



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ PLOCHÉHO SKLA

METHODS OF PROCESSING OF FLAT GLASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH TICHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA NOVOTNÁ, Ph.D., Paed IGIP

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Tichý

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Způsoby zpracování plochého skla

v anglickém jazyce:

Methods of Processing of Flat Glass

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámit se s historií a současností zpracovávání plochého skla

Cíle bakalářské práce:

Student se má seznámit s metodami zpracování plochého skla.



Seznam odborné literatury:

1. Štěpán, Popovič: Výroba a zpracování plochého skla
 2. Horák, M.: Dynamická manipulace s plochým sklem
 3. Staněk, J.: Historie sklářských technologií
 4. Kirch, R.: Kovy ve sklářství
- Stanworth, J.E.: Fyzikální vlastnosti skla

další literární a jiné prameny

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Novotná, Ph.D., Paed IGIP

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 2.3.2012



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt:

Práce pojednává o metodách zpracování plochého skla v historickém kontextu, nastiňuje způsoby minulé i současné výroby plochého skla, uvádí možnost dalšího zpracování plochého skla formou spékání v elektrické peci, zabývá se chybami a omyly této technologie.

Abstract:

This "paper" disserts the flat-glass processing methods in the context of history. It outlines the former as well as the current ways of flat-glass production, mentions the possibility of the flat-glass further fabrication using the fritting method in the electric furnace and engages the faults and errors of this technology.

Klíčová slova:

Sklo, teplotní roztažnost, viskozita, hustota skla, výroba skla, fusing

Keywords:

Glass, thermal expandability, viscosity, glass density, glass manufacturing, fusing

Bibliografická citace:

TICHÝ, V. Způsoby zpracování plochého skla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Novotná, Ph.D., Paed IGIP.

Prohlášení autora o původnosti práce:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury.

Vojtěch Tichý

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP za cenné připomínky, rady a čas, který mi věnovala při přípravě této práce.

Obsah

1. Cíl práce	2
2. Historie skla.....	3
3. Struktura a charakteristika skla	4
3.1. Charakteristika skla	5
3.2. Teplotní závislost	6
3.3. Struktura skla.....	8
4. Vlastnosti skla důležité pro výrobu a zpracování.....	8
4.1. Viskozita.....	10
4.1.1. Metoda zavěšené kuličky	11
4.1.2. Pojem „krátké sklo“ a „dlouhé sklo“	15
4.2. Hustota skla	16
4.3. Elektrické vlastnosti skla.....	17
4.4. Tepelné vlastnosti a teplotní roztažnost	20
4.5. Krystalizační schopnost.....	23
5. Výroba plochého skla.....	23
5.1. Historie výroby plochého skla.....	23
5.1.1. Měsíční sklo	23
5.1.2. Korunové sklo	23
5.1.3 Výroba plochého skla ze skleněných válců.....	24
5.1.4. Výroba plochého skla litého a válcovaného na stole	24
5.2. Fourcaltův způsob	25
5.3. Způsob tažení Pittsburgh	26
5.4. Způsob Libbey-Ovens	28
5.5. Lití plochého skla	29
5.4. Výroba plaveného skla	30
6. Zpracování plochého skla.....	35
6.1.Pec	35
6.2.Metoda spékání Fusing.....	36
6.3.Metoda ohýbání skla	39
6.4.Metoda padání do prostoru.....	42
7. Závěr.....	45
8. Seznam použitých zkratk a symbolů	46
9. Seznam použité literatury.....	47

1 Cíl práce

Cílem této práce je seznámit s problematikou výroby a zpracování plochého skla a nastínit další možnosti a postupy zpracování, zejména v elektrické peci metodou Fusing. Má shrnout metody výroby v historickém kontextu a seznámit čtenáře s důležitými fyzikálními vlastnostmi skla, které jsou důležité pro výrobu a zpracování.

2 Historie skla

Sklo provází lidstvo od nepaměti. V dějinách bylo výrazem luxusu a výjimečnosti. Protože se sklo v přírodě v čisté formě nevyskytuje, byla snaha tuto amorfni, křehkou, obvykle průhlednou hmotu vyrobit. Rozvoj, vývoj a využití skleněné zdobné materie vždy kopíroval vzestup bohatství jednotlivých společenství. S ekonomickým úpadkem říší vždy zanikaly znalosti technologie jeho výroby. První zmínky o čistě skleněných výrobcích se datují z Mezopotamie od poloviny třetího tisíciletí př.n.l., do období kolem 1600 př.n.l. spadají nálezy nádobek zhotovených navíjením skleněných barevných vláken kolem hliněné formy. Nejvyšší produkce luxusních drobných předmětů votivního charakteru byla dosažena v Egyptě ve 2. tisíciletí př.n.l. Mistry výroby se dle archeologických nálezů stávají Féničané, kteří uměli zhotovit sklo jednobarevné, zvládali výbrus z jednoho kusu skla, vytvářeli mozaiky, misky a číše s frity v různých barevných odstínech. V palestinsko syrské oblasti, jako křižovatce obchodních cest, se výroba skla nadále úspěšně rozvíjí. Do doby I. stol. našeho letopočtu spadá objev sklářské píšťaly a foukání skla. Tato technologie se stala dominující sklářskou technikou a konečně bylo umožněno kvalitativní rozlišení skla pro různé druhy výrobků. Sklo se začíná využívat i k zasklení oken. V Pompejích a Herkulaneu byly objeveny tabule z litého průsvitného skla o velikosti asi 30x60 cm. O století později nastupuje zpracování křišťálového skla hranováním, rytím, leštěním povrchu. Po rozpadu římské říše však zanikly všechny složitější a náročnější výrobní techniky. Odkaz atiky je zachován pouze katolickou církví v benediktýnských kláštorech, kde sklo slouží jako výplň relikviářů a oken. Rozvíjí se technika vitráží. Až ve století 17. však dochází v Evropě k první manufakturní výrobě plochého skla, a to ve Francii, při potřebě výroby zrcadel. Tehdy se definitivně odděluje výroba skla foukaného a plochého. [16]

3 Struktura a charakteristika skla

3.1 Charakteristika skla

Sklo je amorfni pevná látka, která nemá krystalickou strukturu. Vzniká ztuhnutím taveniny bez krystalizace. Sklo má za pokojové teploty takovou viskozitu že se jeví jako pevná látka svým chováním i vlastnostmi. Sklům chybí zákonitá pravidelnost stavby krystalické mřížky ale mají poměrně pravidelné uspořádání na velkou vzdálenost. Neobsahují krystaly ale koordinační útvary ve tvaru trojúhelníků nebo čtyřstěnů poměrně pravidelně uspořádány. Mezi látkami ve skelném stavu a přechlazenými kapalinami je značný rozdíl. Skla vykazují mechanické vlastnosti pevných látek, to je způsobeno vysokou viskozitou zhruba $10^{13} \text{ dPa} \cdot \text{s}$, kdy se pohyb atomů a molekul prakticky zastaví. Zatímco přechlazené kapaliny zůstanou tekuté a při překročení jistého stupně přechlazení nastává spontánní krystalizace. [1], [2], [3] Rozdíl mezi látkami tvořící sklo a těmi, které po přechlazení krystalizují se dá popsat pomocí typů kapalin, buď Frenkelova typu, nebo Bernalova typu. Některé látky patřící do těchto typů jsou uvedeny v Tab. 3.1-1 a 3.1-2.

Kapaliny Frenkelova typu se vyznačují tím, že za určitých podmínek je můžeme přechladit bez krystalizace o několik stupňů. Při dalším ochlazení nevytvoří skla ale vykristalizují. Mezi kapaliny tohoto typu patří většina anorganických látek. Po roztavení tvoří taveniny s velice nízkou viskozitou. [1]

Tab. 3.1-1: kapaliny Frenkelova typu [1]

Látka	Chemický vzorec	Teplota tání °C	Viskozita [$\text{dPa} \cdot \text{s}$]
Voda	H_2O	0	0,02
Chlorid lithný	$LiCl$	613	0,02
Bromid kademnatý	$CdBr_2$	567	0,03
Zinek	Zn	420	0,03
Železo	Fe	1535	0,07
Sodík	Na	98	0,01

Kapaliny Bernalova typu po roztavení tvoří značně viskózní taveniny. Hodnoty jednotlivých viskozit při bodu tání dané látky jsou uvedeny v tab. 3.1-2. Zchlazením tohoto typu kapalin vzniknou přechlazené kapaliny, které se dalším ochlazením změny ve skla. Pokud kapalinu Bernalova typu ponecháme delší dobu na teplotě o málo nižší než je teplota tání dané látky, potom kapalina krystalizuje. Stane se tak proto, že termodynamicky stabilní krystalická fáze se nachází pod teplotou tání. Jestli nastane krystalizace závisí na rychlosti ochlazení přes interval teplot kde je možná krystalizace.

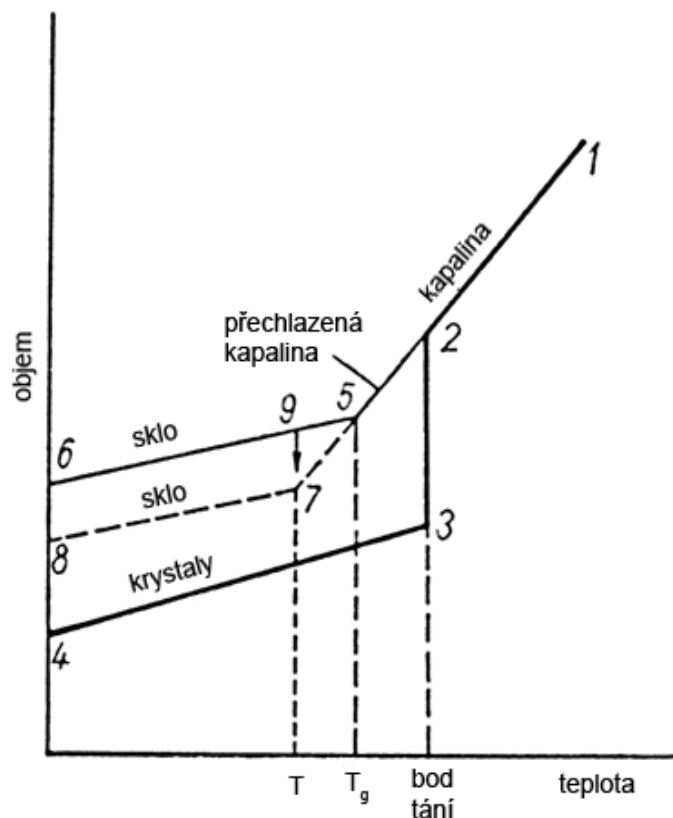
Tab. 3.1-2: kapaliny Bernalova typu [1]

Látka	Chemický vzorec	Teplota tání °C	Viskozita [$dPa \cdot s$]
Oxid křemičitý	SiO_2	1710	10^7
Oxid boritý	B_2O_3	450	10^5
Oxid germaničitý	GeO_2	1115	10^7
Fluorid berylnatý	BeF_2	540	10^6
Oxid arzenitý	As_2O_3	309	10^6

3.2 Teplotní závislost

Následující odstavec se zabývá popisem teplotní závislosti objemu a teploty látek v kapalném, skelném a krystalickém stavu. Obr. 3.2-1 znázorňuje závislost objemu na teplotě. Látka, která krystalizuje je znázorněna spojnici bodů (1,2,3,4). Bodem 1. se rozumí tavenina, bod 2 je teplota tuhnutí. Mezi body 2 a 3 je patrná výrazná změna objemu vlivem krystalizace. Látka, která tvoří sklo je znázorněna spojnici bodů (1,2,5,6) resp. (1,2,5,7,8). V tomto případě v bodě tuhnutí ke krystalizaci nedojde a dochází k plynulé změně objemu až do bodu 5, kde látka dosáhne takové viskozity (zhruba $10^{13} dPa \cdot s$), že se jeví jako pevná. Do tohoto bodu lze látku označit jako přechlazenou kapalinu. Vlivem dalšího ochlazování sklo plynule zmenšuje objem až do bodu 6. Jestliže ochlazujeme taveninu pomaleji, ale vyšší rychlostí než kritickou pro vznik krystalizace, dojde k odchylce plynulé změny objemu až při teplotě T , kterou představuje bod 7. Následně se objem plynule zmenšuje až do bodu 8. [1] Teplota T_g se nazývá *transformační teplota (nebo transformační bod)*. V zahraniční literatuře se někdy nazývá i *teplota přechodu (glass transition temperature) nebo teplota zeskení*. [1] Při teplotě T_g přechází přechlazená kapalina ve sklo. [1] Taveninu nebo přechlazenou kapalinu nad touto teplotou nazýváme sklovinou, pod ní, mluvíme o skle. Interval teplot mezi T a T_g nazýváme *transformační interval nebo interval zeskenění, interval přeměny*. [1] Zavádíme ho proto, že transformační bod je závislý na rychlosti ochlazování a musí ležet uvnitř tohoto intervalu. Čím pomaleji látku ochlazujeme, tím bude transformační bod v ležet v nižších teplotách. Transformační interval lze charakterizovat viskozitami zhruba 10^{12} až $10^{15} dPa \cdot s$. [2] Pro porovnání transformační teploty u různých látek se zavádí pro bod T_g rychlost chlazení $10 K \cdot min^{-1}$. [3] Pro popsání stavu skla se zavádí pojem fiktivní teplota. *Stupeň stabilizace skla bývá charakterizován fiktivní teplotou, tj. teplotou při které dochází k „zamrznutí“ rovnovážné strukturní konfigurace. Tato teplota je vyšší, než transformační bod.* [3] Čím vyšší je tato teplota než T_g tím je sklo méně stabilní. Rozdíl těchto teplot je vyšší se zvětšující se rychlostí ochlazování.

