovej trati k ťažnému stroju.



Obr. 13 Výroba sklenej rúrky vertikálnym ťahaním;

b) smerom nahor, c) smerom nadol

### Výroba zložitejších výrobkov

Tvarovanie zložitejších výrobkov sa uskutočňuje najmä liatím, lisovaním a fúkaním, príp. ich kombináciou.

Pri **liatí** a **lisovaní** sa používajú ako základné nástroje sklárske formy. Kovové alebo keramické sklárske formy (obr. 14) majú zvyčajne priamy kontakt so sklovinou. To je výhodné, keď treba získať tenkú hladkú vrstvu skla (napr. žiarovkovú banku). Na úpravu priameho styku formy a skloviny je možné použiť *mastivá*, ktoré tepelne izolujú, znižujú trenie pri vyberaní výrobku a do určitej miery môžu chrániť aj aktívne časti formy.

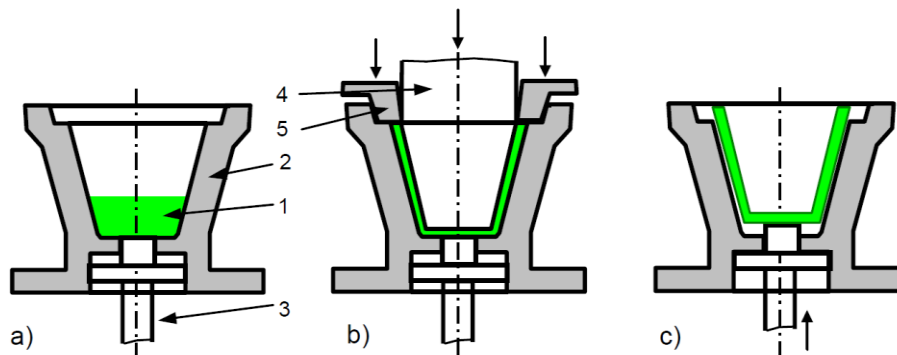




Obr. 14 Príklad kovovej sklárskej formy

Najjednoduchšie tvarovanie **liatím** sa využíva najmä na špeciálne účely (hvezdárske ďalekohľady, optické sklo, výroba plastík a umeleckých predmetov).

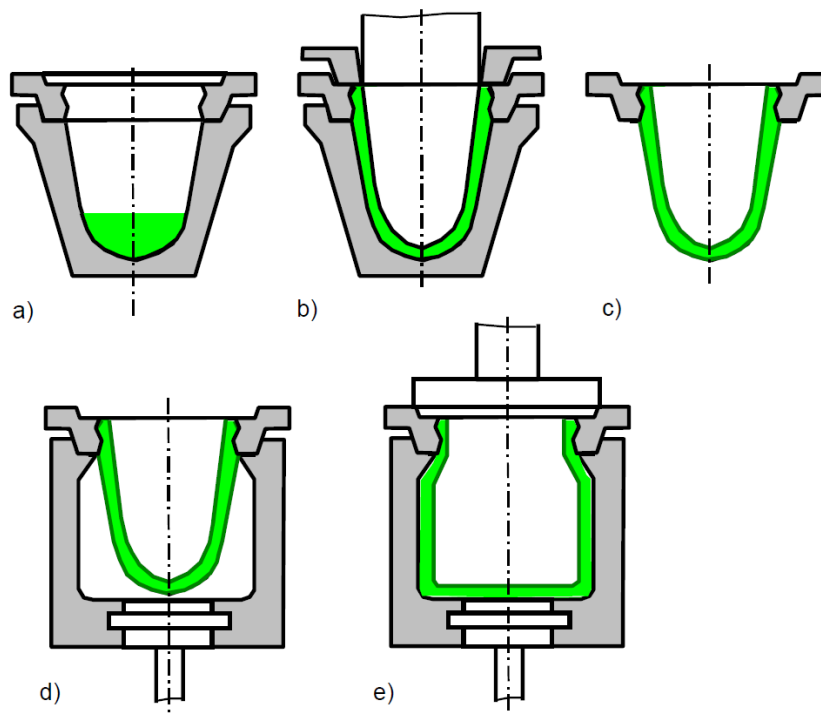
Priemyselne sa však častejšie používa tvarovanie **lisovaním**. Celý proces sa uskutočňuje v jednej forme pri jednej pracovnej operácii (obr. 15). Aj keď možno týmto spôsobom vytvárať aj tvarovo zložité výrobky, má tento postup aj určité obmedzenia. Tvar razníka musí byť taký, aby po lisovaní mohol byť bezproblémovo vytiahnutý z výrobku. Pri tenkostenných výrobkoch je tento postup menej vhodný, pretože je sprevádzaný rýchlym chladením skloviny, kontaktom s formou a neúmerným nárastom jej viskozity, čo môže spôsobiť vznik defektov na výrobku.