Obr. 3.2-1: Schematické znázornění tuhnutí látky s krystalizací (1-2-3-4) a skelného tuhnutí (1-2-5-6) resp. (1-2-5-7-8) [1]

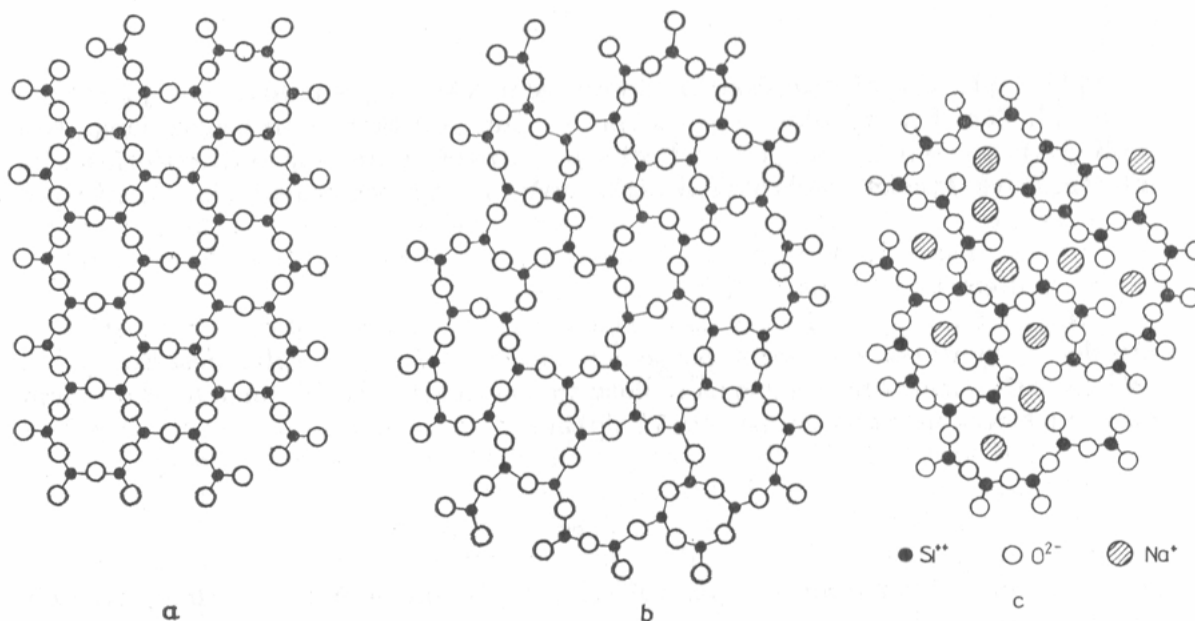


3.3 Struktura skla

Existuje mnoho teorií zabývajících se strukturou skla. Nejvíce rozšířené jsou Zacharišena-Warrenova, ta uvažuje teorii spojitě strukturní neuspořádané mřížky, a Lebeděvova, která je založena na krystalitové teorii.[3] Více o teoriích v literatuře [1]. Reálná struktura skel je složením z těchto strukturních modelů v různém poměru. Na Obr.3.3-1 je vyobrazena představa plošné struktury struktury krystalického SiO_2 , skelného SiO_2 a sodnokřemičitého skla podle Zacharišena a Warrena. Tato teorie je založena na předpokladu existence spojitě strukturní mřížky, která se skládá ze stejných strukturních útvarů podobně jako krystalické silikáty např. SiO_4 . Ve vyobrazení (a) na Obr.3.3-1 je znázorněn krystalický SiO_2 jenž je tvořen vzájemně spojenými tetraedry SiO_4 a tvoří tak pravidelnou strukturní síť, kde je vzdálenost mezi atomy křemíku a kyslíku konstantní. SiO_2 ve skelném stavu představuje (b). Tady je síť deformovaná, stavební jednotky nejsou stejné a vzdálenost atomů křemíku a kyslíku není konstantní, kolísá úhel vazby i rozptýl atomů. Vzniklou prostorovou síť označujeme jako neuspořádanou, protože nevykazuje souměrnost ani na větších vzdálenostech. Pokud jsou do takové strukturní sítě zabudovány modifikátory (kovy alkalických zemin nebo oxidy alkalických kovů), dochází k přerušení některých vazeb mezi křemíkem a kyslíkem a vzniká struktura jenž je vyobrazená na (c). V téhle krystalové síti potom vznikají můstkové, spojující vždy dva atomy křemíku, a nemůstkové kyslíkové

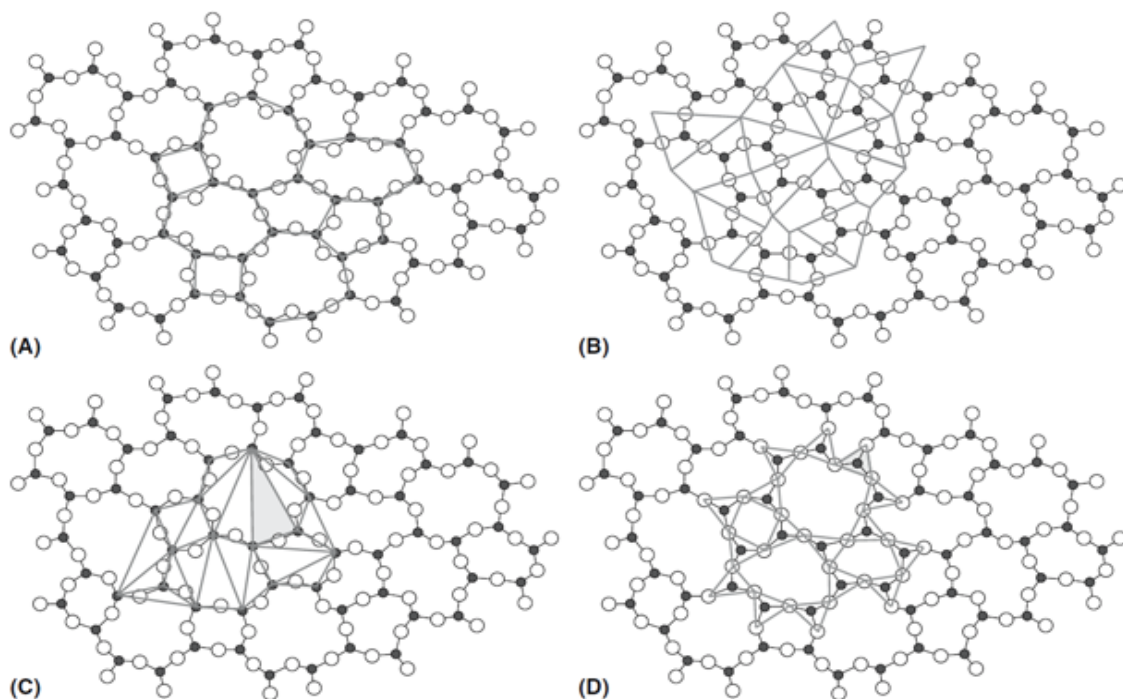
anionty, které jsou vázány na jeden křemíkový atom. Množstvím modifikátorů se dá redukovat teplota potřebná k převedení do viskózního stavu.[3] Leběděvova teorie struktury skla je formulována na základě předpokladu krystalitů, to jsou rozměrově malé oblasti vyznačující se uspořádanou strukturou. Jejich velikost odpovídá přibližně seskupení několika elementárních buněk SiO_4 . Matrice s krystality, která má neuspořádanou amorfni strukturu potom vytváří strukturu skla. Předností této teorie je vysvětlení určitých anomálních chování některých skel.[3] Více v literatuře [1].

Obr.3.3-1: Plošné znázornění struktury krystalického SiO_2 (a), skelného SiO_2 (b) a sodnokřemičitého skla (c) podle Zachariasena a Warrena.[3]



Protože ve skelném stavu má struktura skla přibližnou souměrnost pouze na velké vzdálenosti. Byly vytvořeny modely, které se snaží přirovnat určité části struktury ke krystalickým materiálům a jejich elementárním buňkám. Takovéto modely vznikly v devadesátých letech přezkoumáním Zachariasenovi-Warrenovi teorie a jsou vyobrazeny na Obr.3.3-2. Možnosti A až D v tomto obrázku představují různé pohledy na souměrnost SiO_2 ve skelném stavu.

Obr.3.3-2: různé pohledy na souměrnost SiO_2 ve skelném stavu [8]



4 Vlastnosti skla důležité pro výrobu a zpracování

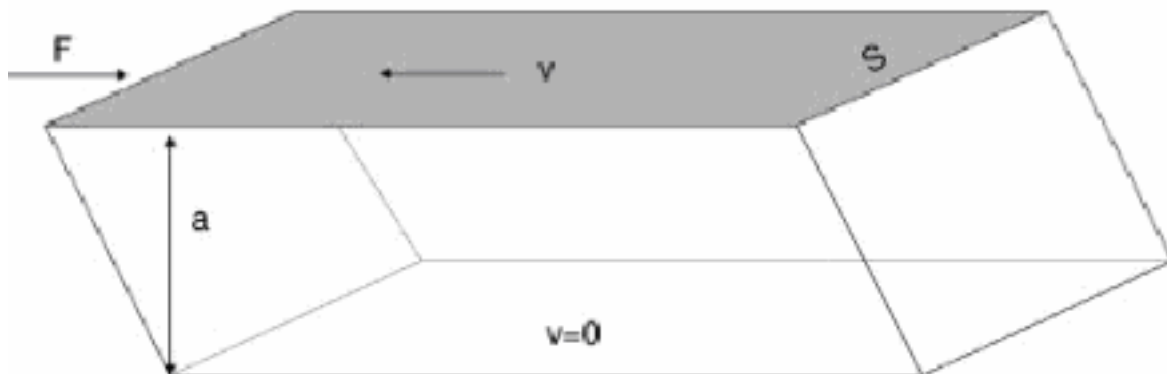
V etapě tavení, tvarování a chlazení ve výrobním procesu je nutné znát vlastnosti skloviny daného chemického složení v roztaveném stavu. K důležitým vlastnostem skla pro výrobu patří hustota, viskozita, tepelná a elektrická vodivost, krystalizační schopnost a teplotní roztažnost. [3]

4.1 Viskozita

Viskozita je jedna s nejdůležitějších vlastností skla. Sklo se dá i podle viskozity v závislosti na teplotě definovat jako přechlazená kapalina, která se zvyšující se teplotou snižuje viskozitu. Dá se tedy říci, že sklo teče i za pokojové teploty v tuhém stavu. Tento děj lze prokázat dlouhodobým měřením, kdy sklo začne vykazovat pomalé nevratné deformace, ty jsou však zanedbatelné. Podle různého chemického složení se sklo zpracovává za rozdílných teplot, ale za srovnatelných hodnot viskozit. Díky této skutečnosti je znalost závislosti viskozity na teplotě u skel významnou pro výrobu a zpracování. Pro každé sklo se dají stanovit vztažné body viskozity závislé na teplotě. Ty určují specifické vlastnosti skla v daném bodě. [10] [4]

Pojem viskozita lze definovat jako míra odporu při tečení látek v kapalném nebo plynném stavu. Styk kapaliny s povrchem tuhého tělesa za pohybu tvoří vznik viskozitních sil. Na obr.4.1-1 je patrné, že síla F působí jako odpor pohybu a je brzdící silou která, působí zpomalení z rychlosti v na nulu ve vzdálenosti a . [10] [4]

obr.4.1.1-1:Znázornění viskozity na modelu [10]



$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta a} \quad (1)$$

Po převedení S z rovnice (1) na druhou stranu vznikne poměr F/S , který udává tečné napětí τ_{xy} .

$$\tau_{xy} = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta a} \quad (2)$$

Rovnice (2) platí pouze pro lineární rychlostní spád, který vyjadřuje $\Delta v / \Delta a$. Pro obecný případ platí rovnice (3)

$$\tau_{xy} = \eta \cdot \frac{dv}{da} \quad (3)$$

Ve výše uvedené rovnici se veličina η nazývá dynamická viskozita, koeficient viskozity nebo jen viskozita.[8] [4] V soustavě SI má dynamická viskozita jednotku $Pa \cdot s$. Dříve se používala jednotka poise, se značkou P . Pro převod mezi těmito jednotkami platí vztah: $P = 0,1 \cdot Pa \cdot s = dPa \cdot s$. [8] V dnešní době je v literatuře viskozita nejvíce uváděna s jednotkou $dPa \cdot s$. V rovnici (4) je uveden vztah pro kinematickou viskozitu ν , to je poměr dynamické viskozity a hustoty, za stejné teploty.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Pokud chceme vyjádřit viskozitu v závislosti na teplotě, můžeme vycházet z Arrheniovy rovnice (5). V které A vyjadřuje frekvenční faktor, $E\eta$ aktivační energii viskózního toku, T absolutní teplotu a R představuje plynovou konstantu. Tento vztah však popisuje viskozitu pouze v úzkých teplotních intervalech, protože $E\eta$ není konstantou v celém teplotním průběhu.[2],[10] Více o této problematice v literatuře [2] a [10].

$$\eta(T) = A \cdot e^{\frac{E\eta}{R \cdot T}} \quad (5)$$

Pro představu porovnání jednotlivých viskozit je uvedena tabulka 4.1-1.

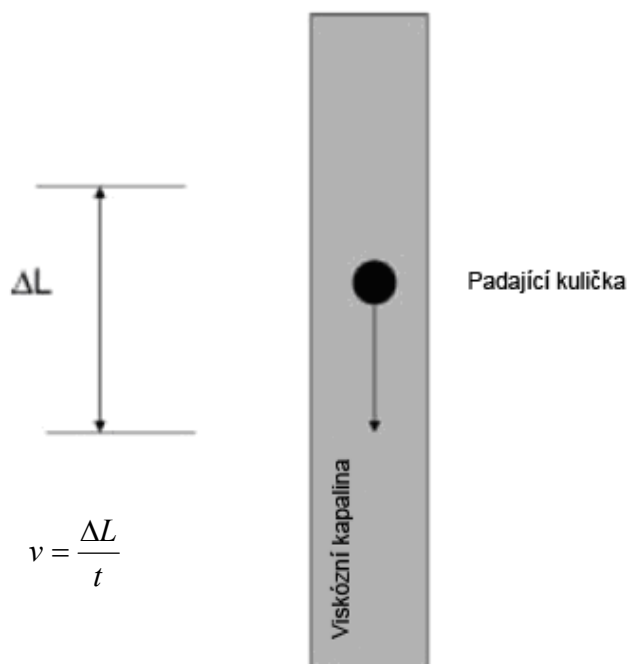
Tab. 4.1-1: různé viskozity [8]

Viskozita	Příklad
10^{-2} dPa·s	Voda při 20 °C
10^0 dPa·s	Lehký strojní olej
10^1 dPa·s	Těžký strojní olej
10^2 dPa·s	Olivový olej při 20°C
10^4 dPa·s	Tekoucí med při 20°C
10^4 dPa·s	Sklo v pracovním bodu
$10^{7,6}$ dPa·s	Bod měknutí
10^9 dPa·s	Horní limit pro nízkou viskozitu
10^{13} dPa·s	Horní chladicí bod
$10^{13,4}$ dPa·s	Sklo při T_g
$10^{14,6}$ dPa·s	Dolní chladicí bod
$>10^{15}$ dPa·s	Pevná fáze
10^{16} dPa·s	Horní limit pro měření viskozity

4.1.1 Metoda zavěšené kuličky

Viskozita pro skla s různou kombinací chemického složení se určuje experimentálně, metodami, popsány v [4], [10], [8]. Každá s těchto metod má rozdílný princip měření a také specifický interval viskozit, který se touto metodou dá měřit. Jednou s metod je metoda zavěšené kuličky. Realizuje se pádem platinové kuličky ve sklovině vyvolaným gravitační silou. Touto metodou se měří viskozity v rozmezí od 10^2 do 10^5 dPa·s. Tato metoda je schématicky znázorněna na obr. 4.1.1-1. [10]

Obr. 4.1.1-1: Schématické znázornění metody zavěšené kuličky [10]



Výsledný vztah pro výpočet viskozity je potom uveden jako rovnice (6). Kde g je gravitační zrychlení [cm/s^2], v rychlost pádu [cm/s], r představuje poloměr kuličky [cm], ρ_1 hustota platiny [g/cm^3] a ρ_2 representuje hustotu skloviny [g/cm^3]. [4]

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot g \cdot r^2 \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{v} \quad (6)$$

4.1.2 Pojem „krátké sklo“ a „dlouhé sklo“

V souvislosti s viskozitou a teplotou, na kterou se váže tvarovací schopnost skla, se v sklářské praxi užívají termíny „krátké sklo“ a „dlouhé sklo“. Těmito termíny se rozumí, že sklo dlouhé tuhne pomaleji než sklo krátké a tím má i delší interval v kterém se dá zpracovávat. Čím je poměr přírůstku viskozity ku přírůstku teploty menší, tím je pracovní interval delší. Záleží na strmosti viskozitní křivky. Příklad takovýchto křivek je na obrázku 4.1.2-1 a 4.1.2-2 [2]

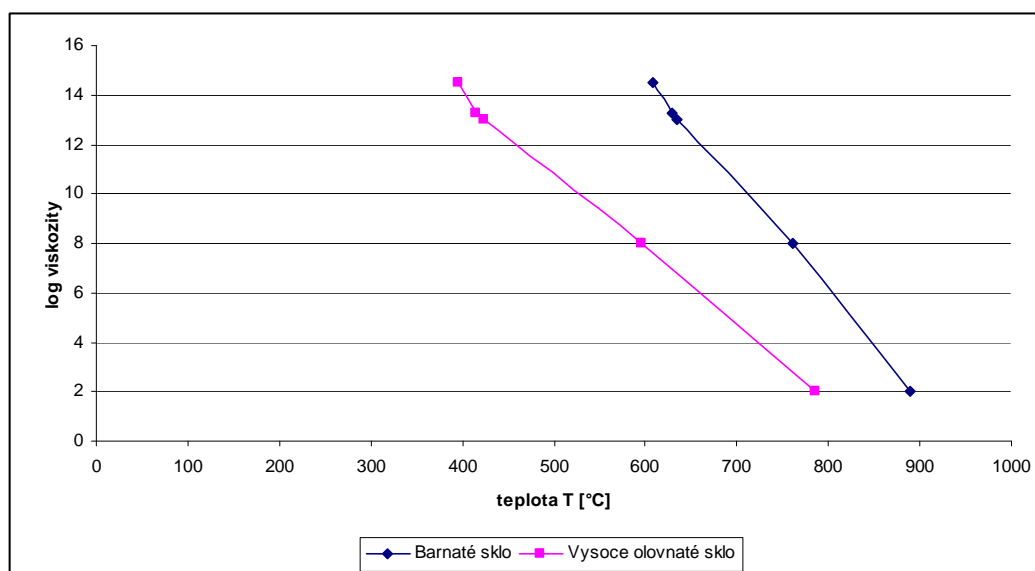
Rychlost tuhnutí v_t je možné vyjádřit rovnicí (7). Kde t reprezentuje čas, T teplotu a Δ udává rozdíl dané veličiny.

$$v_t = \frac{\Delta \log \eta}{\Delta t} = \frac{\Delta \log \eta}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (7)$$

Tab.4.1.2-1: Porovnání dlouhého a krátkého skla [4]

Vztažné body viskozity	Sklo dlouhé (vysoce olovnaté sklo)	Sklo krátké (barnaté sklo)	Viskozity v daných bodech [dPa · s]
Transformační bod T_g [°C]	415	630	$10^{13,3}$
Bod měknutí T_m [°C]	595	761	10^8
Bod tečení T_t [°C]	785	890	100
Teplota liquidu T_l [°C]	1200	1093	
Dolní chladicí teplota T_d [°C]	395	608	$3 \cdot 10^{14}$
Horní chladicí teplota T_h [°C]	423	635	10^{13}
Oblast tuhnutí [°C]	415 - 1200	630 - 1093	$10^{13} \rightarrow 3 \cdot 10^{14}$
Oblast zpracování [°C]	538 - 1076	720 - 1023	$10^4 \rightarrow 10^8$
Hustota [g/cm ³]	3,593	3,573	

Graf viskozitních křivek sestrojený s hodnot z tab.4.1.2-1



V prvním sloupci tabulky 4.1.2-1 jsou uvedené vztažné body viskozity. V každém jednotlivém bodě mají různá skla stejnou hodnotu viskozity, ale té dosáhnou za rozdílných teplot. Znalost teplot v nichž dosahují těchto bodů různá skla je důležité pro výrobu a zpracování. Tyto body se u každého skla měří experimentálně. Ke stanovení těchto bodů existují různé metody uvedené v literatuře [4] , [10].

V následujícím odstavci jsou vztažné body viskozity více popsány i s jejich označením v anglickém jazyce.

Bod tečení - T_t - Melting point - odpovídá teplotě při které je viskozita $100 \text{ dPa} \cdot \text{s}$ Tady je sklo tak tekuté že může být pokládáno za kapalinu. [4] , [7]

Bod zpracování - working point - reprezentuje teplotu při které je viskozita $10^4 \text{ dPa} \cdot \text{s}$.V tomto bodu je sklo schopno udržet svůj tvar na krátkou dobu. Zde také začíná pracovní interval. [4] , [7]

Bod měknutí - T_m - softening point - teplota ve které je viskozita $10^8 \text{ dPa} \cdot \text{s}$.Bod při kterém je sklo zahřáto do stavu , kdy se dá lehce ohýbat mechanickou silou. Zde také končí pracovní interval. [4] , [7]

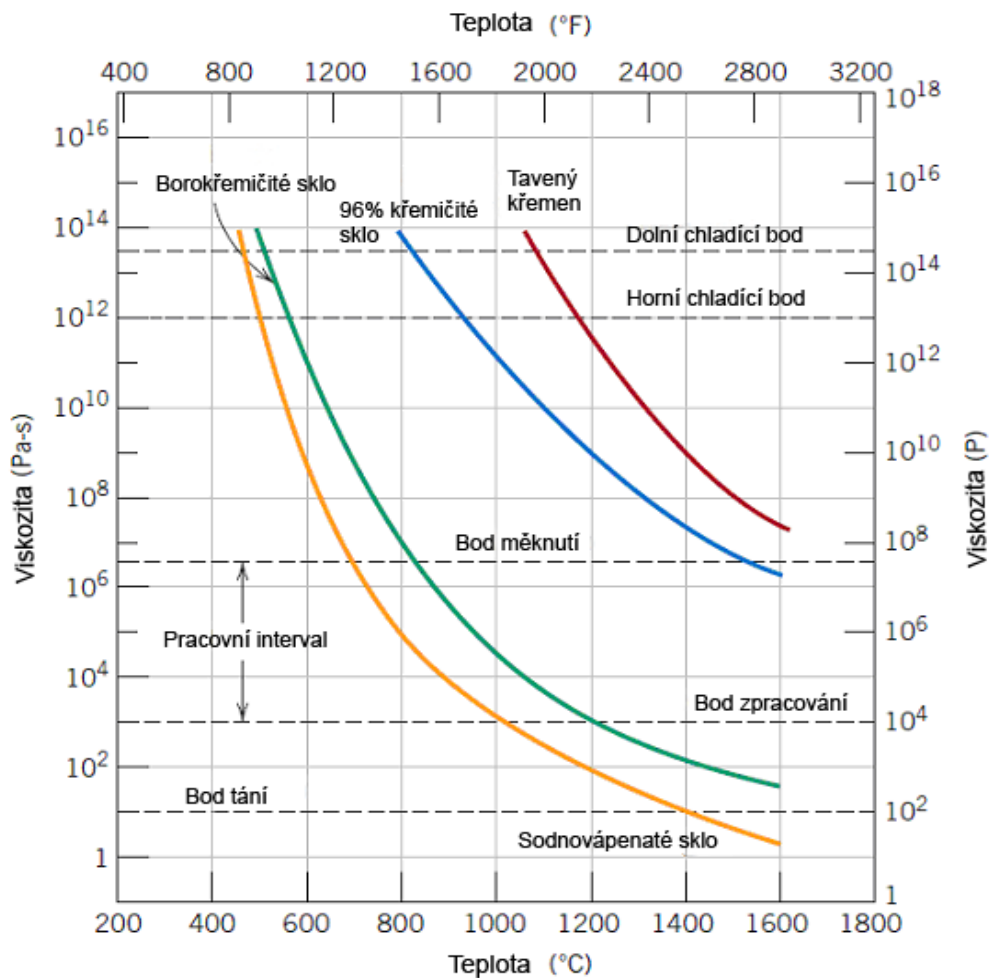
Horní chladicí teplota - T_h - annealing point - je to teplota o viskozitě $10^{13} \text{ dPa} \cdot \text{s}$.V tomto bodě může být odstraněno vnitřní pnutí. Pnutí úplně zmizí v 15 minutách. [4] , [7]

Dolní chladicí teplota - T_d - strain point - odpovídá teplotě při které je viskozita $\text{dPa} \cdot \text{s}$.V tomto bodě se za 15 hodin sníží vnitřní pnutí na 10% .Pod touto teplotou již nelze pnutí snižovat. [4] , [7]

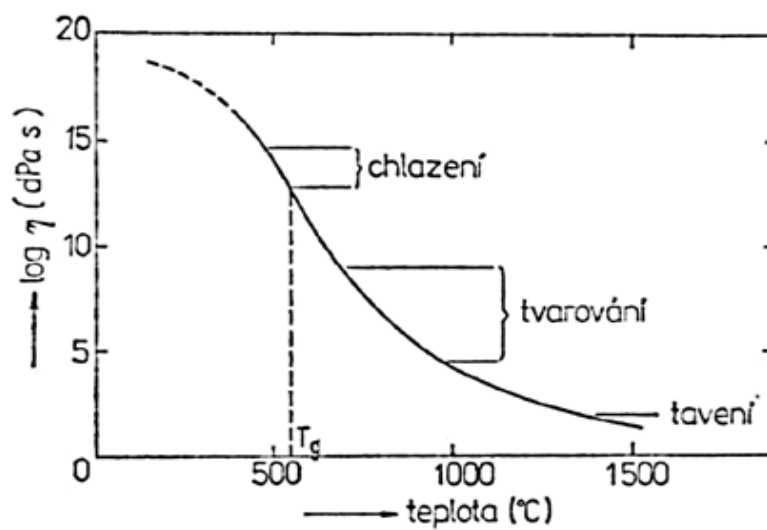
Transformační teplota - T_g - glass transition temperature -u velkého množství skel odpovídá viskozitě $10^{13,3} \text{ dPa} \cdot \text{s}$ a leží asi uprostřed transformačního intervalu. [4] , [7]

Deformační teplota - M_g - deformation temperature - je to teplota , která je definována viskozitou přibližně $10^{11} \text{ dPa} \cdot \text{s}$.Při této teplotě se začne skleněný výrobek deformovat vlastní vahou. [4] , [7]

Obr. 4.1.2-1: Viskozita v závislosti na teplotě pro různá skla a pro tavený křemen [7]



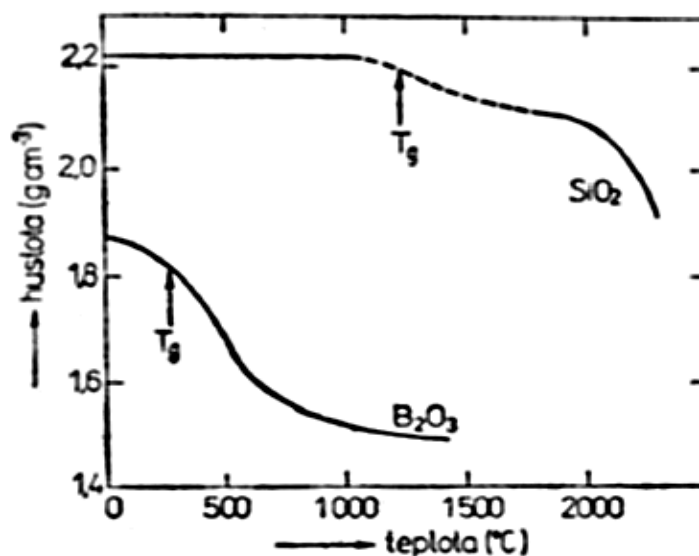
Obr. 4.1.2-2: Závislost viskozity běžného sodnovápenato-křemičitého skla na teplotě [2].



4.2 Hustota skla

Při tavení skla je významnou veličinou hustota, vyjadřuje se obvykle v $g \cdot cm^{-3}$. Je funkcí teploty a úzce souvisí s chemickým složením skla a jeho tepelné minulosti. Prvky alkalických zemin jako *Ca Sr Ba* zvyšují hustotu skla, nejvíce však prvky jako je zinek, kadmium, thalium, bismut a olovo. Znalost průběhu hustoty v závislosti na teplotě je důležitá hlavně pro homogenizaci skloviny v tavící peci. Rozdíly teplot ve sklovině vytvářejí gradienty hustoty, které napomáhají proudění a následnému míchání roztavené vsázky. Z obr.4.2-1 je patrné, že hustota s rostoucí teplotou klesá. Za normální teploty kolísá hustota křemenného skla mezi $2,20 - 2,22 g \cdot cm^{-3}$. Velikost tohoto intervalu záleží na hustotě uspořádání strukturní sítě skla, která se mění způsobem výroby. Hustota se dá stanovit experimentálně i výpočtem s jednotlivých složek ve vsázce.[2] ,[3] ,[5] ,[11] Metody stanovení hustoty se nachází v literatuře [5]. U běžných průmyslově vyráběných křemičitých skel se hustota pohybuje od 2,2 do $6 g \cdot cm^{-3}$. Nejběžnější obalová a tabulová skla mají hustotu okolo $2,5 g \cdot cm^{-3}$, některé typy skel s jejich hustotami za pokojové teploty jsou uvedeny v tab. 4.2-1.

Obr.4.2-1: Hustota skelného SiO_2 a B_2O_3 v závislosti na teplotě [2]



Tab. 4.2-1: Hustoty některých skel, hodnoty jsou uvedeny v $g \cdot cm^{-3}$ [2] ,[3] ,[5]

Sodnodraselný křišťál	2,5
Olovnatý křišťál (30% PbO)	3,0
Ploché sklo	2,5
Obalové sklo	2,48 – 2,5
Simax	2,23
Sial	2,40
Žárovkové sklo	2,52

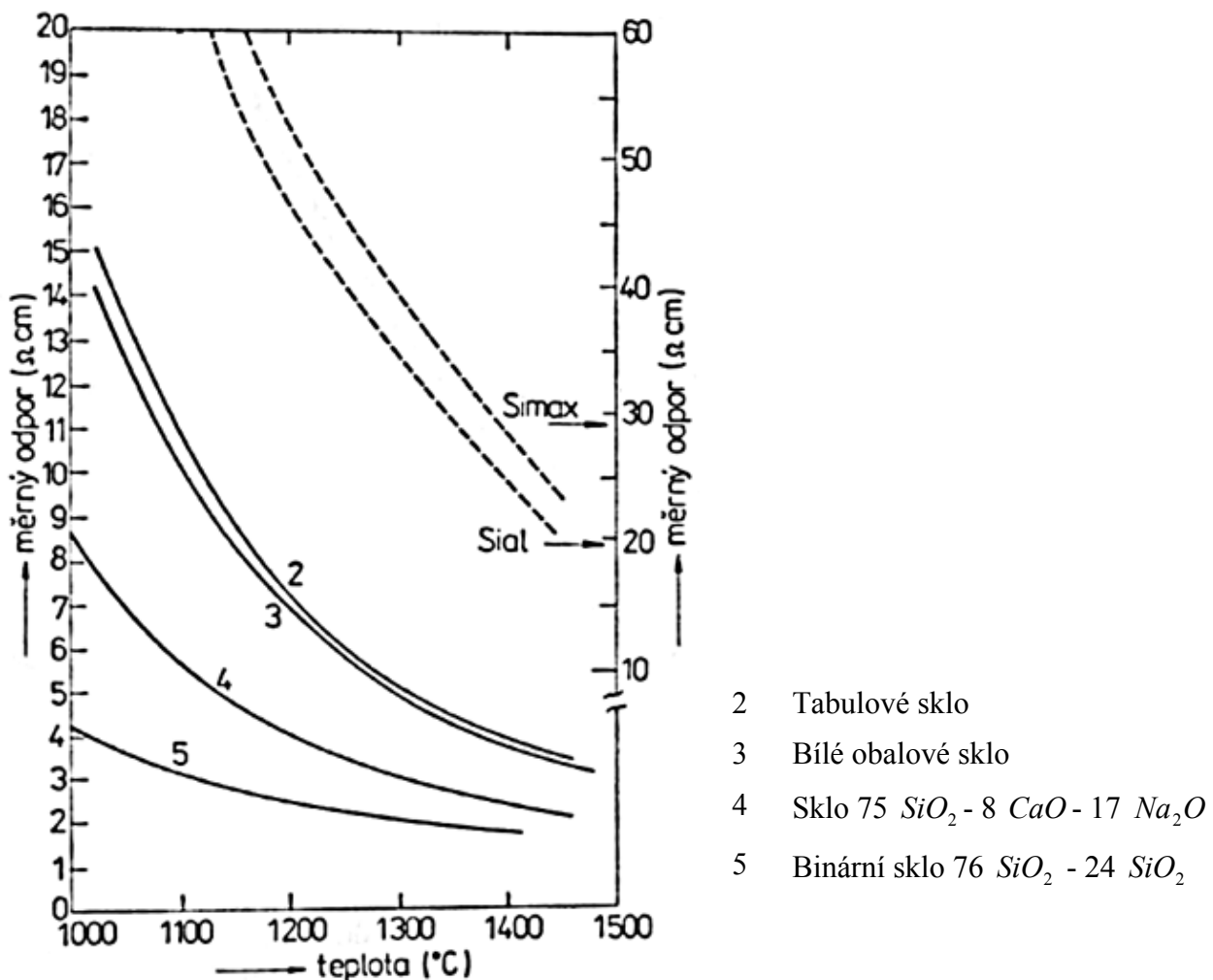
4.3 Elektrické vlastnosti skla

Za pokojové a mírně zvýšené teploty je sklo dobrým izolantem. Zatímco za vysokých teplot v roztaveném stavu dobře vede proud. Těto skutečnosti se využívá hlavně při tavení, kdy je možné sklovinu, až dosáhne určité teploty, ohřívat pomocí průchodu elektrického proudu. S rostoucí teplotou roste i elektrická vodivost a klesá měrný odpor skla podle rovnice (8). Kde χ představuje elektrickou vodivost, χ_0 elektrickou vodivost za počáteční teploty a E vyjadřuje aktivační energii. R reprezentuje plynovou konstantu a T absolutní teplotu.[2]

$$\chi = \chi_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (8)$$

V transformačním intervalu vykazuje průběh závislosti elektrické vodivosti na teplotě diskontinuitu a nedá se řídit vztahem (8). Měrný odpor skla závisí také na chemickém složení. Křemenná skla nebo skla s obsahem oxidu olova mají vysoký měrný odpor. Průběhy závislosti měrného odporu na teplotě u různých skel je vyobrazen na obr 4.3-1, kde křivka 2 představuje tabulové sklo, 3 bílé obalové sklo, 4 Sklo 75 SiO_2 - 8 CaO - 17 Na_2O a 5 Binární sklo 76 SiO_2 - 24 SiO_2 [2], [3] Více o elektrické vodivosti skla v literatuře [2] a [3].