Obr. 15 Postup lisovania skla; a) dávkovanie skloviny do formy, b) lisovanie, c) odoberanie výlisku;

1 – dávka skloviny, 2 – forma, 3 – vyhadzovač, 4 – razník, 5 – krúžok

Doplnenie lisovania **fúkaním** je známe pod názvom **lisofúkanie** (obr. 16). V prvej fáze sa z dávky skloviny v lisovacej forme vylisuje predtvar s definitívnym ústím. Časť formy, ktorá dáva ústiť konečný tvar, sa používa aj na prenášanie predtvaru do konečnej formy. V nej sa pretlakom vzduchu vyfúkne z predtvaru konečný výrobok.



Obr. 16 Postup lisofúkacia;

- a) dávkovanie skloviny do predformy, b) lisovanie – vytváranie banky, c) prenášanie banky do konečnej formy, d) prehrievanie banky, e) vyfukovanie konečného tvaru

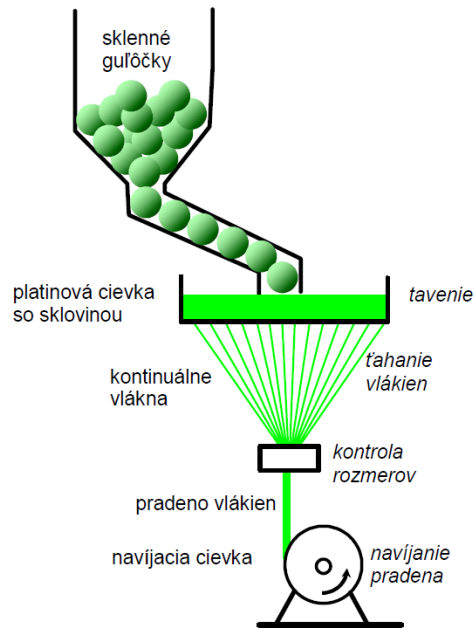
### Chladienie sklárskych výrobkov po tvárnení

Pri **chladiení** získavajú sklárske výrobky konečné mechanické vlastnosti. Pri ochladzovaní je dôležité eliminovať vznik zvyškových napätí spôsobených rozdielnou teplotou v rôznych častiach sklárskeho výrobku. Nebezpečenstvo poškodenia výrobkov zvyškovými napätiami rastie pri sklách s vyššími hodnotami koeficientu rozťažnosti a so zväčšovaním rozmerov výrobku. Z tohto dôvodu je prvá časť chladenia pomalá (kvôli obmedzeniu vzniku vysokých zvyškových napätí výrobku) s následným prudším chladnutím.

**Kalené sklá** sa vyrábajú rýchlym ochladením výrobku v prúde studeného vzduchu, prípadne olejom. Kalené sklo je pevnejšie, pružnejšie, ale keďže má vysoké hodnoty zvyškového napätia, pri rozbití sa rozpadne na drobné úlomky, ktoré nemajú ostré hrany, takže nespôsobujú zranenia. Používajú sa najmä v dopravných prostriedkoch, na televízory a pod. Z kaleného skla sa vyrábajú aj poháre, misky, jedálenské súpravy a iné.

### Výroba skleneného vlákna

Bežná výroba **skleneného vlákna** (obr. 17) pozostáva z prípravy skloviny v taviacom agregáte a následnom procese ťahania skleneného vlákna na tzv. ťahacích stanovištiach. Ťahacie stanovište sa skladá z platinovej piecky vyhrievanej na požadovanú teplotu a navíjačky, ktorá navíja vznikajúce sklené vlákno. Roztavená sklovina vyteká cez otvory v platinovej piecke (niekoľko stoviek až tisícov otvorov) a definovanou rýchlosťou (až  $2 \text{ km min}^{-1}$ ) je vyťahovaná na tenké vlákna. Vlákna sú po schladení a nanosení lubrikačného nánosu navíjané na cievky.