Obr.4.3-1: Měrný odpor vybraných typů skel [2]



4.4 Tepelné vlastnosti a teplotní roztažnost

Asi nejvýznamnější vlastností skla z pohledu praktického využití je tepelná roztažnost skel. Má vliv na odolnost proti teplotnímu rázu skleněných výrobků, ale hlavně je důležitá pro spojování skla s jiným sklem, kovem nebo keramikou. Aby bylo možné spojit dvě různá skla musejí mít podobnou teplotní roztažnost. Na obr.4.4-1 je praktický pokus spojení skel s různou teplotní roztažností v různém rozmezí. S obrázku je patrné, že skla po vychladnutí popraskají. Zatímco obr.4.4-2 představuje úspěšné spojení rozdílných skel, jejichž délkové teplotní roztažnosti α_{20-300} se neliší více než je povolený interval, který je obvykle $\pm 0,2 \cdot 10^{-6}$.

Obr.4.4-1: různá teplotní roztažnost



Obr.4.4-2: stejná teplotní roztažnost



Teplotní roztažnost se stanovuje dilatometricky, experimentálně nebo lze hlavně u křemičitých skel vypočítat délkovou teplotní roztažnost na základě výpočtu podle hmotnostních zlomků chemického složení. Více v literatuře [2]. Koefficient délkové roztažnosti se značí α a musí být stanoveno pro jaký interval teplot platí, nejčastěji je to 20-300 °C a značí se potom jako α_{20-300} . Koefficient objemové roztažnosti se značí β a platí vztah $\beta = 3 \cdot \alpha$. Koefficient délkové teplotní roztažnosti α je definován jako přírůstek délky skleněné tyčinky, dlouhé 1 cm, která je ohřátá o 1 °C v daném intervalu teplot. Tuto skutečnost popisuje rovnice (9). Kde L_1 a L_2 představují délky skleněné tyčinky při teplotě t_1 a t_2 . Tyto teploty představují také interval měřených teplot. [10],[2],[4]

$$\alpha_{(t_1-t_2)} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \quad [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (9)$$

Tento vztah platí pouze pro vychlazené sklo a v rozsahu teplot, který se nachází pod transformačním intervalem. Tím se rozumí, kdy je sklo v pevném stavu. Tady je závislost

roztlačnosti na teplotě téměř lineární. Celková délka prodloužení skleněné tyčinky L_t v teplotním intervalu Δt , který se rovná $t_2 - t_1$ je vyjádřena rovnicí (10). Kde L_0 představuje původní délku.[4]

$$L_t = L_0 + L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad [mm] \quad (10)$$

Celkový objem zvětšený přírůstkem teploty $\Delta t = t_2 - t_1$ je upraven rovnicí (11). Kde V_0 představuje původní objem skleněné krychličky.[4]

$$V_t = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t) = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta t) \quad [mm^3] \quad (11)$$

Koeficienty teplotních roztlačností jsou pro různá skla většinou výrobci uváděny ve tvaru α_{20-300} . Je možné se setkat i s hodnotami které byly stanoveny v jiném teplotním intervalu než je $20-300^\circ C$. Aby bylo možné u skel porovnat koeficienty teplotních roztlačností, musí být ve stejném teplotním rozmezí. Více o tomto problému v literatuře [2].

Nejpoužívanější a nejpřesnější metodou ke stanovení délkové roztlačnosti skla je v dilatometru. Skleněná tyčinka o určité délce se vloží do zatavené trubice z taveného křemene. Jedním koncem je pevně opřena o dno a druhý konec tlačí na čidlo, které zaznamenává přírůstek délky. Dilatometr a zvětšený vzorek je na obr.4.4-3 a 4.4-4. [10],[2],[4]

Obr.4.4-3:Dilatometr celkový pohled [10]

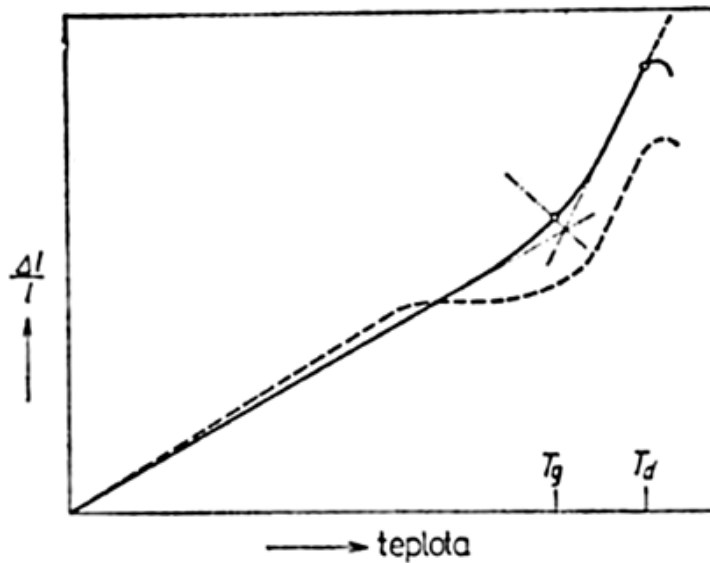


Obr. 4.4-4:vzorek [10]



Tímto měřením se také získá transformační teplota T_g a teplota deformace M_g . Dilatační křivka některých skel je znázorněná na obr.4.4-5. Křivka vyznačená čárkovaně v tomto obrázku odpovídá sklu s vnitřním napětím, ta má pod teplotou T_g nepravidelný průběh. To je způsobeno vzrůstající hustotou skla v oblasti chladících teplot. Křivka která, je zobrazena plnou čarou odpovídá vychlazenému sklu bez vnitřního napětí. Délkové teplotní roztažnosti některých skel jsou uvedeny v tabulce 1tr. [10],[2],[4]

Obr.4.4-5: Dilatační křivka skla [2]



Tabulka 1tr z [2] délkové roztažnosti některých skel.

Druh skla	$\alpha_{20-300} \cdot 10^{-7}$
Český křišťál (sodnodraselný)	90 - 96
Ploché a obalové sklo	80 - 90
Unihost	98
Teploměrové sklo PN	82
Simax (Pyrex)	33
E-sklo (Eutal)	52
Křemenné sklo	6,7

4.5 Krystalizační schopnost

Sklo může za vhodných podmínek vykristalizovat především za dlouhé výdrže na teplotě ve které je schopné tvarování. Toto rozmezí teplot se dá definovat pomocí viskozit jako interval 10^3 až 10^8 $dPa \cdot s$ pro dané sklo. Tvarování proto musí být dostatečně rychlé aby krystalizace nemohla nastat. [10], [2] Tato skutečnost je u skel nežádoucí nejen z hlediska vzhledu, kdy se hovoří o tak zvaném „odsklení“, ale i s hlediska mechanického. Krystalky vytváří lokální mechanická napětí, při kterém může sklo vlivem ochlazování prasknout, nebo alespoň ztrácí na pevnosti.[2] Příklad „odsklení“ je vyobrazen na obr.4.5-1. Pro srovnání je na obr.4.5-2 stejný kus skla ale neodsklený. Z obrázků je patrné, že se odsklení vyznačuje zmatněním povrchu a může dojít až k úplné ztrátě průhlednosti u čírého skla. Oba obrázky byly pořízeny za stejných světelných podmínek.

Obr.4.5-1:odsklení

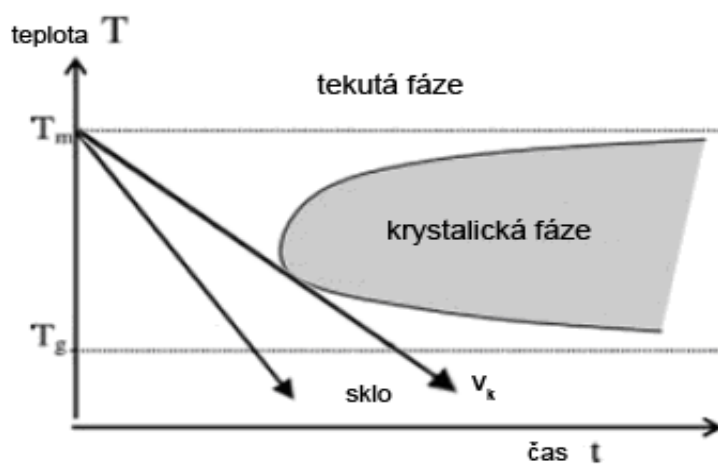


Obr.4.5-2:bez odsklení



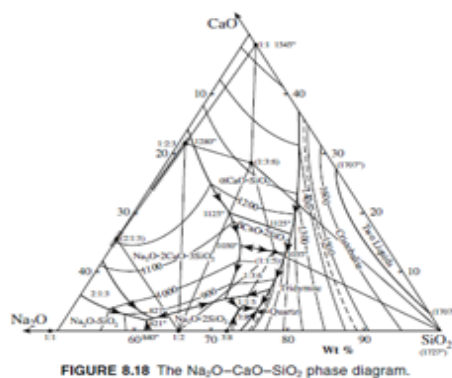
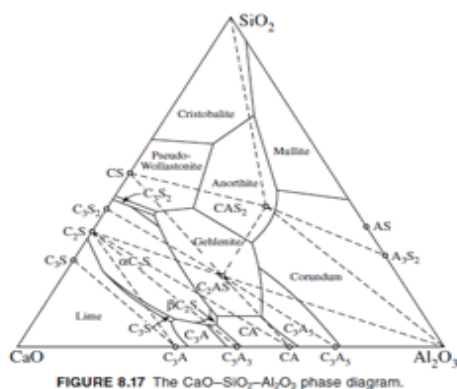
Pro běžnou praxi ze sklem je potřeba znát , že rychlost ochlazování přes transformační interval musí být rychlejší než 10^{-2} až $10^{-3} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ aby nedošlo ke vzniku krystalků. Krystalická ochlazovací rychlost v_k je znázorněna v obrázku 4.5-3. [10]

Obr.4.5-3: Krystalická ochlazovací rychlost [10]

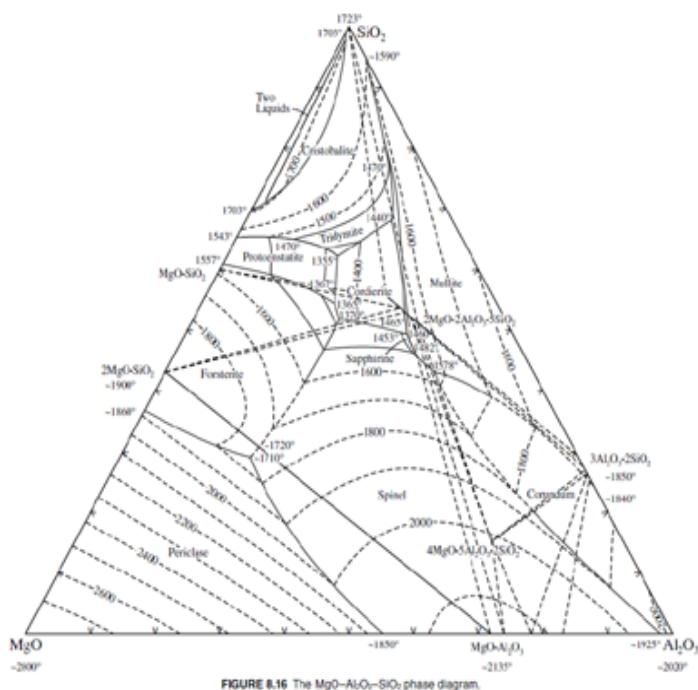


Schopnost skla krystalizovat se dá popsat veličinami jako jsou, teplota liquidu, rychlost nukleace a rychlost růstu krystalů. Teplota liquidu se dá charakterizovat jako teplota tání, kdy jsou obě fáze, pevná i kapalná, v rovnováze. Nad touto teplotou nemůže nastat krystalizace. Pro určení teploty liquidu pro vícesložková skla byly sestaveny fázové diagramy, jejichž příklady jsou uvedeny na obrázcích 4.5-4 a 4.5-5.[2]

Obr.4.5-4: Fázové diagramy $CaO - SiO_2 - Al_2O_3$ a $Na_2O - CaO - SiO_2$. [8]



Obr.4.5-5: Fázový diagram $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ [8]



Crystalline Phases	
Notation	Oxide Formula
Cristobalite	SiO ₂
Tridymite	
Protoenstatite	MgO·SiO ₂
Forsterite	2MgO·SiO ₂
Periclase	MgO
Spinel	MgO·Al ₂ O ₃
Corundum	Al ₂ O ₃
Mullite	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂
Cordierite	2MgO·2Al ₂ O ₃ ·5SiO ₂
Sapphirine	4MgO·5Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂

Z těchto diagramů lze nejen určit teplotu liquidu, ale také různé fáze, která se během ochlazování vytvářejí. Krystalky se nevytvářejí v celé hmotě skla najednou, v určitých místech se nejprve objeví zárodky (nuklea), jež pak rostou do okolní taveniny. Rychlost nukleace se vyjadřuje počtem zárodků vzniklých v jednotce objemu za jednotku času. Rychlost růstu se udává rychlostí posunu fázového rozhraní do taveniny v $cm \cdot s^{-1}$ nebo v $\mu m \cdot min^{-1}$. [2]

5 Výroba plochého skla

5.1 Historie výroby plochého skla

První zdokumentovaná zmínka o plochem skle je z I.stol.nl.Tehdy byla pravděpodobně sklovina lita do ploché formy a uhlazena do tvaru desky.S vynálezem sklářské píšťaly se zlepšila kvalita plochého skla.V našich zemích se technologie výroby plochého skla roztáčením používána v malé míře až do 20.století.[16]

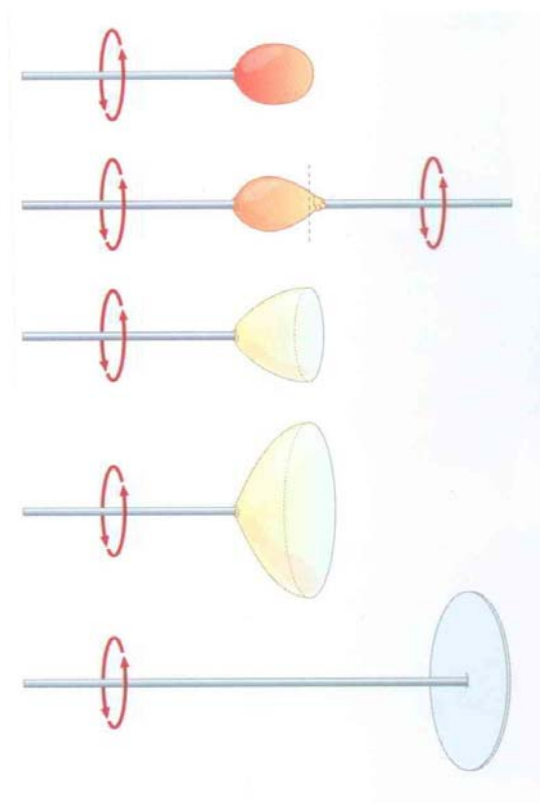
5.1.1 měsíční sklo

Na píšťale se vyfoukla baňka,ta se roztočila,po dosáhnutí vhodné velikosti se připevnila na lepicí želízko a od píšťaly se oddělila opuknutím.Po znovuzahřátí byla baňka na otevřeném konci dřevěným přípravkem rozšířena, a k dalšímu tvarování docházelo po znovuzahřátí rotací.Vzniklý kotouč, zvaný měsíc, byl uložen do chladicí pece. Po vychlazení z něj byly vyřezány destičky patřičné velikosti. Zesílené středy byly využity pro zasklívání oken. Tato technologie navazovala na jednodušší způsob korunového skla.[16]

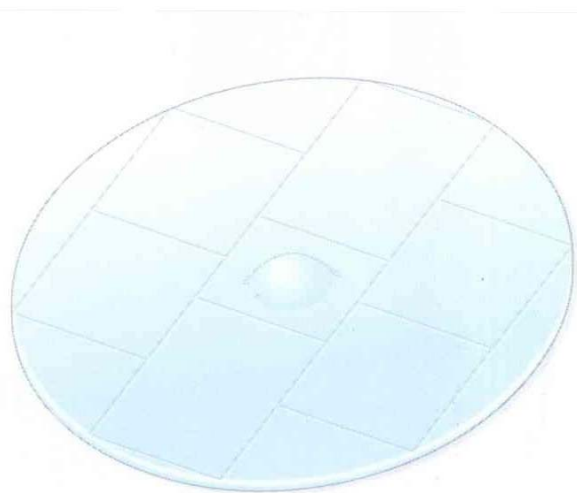
5.1.2 Korunové sklo

Na píšťale se tavenina roztočila, nalepila středem dna na druhou píšťalu v ose, odstříhala, prohřála a okraje se srovnaly do plochy. Vzniklé terčíky se zasazovaly do olova. Toto sklo bylo tenčí než lité do formy a mělo kvalitní ohněm leštěný povrch.[16]Schéma tohoto postupu je na obr.5.1.2-1.Způsob vyřezání destiček z takto vzniklého skla je potom na obr.5.1.2-2.

Obr.5.1.2-1:Schéma výroby korunového skla [17]



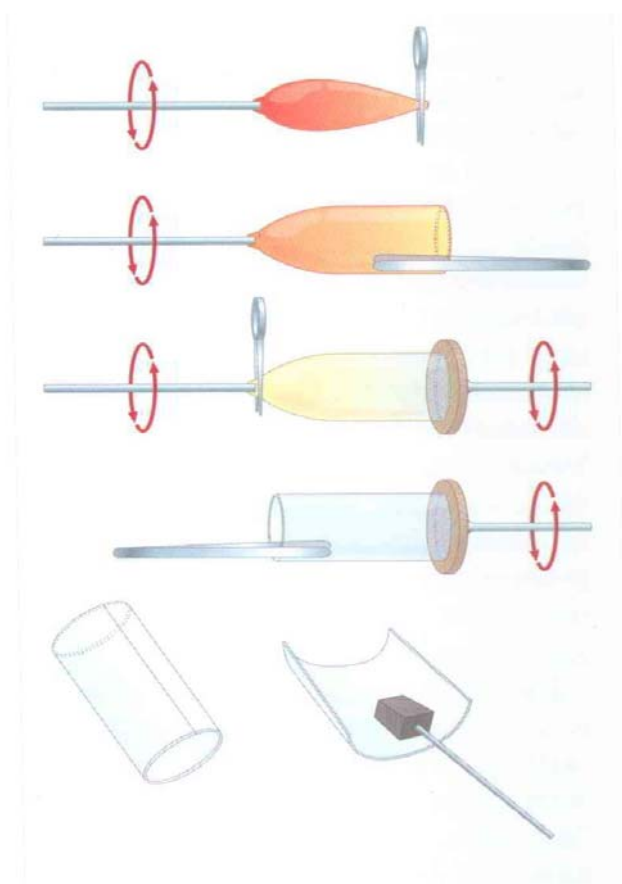
Obr.5.1.2-2: Způsob vyřezání destiček [17]



5.1.3 Výroba plochého skla ze skleněných válců

Je známa asi od 10.stol, a od druhé pol. 14.stol proslavili tuto technologii čeští skláři. Pomocí sklářské píšťaly se nabírala z pánve tavenina, i více náběrů a vyfoukla se baňka. Ta se pomalu protahovala na maximum komíháním píšťaly se sklovinou nad pracovní jámou. Sklovina se stále nahřívala. Vytvořil se válec asi 1500 mm dlouhý o stěně 3 mm. Na konci vzdáleném od píšťaly se otevřely jeho okraje a nůžkami se srovnaly. Opuknutím se tavenina od píšťaly podélně rozdělila a vyrovnala v rovnací peci pomocí dřevěného bidla. Tabule nakonec byla přenesena do chladicí pece. Postupem času se dala touto metodou vytvořit válec až 3000 mm dlouhý a zvětšovala se i jeho tloušťka. Schématický postup této výroby je na obr.5.1.3-1. [16]

Obr.5.1.3-1:Schéma výroby plochého skla ze skleněných válců [17]



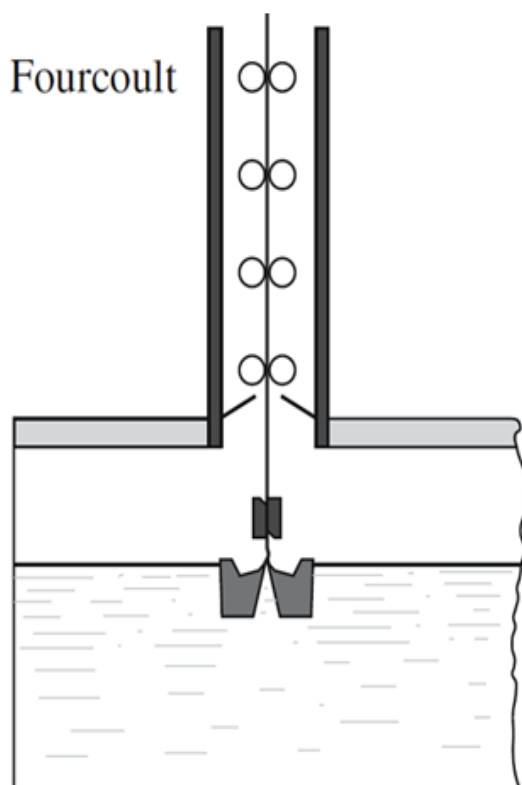
5.1.4 Výroba plochého skla litého a válcovaného na stole

Vznikla v druhé polovině sedmnáctého století, a to ve Francii. Pánev s utavenou sklovinou se vyjmula z tavicí pece a překlopením se její žhavý obsah vytil na vodorovnou kovovou desku licího stolu. Těžkým kovovým válcem se pak tavenina vytvarovala do podoby tabule s tloušťkou dle výšky kovových lišt umístěných na obvodu licí desky. Vynálezcem této první manufakturní výroby byl Bernard Perrot. Snaha o první strojní výrobu plochého skla pokračovala mechanizací dílčích operací. [16]

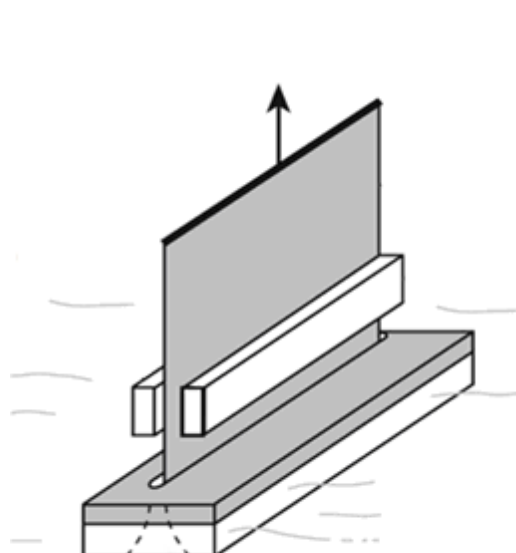
5.2 Fourcoulťův způsob

Způsob výroby plochého skla Fourcoulťovým způsobem spočívá v nepřetržitém tažení skleněného pásu vertikálním směrem přes šamotovou výtlačnici. To je součást tvaru kvádrů s podélným otvorem, která je pomořená ve sklovině. Výtlačnice je znázorněna na obr.5.2-1 a nákres Fourcoulťova způsobu tažení na obr.5.2-2. Vlivem hydrostatického tlaku od skloviny a mechanické síly od tažného mechanismu je sklovina protlačena otvorem ve výtlačnici a začíná tvořit skleněný pás. Ten je ochlazen průtokovým chladičem umístěným nad výtlačnicí a následně táhnut do svislé šachty, která slouží jako chladičí pec. Finální fáze probíhá nad šachtou po ochlazení, kde je ploché sklo odřezáno a nalámáno na příslušné formáty. Tímto způsobem se dá vyrobit ploché sklo o šířce pásu nejčastěji od 1600 mm do 2500 mm a tloušťce od 1,2 do 9 mm. [14],[13].

Obr.5.2-2: Fourcoulťův způsob tažení [8]

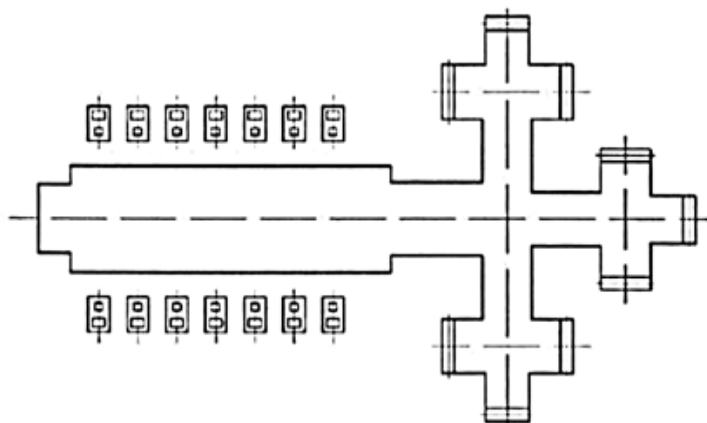


Obr.5.2-1: Výtlačnice [8]



Sklovina, roztavená v kontinuálních tavících agregátech, je do podstrojové komory přiváděna soustavou kanálů. Nad podstrojovou komorou je zpravidla umístěno více tažných zařízení, nejčastěji 3 až 9, jejich rozmístění je patrné z obr.5.2-3. Celá šachta s tažným zařízením může být vysoká i více než 10 m v závislosti na typu zařízení. Hlavní nevýhodou takto vyráběného skla je možnost výskytu nežádoucích bublin nebo čárek nazývaných „optika“ které jsou způsobené povrchem šamotové výtlačnice. [14],[13].

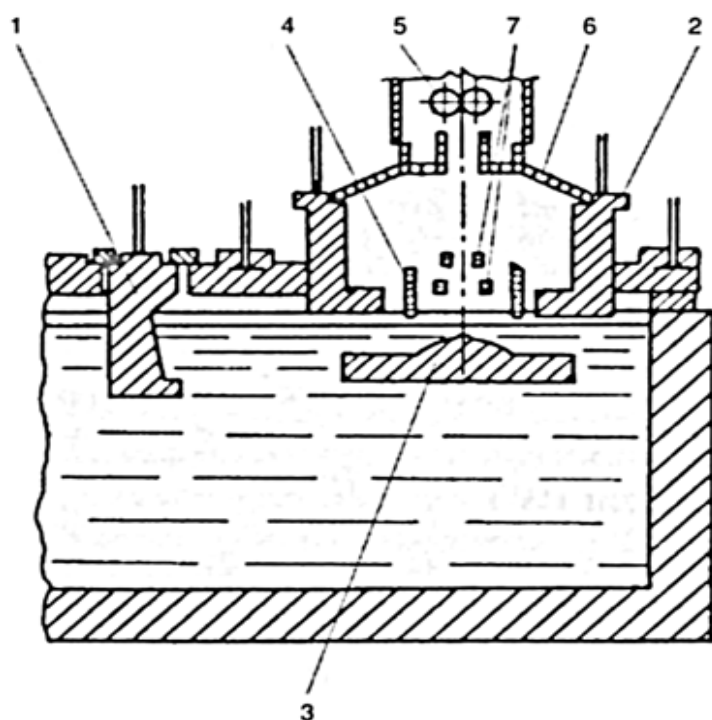
Obr.5.2-3: Půdorysné schéma kontinuální tavící pece vybavené devíti tažnými stroji [13]



5.3 Způsob tažení Pittsburgh

Způsob produkce plochého skla metodou Pittsburgh je dalším vývojovým stupněm výroby. Tato metoda vznikla ve snaze eliminovat nežádoucí optické vady na skle způsobené výtlačnicí při Fourcoultové způsobu výroby. Obě tyto metody jsou založeny na stejném principu vertikálního tažení pásu skla ale mají jisté odlišnosti. U metody Pittsburgh je podstrojová komora uspořádaná jak je uvedeno na obr.5.3-1.[13],[14]

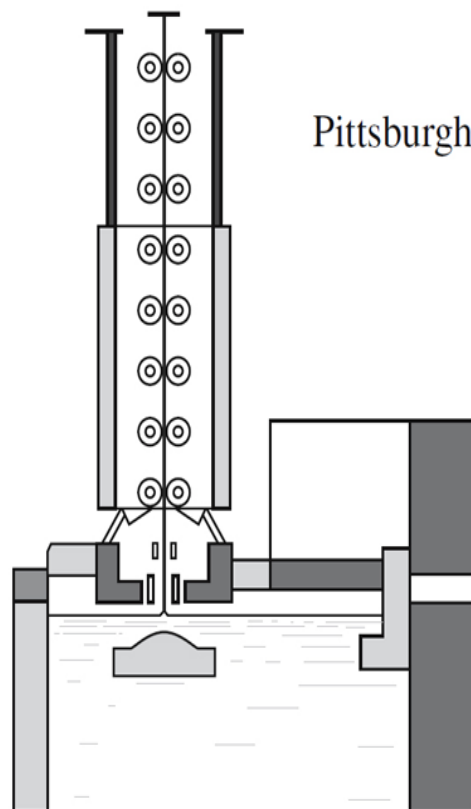
Obr.5.3-1: Řez podstrojovou komorou systému Pittsburgh



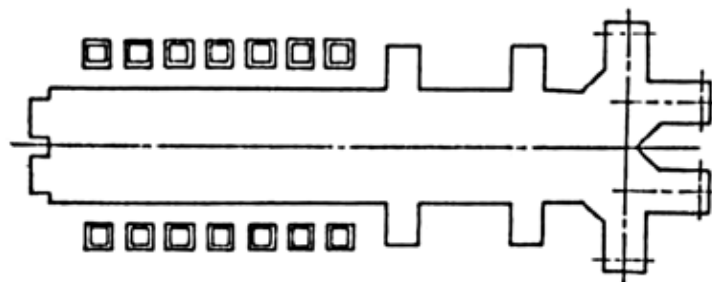
- 1-pohyblivý most
- 2-L-bloky
- 3-ponorný blok
- 4-vodní chladiče
- 5-tažné válce
- 6-horní uzávěr podstrojové komory
- 7-přidavné chladiče

Podstrojová komora je vymezena dvěma šamotovými tvárnicemi ve tvaru L, které tvoří stěny tažné komory. Ponorný blok, který zajišťuje funkci výtlačnice je umístěn pod hladinou skloviny a odděluje sklovinu připravenou k tažení od zbývající. Uchycená sklovina je následně tažena nahoru pomocí tažných válců a chlazena průtokovými chladiči umístěnými nad hladinou. Rychlost tažení je srovnatelná se systémem fourcoults a to od 23 až po 100 metrů za hodinu v závislosti na tloušťce skleněného pásu. Čím je větší tloušťka tím je nižší rychlost. Sklovina roztavená přibližně na 1600 °C je přiváděna do více podstrojových komor k tažným mechanismům způsobem znázorněným na obr.5.3-2. Na obr.5.3-3 je potom vyobrazen náčrt systému tažení plochého skla pro čtyři tažné stroje metody Pittsburgh . [13],[14]

Obr.5.3-2: Způsob tažení Pittsburgh [8]