Obr. 17 Výroba sklenených vlákien

Základnou výhodou sklenených vlákien je malá merná hmotnosť a pomerne vysoká pevnosť. Sklené vlákna odolávajú ohňu a pôsobeniu chemikálií. Prítomnosť vlhkosti však výrazne znižuje ich pevnosť. Nevýhodou je tiež ich nízka odolnosť voči dlhodobému statickému zaťaženiu. Bod mäknutia sa pohybuje okolo 700° C a maximálna teplota na dlhodobé použitie je 450° C.

Na výrobu sklenených vlákien je možné využiť celý rad materiálov, ale väčšinou je ich základom oxid kremičitý (SiO<sub>2</sub>). Voľba materiálu, ktorý sa použije, je daná aplikáciou aj spôsobom výroby vlákna. Najčastejšie sa vyrábajú z **E skla**, ktoré má dobré elektroizolačné vlastnosti, vysokú pevnosť a postačujúci modul pružnosti. Vlákna na báze **C skla** dobre odolávajú chemickým vplyvom a vlákna na báze **S skla** majú odolnosť voči vyšším teplotám (tab. 2).

Tab. 2 Mechanické vlastnosti sklenených vlákien

Typ skla	Merná hmotnosť (kg m <sup>-3</sup> )	Pevnosť v ťahu (GPa)	Modul pružnosti v ťahu (GPa)
vlákna E sklo	2540	1,7 – 3,5	69 – 72
vlákna C sklo	2480	1,7 – 2,8	70
vlákna S sklo	2480	2 – 4,5	85

Hoci tepelná vodivosť skla je zvyčajne veľmi nízka, môže sa kombináciou s inými materiálmi ešte výrazne znížiť, pričom sa zlepšujú aj niektoré ďalšie fyzikálne a technologické vlastnosti. Veľmi častým riešením pri tepelných a zvukových izoláciách je použitie pásov a rohoží vyrábaných na báze skleneného vlákna (kap. 5 Kompozity).

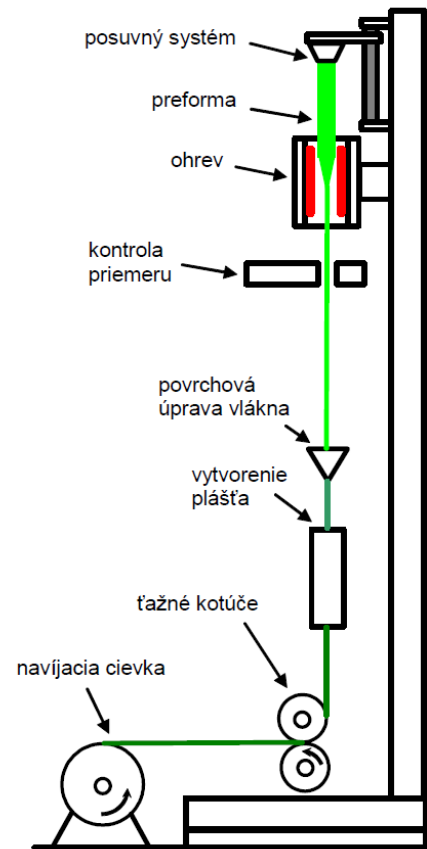
### Výroba optického vlákna

**Optické vlákno** je optický vlnovod, vyrobený v tvare dlhého vlákna. Svetlo, ktoré vchádza do jedného konca optického vlákna, je vedené vláknom a vychádza druhým koncom. Optické vlákno má valcové jadro priemeru niekoľkých jednotiek až desiatok μm z materiálu s určitým indexom lomu, pokryté obalom z iného materiálu s menším indexom lomu. Pri dopade svetelného lúča na rozhranie jadra a obalu pod dostatočne veľkým uhlom dopadu nastáva úplný odraz. Sériou takýchto odrazov sa lúč šíri z jedného konca vlákna na druhý.