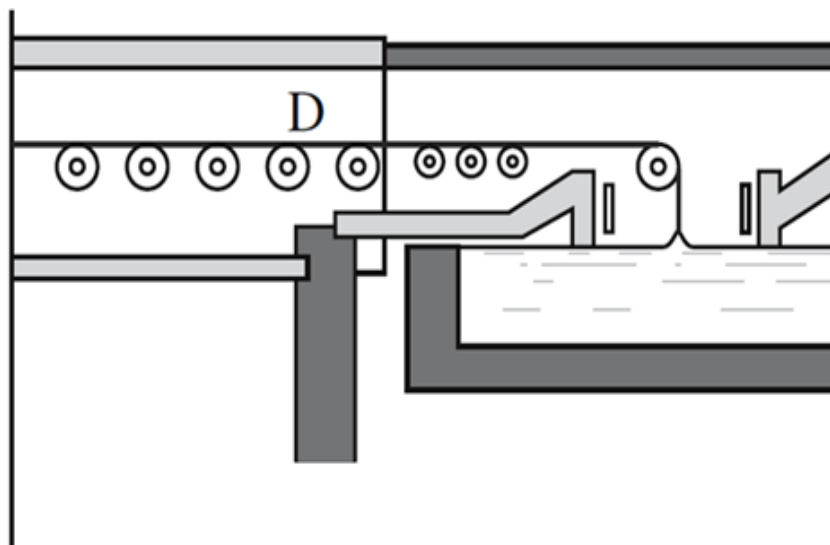
Obr.5.3-3: Rozmístění čtyř tažných strojů metody Pittsburgh [14]



5.4 Způsob Libbey-Ovens

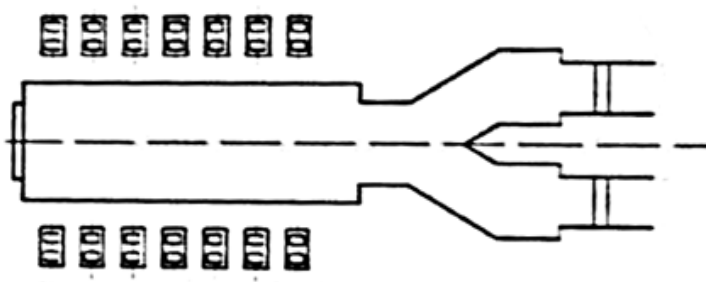
Dalším způsobem kontinuálního tažení plochého skla je způsob Libbey-Ovens vyvinutý ve Spojených státech. Spočívá v tažení skla horizontálním směrem bez použití výtlačnice ve sklovině. Tažené sklo směřuje napřed vertikálním směrem ale přibližně 400 až 600 mm nad sklovinou se ohýbá, ještě za tvárného stavu, do horizontálního směru pomocí válce. Tento dutý válec s leštěným povrchem vyrobený z legované oceli má i funkci chladiče. Proudí jím chladný vzduch a tím způsobí snížení teploty skla a zabrání přilepení skloviny. Nad hladinou skloviny a pod válcem jsou ještě umístěny přídavné vodní průtokové chladiče. Celý proces je vyobrazen na obr.5.4-1. Výhodou tohoto způsobu produkce plochého skla je možnost výroby tloušťek od 0,5 až do 30 mm, protože horizontální tažení není tolik limitováno tíhou samotného skla.[13],[14],[8]

Obr.5.4-1:Libbey-Ovens způsob tažení [8]



Roztavená sklovina je přiváděna nejčastěji do dvou podstojových komor , náčres provedení je na obr.5.4-2. Délka tažení je přibližně 70 m. Na konci procesu, po vychladnutí, je sklo řezáno a lámáno na příslušné formáty. [13],[14],[8]

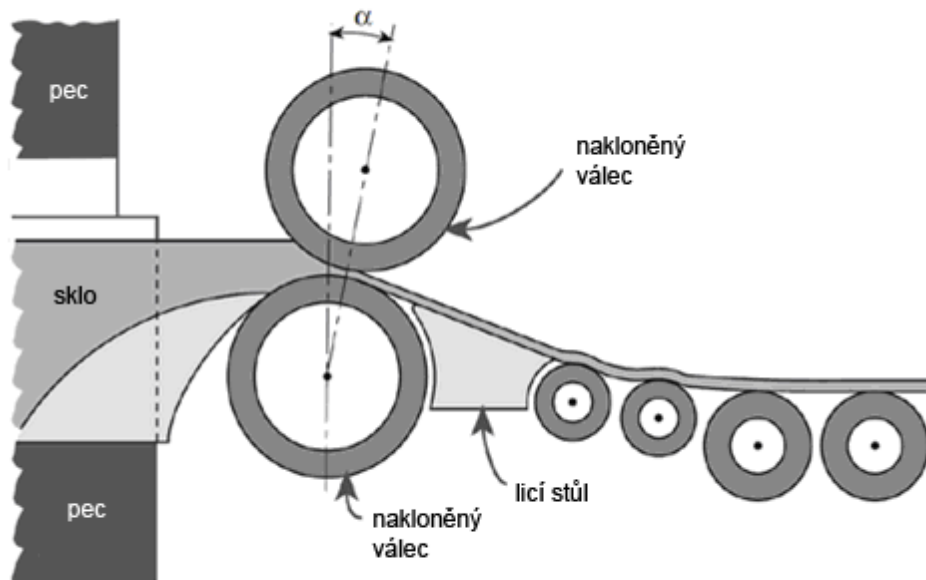
Obr.5.4-2:Půdorys Libbens-Owensovy pece se dvěma předkomorami a dvěma tažnými komorami. Z [13]



5.5 Lití plochého skla

Tato metoda výroby plochého skla vzniká samovolným stékáním skloviny na dva vnitřně chlazené válce které, sklovinu ochladí a rozválčí. Touto metodou se nedá docílit příliš kvalitního skla z hlediska optických vlastností. Takové sklo bývá se spoustou vad díky nedokonalostem válců. Před vyvinutím dokonalejších technik výroby skla se takto vyrobená skla brousila a leštila pro lepší optické vlastnosti. V dnešní době se tato metoda používá pro výrobu skel se vzorkem. Ve válci je vyrytý vzorek, který se pak přenáší do skloviny, kde zůstane otisk. Touto metodou se také vyrábí bezpečnostní drátosklo, kdy je přímo mezi válce podávána drátěná síť. Po válcování sklo musí projít chladicí pecí a potom je rozřezáno a rozlámáno na příslušné formáty. [13],[14],[8]Schéma způsobu kontinuálního lití je znázorněn na obr.5.5-1.

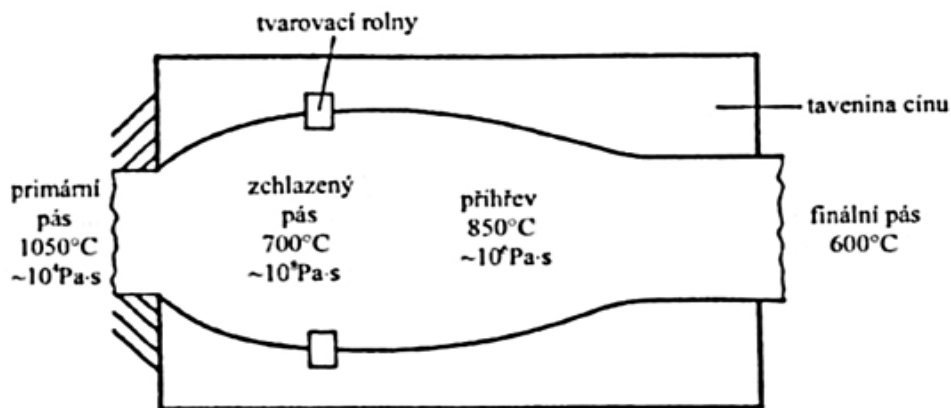
Obr.5.5-1:Kontinuální lití plochého skla [8]



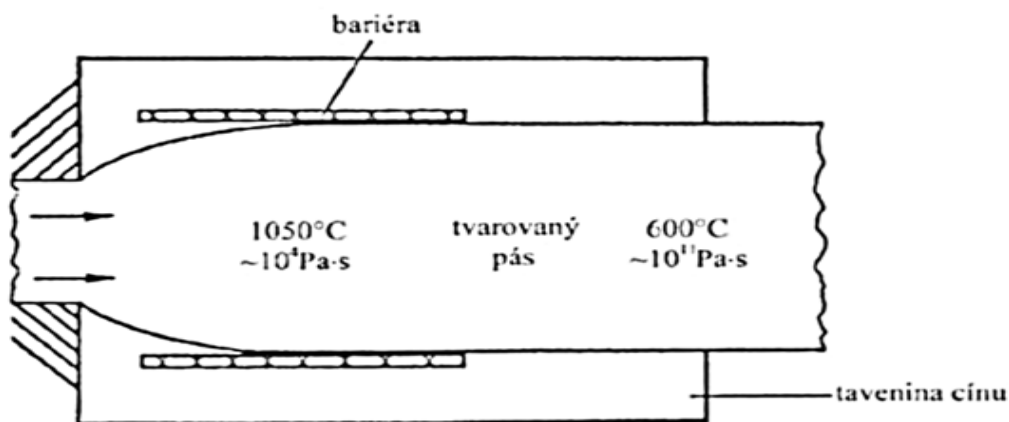
5.6 Výroba plaveného skla

Výroba plochého skla metodou plavení Float je postavena na principu tažení a tvarování skloviny přes tavicí lázeň z roztaveného kovu, který má vyšší měrnou hmotnost než sklo, ale jeho teplota tání je nižší. Tyto předpoklady splňují kovy jako je olovo, cín nebo vizmut. Tímto způsobem výroby se dosahuje nejlepších optických vlastností skla ve srovnání s jinými kontinuálními tažnými metodami. Přivedená sklovina na hladinu cínu vytvoří pás, který má hladké obě strany vlivem rozlití skloviny. Tento pás se potom buď rozšiřuje pomocí tvarovacích válců (obr.4.6-1) nebo smršťuje pomocí tažení přes šamotové mantinely (obr.4.6-2) Tento děj se vytváří pro regulaci tloušťky skleněných tabulí. Následně se nekonečný pás přivádí do chladicí pece, kde je postupně ochlazován, aby se vyrovnalo pnutí ve skle. Výstupní skleněné tabule jsou zrcadlové kvality bez optických vad. To je způsobeno právě plavením přes roztavený cín, který nenechává na povrchu skloviny vlivem tření žádné škrábance nebo jiné vady.[13],[14]

Obr.4.6-1: Výroba tenkého plaveného skla [13]



Obr.4.6-2: Výroba plaveného skla o tloušťce větší než rovnovážné [13]



Sklovina u procesu Float musí splňovat kvalitativní požadavky jak na vstupní materiály tak na homogenitu a dobré protavení bez bublinek. Chemické složení v hmotnostních zlomcích některých skel vyráběných touto metodou jsou uvedeny v tab.4.6-1. Údaje uvedené v této tabulce jsou od čtyř různých výrobců a je patrné, že se nijak zvlášť neliší. [13],[14]

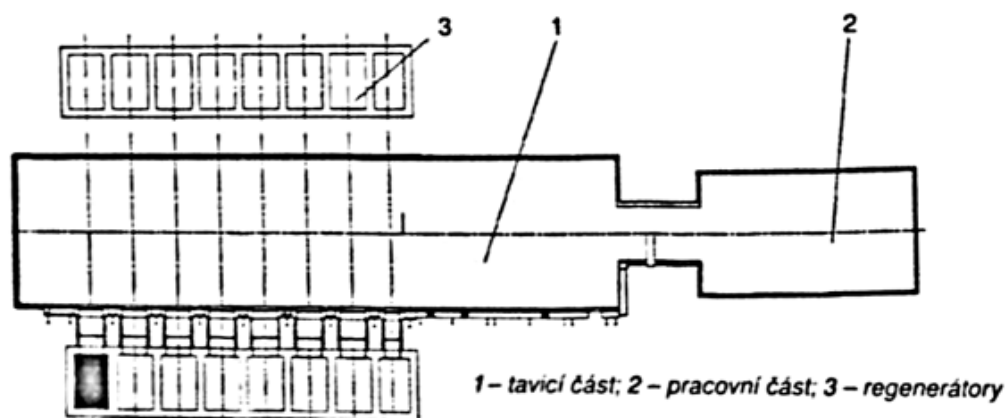
Tab.4.6-1: Chemické složení floatového skla v hmotnostních procentech oxidů [13]

	1.	2.	3.	4.
SiO_2	73,8	73,11	72,98	72,65
Al_2O_3	0,10	0,10	0,12	1,15
CaO	8,00	8,80	8,40	8,20
MgO	3,86	3,95	3,91	3,94
Na_2O	13,83	13,70	13,76	13,04
min*)	0,29	0,32	0,43	0,82

min*) -souhrn obsahu nominálních složek (buď účelově přidanych nebo obsazených v použitých surovinách)

Vstupní materiál o výše uvedeném chemickém složení je roztaven na sklovinu v, zemním plynem nebo lehkým topným olejem vytápěném, kontinuálním tavicím agregátu. Půdorys takového agregátu s osmi hořáky po každé straně je na obr.4.6-3. Na tomto obrázku je také možné vidět regenerátory, které jsou umístěné nad hořáky. Jejich funkce spočívá v předehřívání spalovacího vzduchu hořáku na straně jedné a odvádění kouřových plynů z pece na straně druhé. Práce hořáků se vždy střídá po nějakém čase tak, že zahřívá jedna strana a protilehlá odtahuje spaliny a naopak. U topného oleje je větší výhřevnost a pohybuje se v řádech 35 až 40 tisíc $kJ \cdot m^{-3}$ [13],[14]

Obr.4.6-3: Půdorysné schéma tavicího agregátu [13]



Spotřeba zemního plynu se pohybuje okolo 6000 m^3 za hodinu v závislosti na denním tavicím výkonu, který je u, v dnešní době používaných, pecí s kyslíkovým spalováním přibližně 700 tun utavené skloviny za 24hodin. V těchto pecích probíhá tavicí proces v rozmezí teplot 1200 až $1330 \text{ }^\circ\text{C}$, v závislosti na vstupních materiálech. Za těchto teplot má sklovina nejnižší viskozitu a tudíž i dobré podmínky pro čření a homogenizaci. Roztavená sklovina je potom přiváděna na cínovou lázeň přibližně za teploty $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Za posunování po roztaveném cínu se sklovina postupně ochlazuje až k přibližně $600 \text{ }^\circ\text{C}$, kde už má sklo dostatečně velkou viskozitu pro vyzvednutí pásu z cínové lázně. Za těchto podmínek už nehrozí deformace a poškrábání skla, které může být způsobeno zvedacími válci. Tato metoda pracuje zhruba rychlostí 350 metrů za hodinu. Dále skleněný pás putuje do tunelové chladicí pece, která má za úkol sklo dále ochladit a hlavně zajistit aby trvalé napětí ve skle nepřekročilo přípustnou mez. Vystupující pás s chladicí pece má přibližně teplotu $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Následně prochází mycím zřízením. Tam se omyje horkou užitkovou vodou prostřednictvím rotujících kartáčů, které však nemají se sklem dotyk. Potom se provádí opláchnutí demineralizovanou vodou a následně se skleněný pás suší přiváděním horkého vzduchu. Následuje detekce vad ,prováděná laserem , který zjistí vady na hranici 0,5 mm. Pás nevyhovujícího skla se odřízne a střepuje, zpět do tavicí pece. Sklo které projde kontrolou se následně řeže příčným řezem na příslušné formáty. Okraje těchto formátů se obvykle ořežou podélným řezem a rovněž střepují. Sklo vyráběné procesem Float má velice dobré optické vlastnosti a je čiré. Touto metodou se však dají vyrábět skla i zbarvená nebo barevná, záleží na chemickém složení vstupních materiálů. Následující tab.4.6-2 ukazuje chemické složení různých skel zbarvených do zelena.Sytost odstínu zelené barvy se ve skle zvyšuje se stoupajícím množstvím oxidu železitého. [13],[14]

Tab.4.6-2:Chemické složení zelených skel [13]

Barva skla	Chemické složení								
	SiO_2	Na_2O	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	K_2O	TiO_2
Čiré bezbarvé	71,91	13,57	9,11	4,13	0,075	0,739	0,263	0,139	0,063
Zelené normální	71,45	13,60	8,96	4,12	0,599	0,835	0,209	0,165	0,062
Tmavě zelené	71,50	13,39	9,0	4,09	0,809	0,81	0,18	0,16	0,06
Super tmavě zelené	72,10	13,47	8,5	3,94	0,939	0,659	0,22	0,12	0,05

Velikost běžně vyráběných skel metodou Float je závislá na šíři nekonečného skleněného pásu. Největší šířky se pohybují od 3200 do 5200 mm v závislosti na parametrech celé linky.Tloušťka běžných skel se pohybuje od 1 do 25mm. Mechanické vlastnosti běžných skel vyráběných touto metodou jsou uvedeny v tab.4.6-3 a tepelné vlastnosti stejného skla v tab. 4.6-4. Obrázek 4.6-4 znázorňuje řez částí linky Float. [13] Pro představu o rozměrech je na obr. 4.6-4 vyobrazen celkový venkovní pohled na linku Float společnosti Saint-Gobain v Chennai.Vnitřní pohled na tuto linku je možné vidět na obrázku obr. 4.6-5.

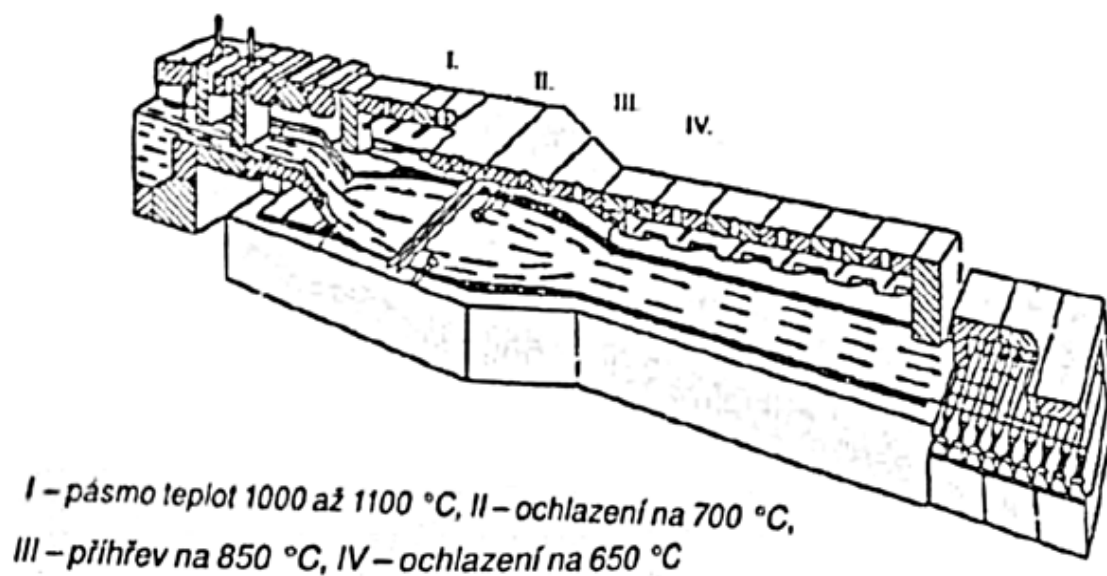
Tab.4.6-3: *Mechanické vlastnosti skla FLOAT [13]*

Vlastnost	Rozměr	Hodnota
Hustota	$kg \cdot m^{-3}$	2499
Pevnost v tlaku	MPa	700-900
Pevnost v tahu	MPa	30-100
Yongův modul	GPa	72
Tvrдость podle Mohse	-	6
Poissonova konstanta	-	0,2

Tab.4.6-4: *Tepelné vlastnosti floatového skla [13]*

Vlastnost	Rozměr	Hodnota
Střední lineární součinitel teplotní roztažnosti $\alpha_{20-300K}$	$[K^{-1}]$	$9,0 \cdot 10^{-6}$
Koeficient tepelné vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	1,0
Odolnost k teplotnímu rázu	$[K]$	40
Měrné teplo při 23,9 °C	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,88

Obr.4.6-4: *Pohled na tvarovací část linky FLOAT [13]*



Obr.4.6-5: Venkovní pohled na linku Float společnosti Saint-Gobain [10]



Obr.4.6-6: Vnitřní pohled na linku Float společnosti Saint-Gobain [10]



6 Zpracování plochého skla

Ploché sklo se dá zpracovávat mnoha způsoby do různých podob. Tato kapitola se bude zabývat pouze možností zpracování plochého skla v peci společnosti H+V MVD Grygov a některým přidruženým zpracování. Využití takto opracovaného skla je rozsáhlé. Především má význam jako krycí a dekorativní prvek do osvětlovacích těles, výplní dveří, oken a jiných výrobků ať už z ohýbaného nebo padaného skla.

6.1 Pec

Pec od společnosti H+V MVD GRYGOV je vybavena 12-ti odporovými topnými spirálami. Každá dává výkon $1kW$. Topný proces je řízen programovým regulátorem HtIndustry, který zajišťuje dané teploty a jejich časové výdrže podle zadané teplotní křivky pro konkrétní účel. Osm těchto spirál je umístěno na stropní části pece, které mají za úkol zajistit základní náběh teploty do zhruba $540\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poté se připojí zbývající 4 spirály které jsou umístěny po stranách. Všechna tyto topná tělesa zajistí dostatečně rychlý průběh teploty přes transformační interval, který se u skla vyráběným metou Float pohybuje nejčastěji mezi $680\text{-}720\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dosáhnou teplot potřebných ke zpracování. Pracovní část pece má šířku 800, hloubku 800 a výšku 500 mm po teplotní čidlo. Stěny jsou izolovány hmotou o obchodním názvu Sibal. Pec v celkovém pohledu je možné vidět na obr.6.1-1 a část se stropními a bočními spirálami na obr.6.1-2 a obr.6.1-3. [18]

obr.6.1-1



obr.6.1-2



Obr.6.1-3



6.2 Metoda spékání Fusing

Metoda spékání Fusing je založena na principu spojování plochého skla o podobném chemickém složení. Hodnota délkové teplotní roztažnosti α_{20-300} takovýchto skel se nesmí lišit o více než $0,2 \cdot 10^{-6}$ jinak by sklo mohlo prasknout po vychladnutí vlivem vnitřního pnutí. Více o tomto problému je uvedeno v kapitole tepelné vlastnosti a teplotní roztažnost v této práci. V anglické literatuře je možné se setkat i s označením COA, nebo v německé ve zkratku AK. Tyto zkratky označují teplotní roztažnost většinou v řádech 10^{-7} v teplotním rozmezí od 20 do 300 °C. Teplotní roztažnosti některých skel vhodných pro metodu Fusing jsou uvedeny v tab.6.2.1. Pro použití metody Fusing pro dekorativní účely, vyplnění stavebních otvorů nebo dveří, či pro osvětlovací tělesa jsou nejvhodnější skla c,d,e,f. Přičemž skla označená jednotlivými písmeny nejsou pro tuto metodu spolu kompatibilní.

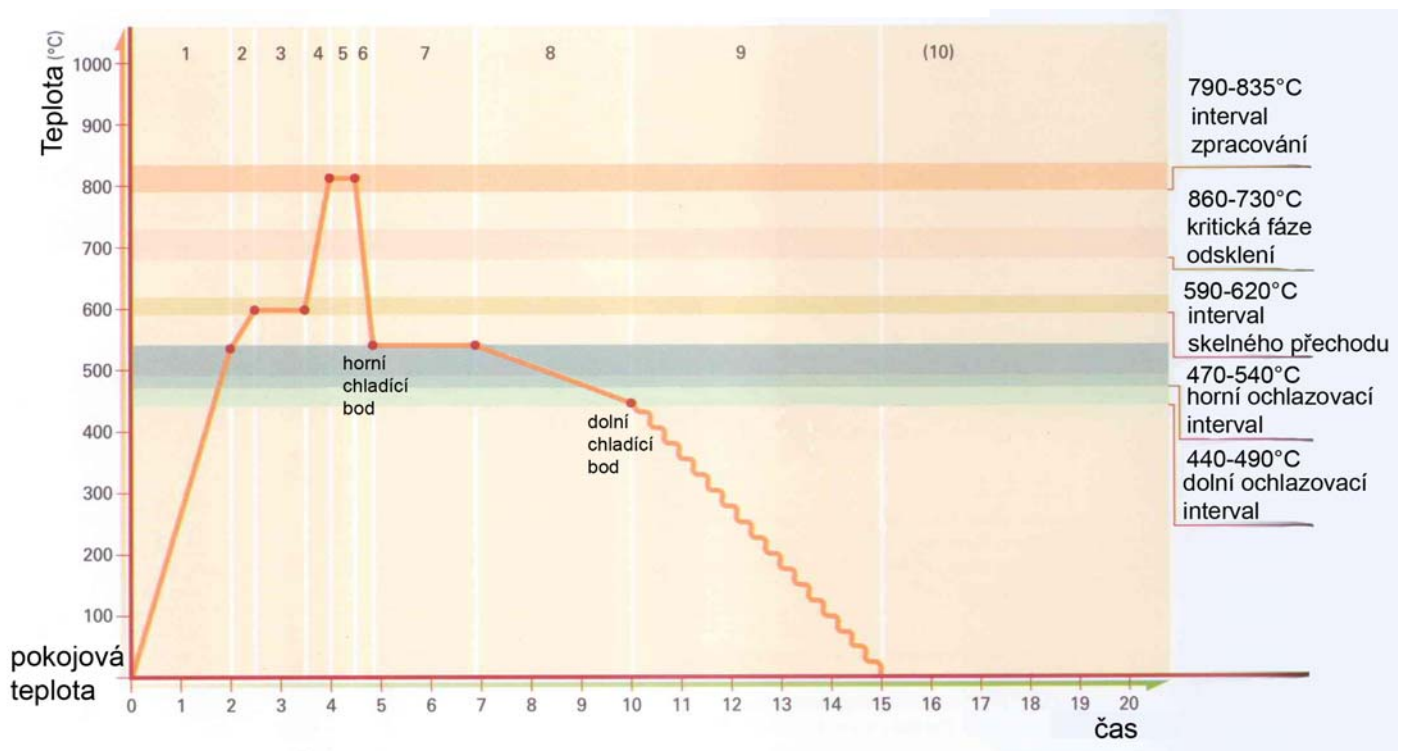
Tab.6.2.1: Teplotní roztažnosti některých skel [18]

	Délková teplotní roztažnost $\alpha_{20-300} \cdot 10^{-7}$	Druhy skla nebo jejich obchodní značky
a	33	Laboratorní nebo varné sklo Duran, Pyrex, Simax
b	50	Nápojové sklo obalové
c	82-86	Sklo vyráběné metodou Float
d	93	Dekorativní skla Bullseye, Artista, Imera
e	96	Dekorativní sklo Spectrum
f	104	Italské dekorativní sklo Murano Glass

Barevná skla ze skupin d,e,f v tabulce 1F jsou vyráběna většinou malosériově metodou lití a válcování, případně je jejich povrch leštěn plamenem pro dosažení lepších optických vlastností. U skupiny skel označených v tabulce 1F písmenem c je důležité pro metodu Fusing provést zkoušku která strana skla byla v kontaktu z cínem, ta se nazývá rub, a tu která v kontaktu nebyla, neboli lícovou stranu. Kontrola se provádí nanesením zředěné kyseliny fluorovodíkové s dusičnanem stříbrným na oba povrchy zkoušeného skla. Vlivem chemické reakce, se zbylým cínem z výrobního procesu, se na rubové straně vytvoří dusičnan cínčitý. Tato sloučenina je neprůhledná a tím indikuje rubovou stranu floatového skla. Tato zkouška se provádí hlavně proto, aby dvě rubové strany nepřišli do kontaktu. Mohlo by dojít k nežádoucím optickým vlastnostem skla. Aby nedošlo k deformaci povrchu musí být sklo při spékání položena na podkladu buď z jemně mletého vápence nebo na podložku z hmoty Sibrál nebo Alsiflex, v případě pecí a výrobků větších rozměrů. U menších pecí nebo výrobků lze použít i rozměrově limitované keramické desky. Keramické desky je třeba natřít růžovým roztokem, který obsahuje jemně mletý vápenec, jež po vypálení změní barvu na bílo. Tento přípravek se označuje obchodním názvem jako Shelf primer. Pro metodu Fusing je nejdůležitější sestavení vhodné teplotní křivky celého procesu, která je závislá na druhu skla, jeho teplotních vlastnostech, jeho tloušťce a rozměrech. Každý konkrétní individuální případ spékání touto metodou má svou ideální křivku, která musí být experimentálně stanovena. Obecná teplotní křivka procesu Fusing je na obr.6.2-1. Z této křivky je patrné, že nárůst teploty je poměrně strmý až do intervalu skelného přechodu kde se sklu začíná klesat viskozita. Více o viskozitě v kapitole viskozita v této práci. Po výdrži následuje zase prudký

vzestup teploty až do intervalu zpracování, kde je viskozita už na takové úrovni, že dovolí sklům se částečně roztéct a spojit se dohromady. Podle potřeby je zvolena výdrž na této teplotě. Za čím větších teplot je pracovní interval tím menší dobu je nutné aby sklo za takového stavu setrvalo. Z tohoto intervalu následuje poměrně prudké ochlazení, aby nedošlo ke krystalizaci skla nazývaného „odsklení“. Rychlost ochlazování musí být rychlejší než 10^{-2} až $10^{-3} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Více v kapitole krystalizační schopnost. Následuje výdrž ke snížení prnutí a následné pomalé dochlazení. Takto vzniklý produkt se potom může dále zpracovávat ať už dále tepelně, ohýbáním nebo padáním, nebo mechanicky pískováním, broušením atd. [18]

Obr.6.2-1: Teplotní křivka pro Fusing [17]



Na obr.6.2-2 je znázorněn základní pokus spečení různobarevných skel touto metodou. Jedná se o skla, která jsou označena v tab.6.2.1 písmenem d. Některé realizace výrobků provedené metodou Fusing, ze skel označenými v tab.6.2.1 písmenem c, jsou potom vyobrazeny na obrázcích obr.6.2-3 a obr.6.2-4. Jedná se o výplně dveří.