Najrozšírenejším sklom na výrobu optických vlákien sú sklá systému  $\text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ . Pri ich výrobe je dôležité zabrániť ich kryštalizácii, prípadne nežiaducej zafarbeniu. Ich príprava je náročná aj z hľadiska dosiahnutia vysokej čistoty skla. Pri niektorých druhoch špeciálnych skiel určených pre optické vlákna je ich čistota rozhodujúcim faktorom.

Technológia výroby týchto druhov vlákien je zvyčajne dvojfázová (obr. 18). V prvej fáze sa pripraví preforma – chemicky veľmi čistý východiskový materiál zvyčajne pomocou špeciálnych metód (sól-gél, pretavovanie vo vákuu). Následne sa pripraví vlákno natavovaním a ťahaním z preformy. Vytiahnuté vlákno prechádza cez roztok organického polyméru, ktorý sa nanesie na povrch vlákna. Nasleduje prechod vlákna cez vytvrdzovaciu zónu, kde polymér vytvorí pevný plášť vlákna. Vhodným materiálom na vytvorenie plášťa je teflón, silikonový kaučuk a pod.

Pri výrobe optických vlákien sa často používa dvojtégliková metóda. Základom tejto metódy sú súosé cylindrické nádoby s konickým dnom s hubicou. Vnútorňa nádoba obsahuje materiál na jadro, vonkajšia na plášť vlákna. Oba materiály sa spolu tavia, pričom teplota mäknutia plášťa musí byť o 20 až 30 °C nižšia ako transformačná teplota jadra. Šírka hubice cylindrickej nádoby s materiálom na jadro je rádovo v desatinách milimetra. Šírka hubice na plášť je rádovo v milimetroch. Vlákna so skokovou zmenou indexu lomu možno pomerne ľahko pripraviť, pretože difúzia je veľmi malá. Sklá s plynulou zmenou indexu lomu sa získajú následným tepelným spracovaním vlákna pri zvýšenej teplote, pričom výrazne difundujú najmä zložky ovplyvňujúce index lomu. Na získanie kvalitných vlákien je nutné dodržať ich chemickú čistotu a stanovenú geometriu skleneného jadra a plášťa vlákna.



Obr. 18 Výroba optických vlákien

### 3.4.4 Dokončovacie operácie

Hoci základ sklárskej technológie tvorí tavenie a následné tvarovanie skloviny, pri ktorých sklenené výrobky dosahujú v dominantnej miere svoje vlastnosti, časť vlastností môžu získať až pomocou dokončovacích operácií, ktoré sa rozdeľujú na:

#### a) mechanické úpravy

- *brúsením a leštením* sa zdôrazňuje čírosť, lesk a optické vlastnosti skla, odstraňujú sa jeho nerovnosti a defekty povrchu;
- *rytím a pieskovaním* sa zdrsňuje povrch výrobku;

#### b) tepelné úpravy – využívajú sa najmä na dekoratívne úpravy povrchu;

- *leštenie ohňom* – používa sa na zahľadzenie nerovností povrchu a získanie lesku;
- *mramorovanie* – prilepovanie sklenených črepov a drte k zohriatemu povrchu, príp. vtláčanie vzoru do zohriateho povrchu pomocou špeciálnej formy;

#### c) chemické úpravy

- *leptanie* (najmä kyselinou fluorovodíkovou) na vytvorenie požadovaných vzorov;
- *malovanie* (pomocou prídavných farebných skiel) a *glazúrovanie* (pomocou kovových solí) skla na ovplyvnenie farebnosti povrchu;
- *pokovovanie* na dosiahnutie požadovaných vlastností povrchu, najmä v technických aplikáciách.

### 3.4.5 Špeciálne technológie prípravy a spracovania skla

Medzi špeciálne technológie prípravy a spracovania skla patrí napr.

- *príprava skiel vyžadujúcich vysoké rýchlosti ochladzovania* (výroba kovových skiel);
- *príprava skiel metódou sól-gél*;
- *príprava fotoštrukturovaných skiel*;
- *príprava skiel metódami fyzikálneho a fyzikálno-chemického povlakovania* – naparovanie, naprašovanie, chemická depozícia.