Obr.6.2-2:ukázka spečení



Obr.6.2-3:Výplň dveří



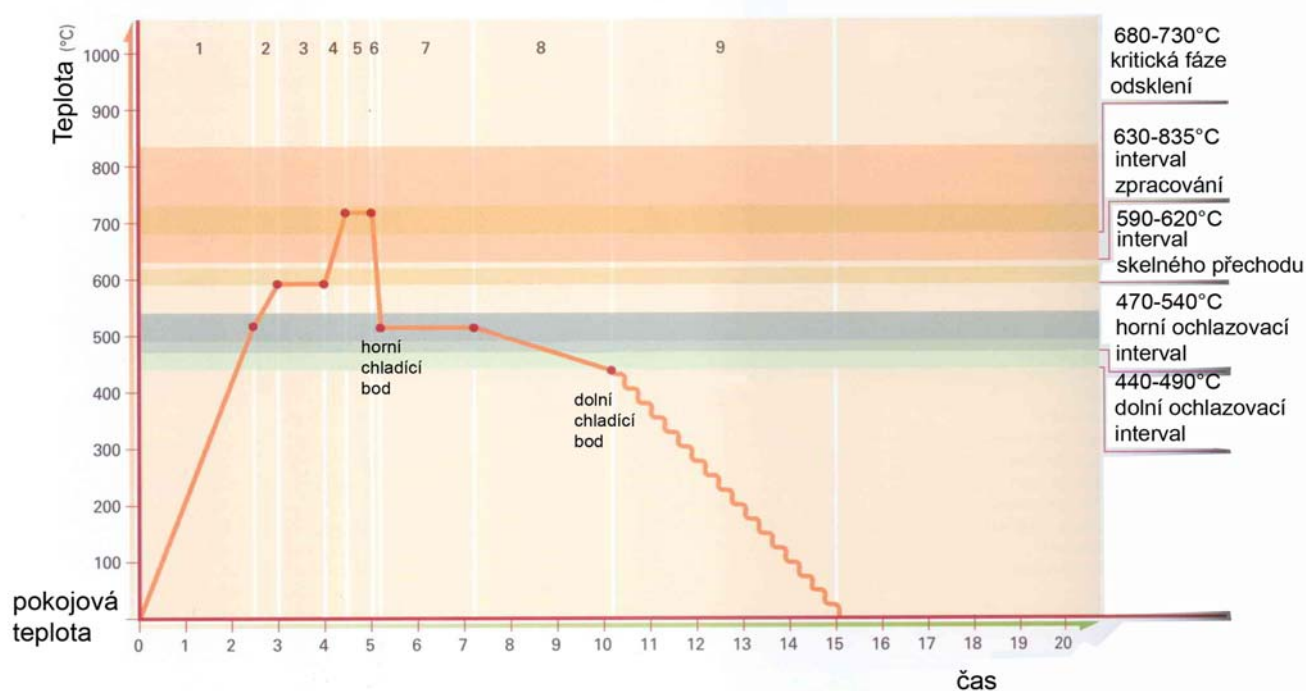
Obr.6.2-3: Výplň dveří



6.3 Metoda ohýbání skla

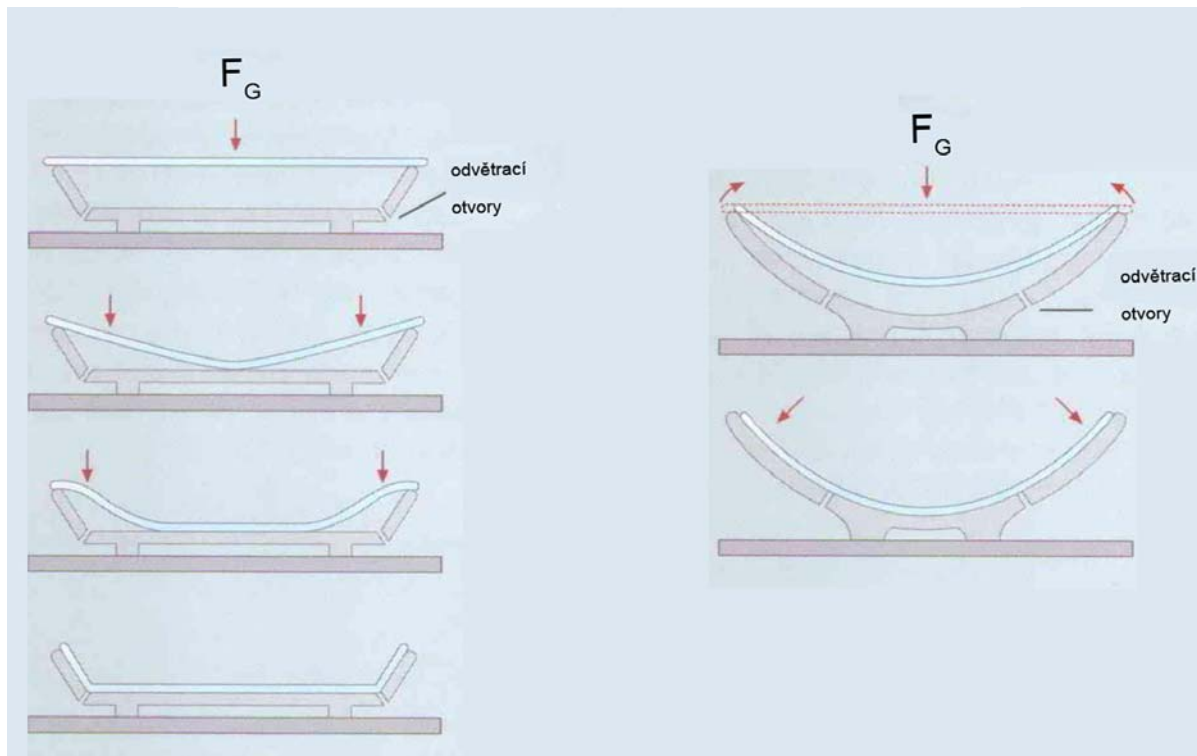
Ohýbání je další metodou zpracování plochého skla. To je vlastní vahou za zvýšené teploty ohnuto přes předem připravenou formu většinou z nerezů. Tato nerezová forma musí být natřena roztokem který obsahuje jemně mletý vápenec, stejně jako u metody Fusing. Tento přípravek se označuje obchodním názvem jako Shelf primer. U ohýbání skla musí být dodržena teplotní křivka, která se liší v závislosti na typu ohýbaného skla, jeho rozměrech a tloušťce. Tato křivka se dá charakterizovat jako závislost teploty na čase. Každý konkrétní individuální případ ohýbání má svou ideální křivku, která musí být experimentálně stanovena. Avšak dá se poměrně přesně vycházet z některé obecné křivky, jejíž příklad je vyobrazen na obr.6.3-1. [18]

Obr.6.3-1: Teplotní křivka pro ohýbání [17]



Z obr.6.3-1 je vidět celý tepelně technologický proces. Je třeba brát zřetel hlavně na to aby sklo nezůstalo dlouho v pracovním intervalu , kde by mohlo začít krystalizovat. Platí zase nepřímá úměrnost času a teploty. Na obr.6.3-2 je schématický nákres dvou možností celého procesu ohýbání. Z obrázku jsou patrné odvětrací otvory, ty jsou velice důležité, proto aby případný zapouzdřený vzduch ve formě sklo vlivem tlaku nezdeformoval. A obr.6.3-3 znázorňuje reálný neúspěšný pokus ohýbání, kdy nebyla dobře zvolena teplotní křivka. Touto metodou se dají vyrobit různě zahnutá skla, v závislosti na tvaru formy, nebo různé dekorativní předměty tvaru misky atd. [18]

Obr.6.3-2:Schématický náčrt možností procesu ohýbání [17]



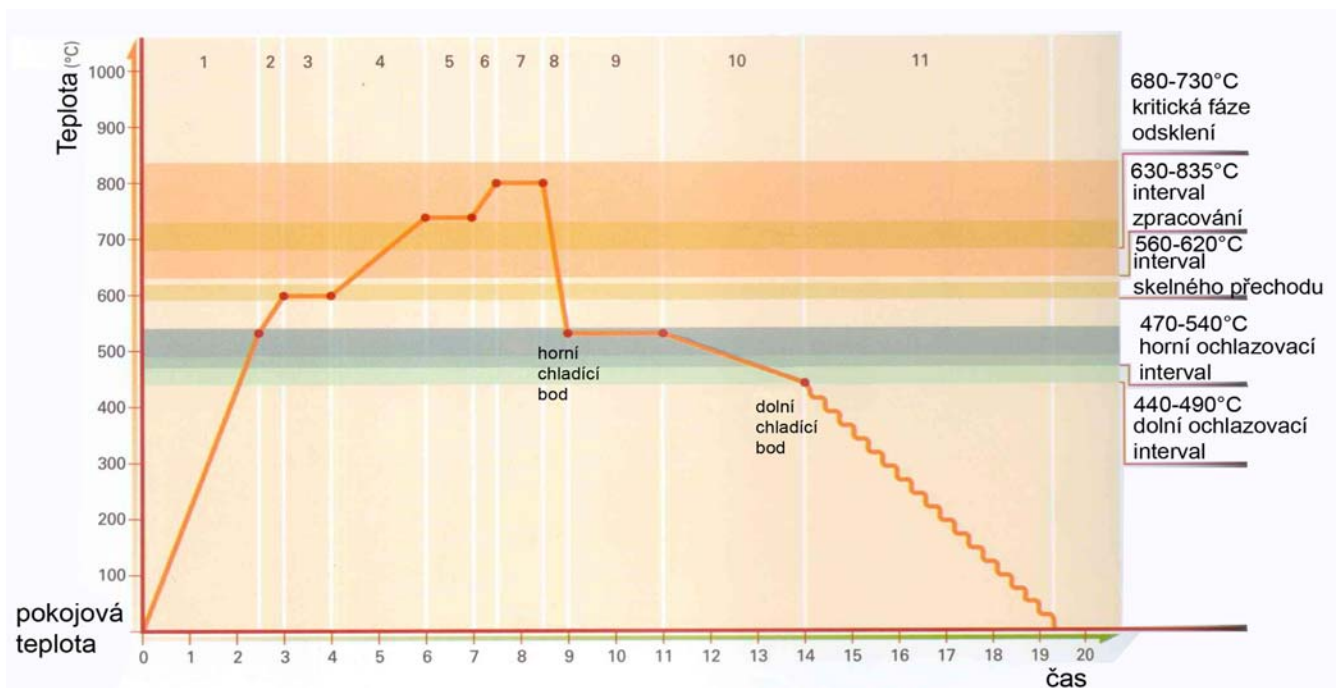
Obr.6.3-3:Neúspěšný pokus ohýbání



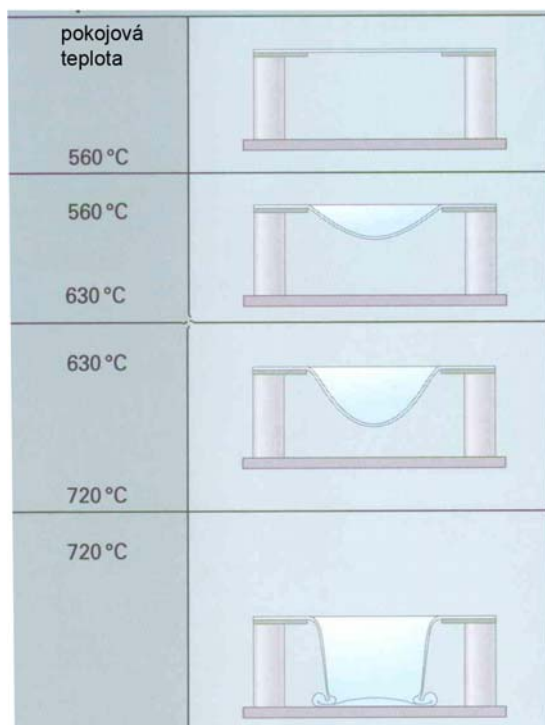
6.4 Metoda padání do prostoru

Padání skla do prostoru je podobná technika jako ohýbání s tím rozdílem, že nepotřebuje formu a teplotní křivka má také jiná specifika. Tímto způsobem lze zpracovávat pouze skla větších tloušťek, přibližně od 10mm. Technika využívá zase vlastní tíhu skla, aby se pod vlivem zvýšené teploty deformovalo do stavu, který je požadován. Formu u této techniky nahradila konstrukce, která sklo drží v pevném tvaru a zajišťuje požadovaný průběh deformace skla. Teplotní křivka tohoto procesu je znázorněna na obr.6.4-1. Jestliže je vyžadován přesný rozměr a podoba konečného výrobku, musí se brát velký ohled na přesnost celé teplotní křivky. U tohoto procesu není výsledný tvar tvořen formou ale je formován přímo výdrží na teplotě. [18] Schématický náčrt padání je na obr.6.4-2. Jsou zde uvedeny teploty a náčrty dějů, které se při nich odehrávají. Takle skutečnost tak i teplotní křivka je pro různé případy individuální. Realizace, která proběhla ve firmě TGK - Technika, sklo a umění s.r.o. touto metodou je na obr.6.4-3 a obr.6.4-4.

Obr.6.4-1: Teplotní křivka [17]



Obr.6.4-2:Schématický nákres padání [17]



Obr.6.4-3:Realizace padání do prostoru [11]



Obr.6.4-3:Realizace padání do prostoru [11]



7 Závěr

V této práci jsou uvedeny postupy výroby plochého skla v historickém kontextu. Práce se zabývá strukturou a podstatou skla jako materiálu, uvádí důležité fyzikální vlastnosti skla pro výrobu a zpracování i s praktickými ukázkami. Je zde možné najít různé způsoby výroby plochého skla a nastiňuje další postup zpracování v elektrické peci metodou Fusing. Jsou zde nastíněny možnosti a úskalí této technologie i s praktickými ukázkami.

8 Seznam použitých zkratk a symbolů

F	Síla
τ_{xy}	Tečné napětí
S	Obsah
η	Dynamická viskozita
ν	Kinematická viskozita
a	Vzdálenost
v	Rychlost
ρ	Hustota
$E\eta$	Aktivační energie viskózního toku
T	Absolutní teplota
R	Plynová konstanta
A	Frekvenční faktor
dPa	Deka Pascal
s	Sekunda
t	Čas
ΔL	Přírůstek vzdálenosti
g	Gravitační zrychlení
r	Poloměr
v_t	Rychlost tuhnutí
T	Teplota
T_g	Transformační bod
T_m	Bod měknutí
T_t	Bod tečení
T_l	Teplota liquidu
T_d	Dolní chladicí teplota
T_h	Horní chladicí teplota
M_g	Deformační teplota
E	Aktivační energie
χ	Elektrická vodivost
L_1	Délka
L_2	Délka
t_1	Teplota
t_2	Teplota
β	Koeficient objemové roztažnosti
α	Koeficient délkové roztažnosti
α_{20-300}	Koeficient délkové roztažnosti v intervalu teplot 20-300 °C
L_t	Celková délka prodloužení
V_t	Celkový zvětšený objem
v_k	Kritická rychlost

9 Seznam použité literatury

- [1] - FANDERLÍK, Milota. *Struktura skel: Pom. kn. pro stř. prům. šk. sklářské*. Vyd. 1. Praha, 1971.
- [2] - HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. Vyd. 1. Praha, 1981.
- [3] - MATOUŠEK, Josef. *Anorganické nekovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1992, 160 s. ISBN 80-708-0160-3.
- [4] - VOLF, Miloš Bohuslav. *Tepelné vlastnosti skel: Pom. kn. pro stř. prům. šk. sklářské*. 1. vyd. Praha, 1968.
- [5] - VOLF, Miloš Bohuslav. *Chemická odolnost, hustota a mechanické vlastnosti skel: Pom. kn. pro stř. prům. šk. sklářské*. 1. vyd. Praha, 1967.
- [6] - ASKELAND, Donald R a Pradeep P FULAY. *Essentials of materials science and engineering*. 2nd ed. United States: Cengage Learning, c2009, 604 s. ISBN 978-049-5244-462.
- [7] - CALLISTER, William D. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. New York: John Wiley, c2007, xxv, 721, A41, G14, S522. ISBN 978-047-1736-967.
- [8] - CARTER, C a M NORTON. *Ceramic materials: science and engineering*. New York: Springer, 2007, 716 s. ISBN 03-874-6270-8.
- [9] - SHACKELFORD, James F. a DOREMUS. *Ceramic and glass materials: structure, properties and processing*. New York: Springer, 2008. ISBN 03-877-3361-2.
- [10] - LE BOURHIS, Eric. *Glass: mechanics and technology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, c2008, 366 s. ISBN 35-273-1549-7.
- [11] - Interní materiály firmy TGK - Technika, sklo a umění s.r.o.
- [12] - RAOUX, Simone a Matthias WUTTIG. *Phase change materials: science and applications*. New York: Springer, 2008, 446 s. ISBN 978-0-387-84873-0.
- [13] - POPOVIČ, Štěpán. *Výroba a zpracování plochého skla*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. 256 s. ISBN 978-80-247-3154-4.
- [14] - BROUL Julius.František LAIB. *Tvarování plochého skla*. Vyd. 1. Praha, 1974.

- [15]- COZL, Zdeněk, SCHOVANKA, František a STREUBELOVÁ-PAKOSTOVÁ, Zdeňka. *Mechanické opracování skla: Pomocná kn. pro stř. prům. školy sklářské*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1969. 81, [1] s. Hutní sklářská příručka, Zdobení a povrchové úpravy skla 14.
- [16]- VONDRUŠKA, Vlastimil. *Sklářství*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2002. 273 s., [8] s. obr. příl. Řemesla, tradice, technika. ISBN 80-247-0261-4.
- [17] - BEVERIDGE, Philippa, Ignasi DOMÉNECH a Eva PASCUAL. Heisses Glas: Techniken und Projekte aus ofengeformten Glas. Bern [u.a.] Haupt: Haupt Verlag, 2004. ISBN 32-580-6773-2.
- [18] - Ústní sdělení