

ŠTĚPÁN POPOVIČ

VÝROBA

A ZPRACOVÁNÍ

PLOCHÉHO

SKLA



 GRADA

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

Používání elektronické verze knihy je umožněno jen osobě, která ji legálně nabyla a jen pro její osobní a vnitřní potřeby v rozsahu stanoveném autorským zákonem. Elektronická kniha je datový soubor, který lze užívat pouze v takové formě, v jaké jej lze stáhnout s portálu. Jakékoliv neoprávněné užití elektronické knihy nebo její části, spočívající např. v kopírování, úpravách, prodeji, pronajímání, půjčování, sdělování veřejnosti nebo jakémkoliv druhu obchodování nebo neobchodního šíření je zakázáno! Zejména je zakázána jakákoliv konverze datového souboru nebo extrakce části nebo celého textu, umísťování textu na servery, ze kterých je možno tento soubor dále stahovat, přitom není rozhodující, kdo takovéto sdílení umožnil. Je zakázáno sdělování údajů o uživatelském účtu jiným osobám, zasahování do technických prostředků, které chrání elektronickou knihu, případně omezují rozsah jejího užití. Uživatel také není oprávněn jakkoliv testovat, zkoušet či obcházet technické zabezpečení elektronické knihy.





Copyright © Grada Publishing, a.s.

Poděkování:

Publikace je přehlednou příručkou určenou pro studenty a odborné sklářské pracovníky. Zároveň je podrobnou analýzou procesu automatické výroby plochého skla Float s ukázkami jemných nuancí, jejichž zvládnutí je podmínkou pro úspěšnou výrobu širokého sortimentu výrobků z plochého skla. Přes nedostupnost a uzavřenost široké škály technických informací, což znemožňuje jejich plnohodnotné zveřejnění, je autor přesvědčen o užitečnosti předkládané publikace ke studijním účelům i pro odbornou přípravu pracovníků ve sklářství.

Štěpán Popovič

Výroba a zpracování plochého skla

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

obchod@grada.cz

www.grada.cz

tel.: +420 220 386 401, fax: +420 220 386 400

jako svou xxxx. publikaci

Odpovědný redaktor Radomír Matulík

Návrh a grafická úprava obálky Ivan Hozák

Fotografie na obálce laskavě poskytla firma AGC

Grafická úprava a sazba Jan Šístek

Fotografie a ilustrace

Počet stran xxx

První vydání, Praha 2009

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

Husova ulice 1881, Havlíčkův Brod

© Grada Publishing, a.s., 2009

© Ing. Štěpán Popovič, CSc., Dr.h.c., 2009

Cover Design © Ivan Hozák, 2009

Lektorovali: doc. Ing. Stanislav Kasa, CSc.
prof. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.
doc. Ing. František Novotný, CSc.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

ISBN 978-80-247-3154-4 (tištěná verze)

ISBN 978-80-247-7756-6 (elektronická verze ve formátu PDF)

© Grada Publishing, a.s. 2012

Obsah

Přehled symbolů a zkratk	9
Předmluva	11
1 Historie výroby plochého skla	13
2 Ruční výroba	19
2.1 Foukání válců	19
2.2 Válcování skla	20
2.3 Měsíční sklo	20
2.4 Mechanizace ruční výroby	21
2.4.1 Dvoufázový foukací způsob	22
3 Tažení plochého skla	25
3.1 Způsob Fourcault	26
3.1.1 Tavicí agregát a přítokové kanály	26
3.1.2 Podstrojová komora	28
3.1.3 Tažný systém	30
3.1.4 Technologie tažení Fourcaultovým způsobem	32
3.2 Způsob Asahi	33
3.3 Způsob Libbey-Owens	33
3.3.1 Tavicí pec	34
3.3.2 Konstrukční uspořádání tažné komory	34
3.3.3 Výkon způsobu Libbey-Owens	35
3.4 Způsob Pittsburgh	36
3.4.1 Tavicí pec	36
3.4.2 Podstrojová komora	36
3.4.3 Tažný stroj	38
3.4.4 Provozní podmínky	38
3.4.5 Výkon a technologické parametry	38
3.5 Způsoby tažení BVT	38
3.5.1 Tažení bez ponorného bloku	39
3.5.2 Tažení s ponorným blokem	40
3.6 Vertikální tažení pásu skla směrem dolů	42
3.7 Shrnutí	44
4 Lití plochého skla	45
4.1 Přetržité lití plochého skla	45
4.2 Nepřetržité lití plochého skla	47
4.2.1 Ornamentní sklo	51
4.2.2 Sklo s drátěnou sítí	51

5	Výroba plaveného skla	55
5.1	Historie výroby plaveného skla	55
5.2	Charakteristika skloviny	63
5.3	Suroviny používané pro výrobu plaveného skla	65
5.3.1	Sklářský tavný písek	65
5.3.2	Dolomit	66
5.3.3	Vápenec	68
5.3.4	Soda	70
5.3.5	Sulfát	70
5.3.6	Znělec	70
5.3.7	Živec	72
5.3.8	Vysokopecní struska (calumite)	72
5.3.9	Další minoritní suroviny	75
5.3.10	Skleněné střeby	76
5.4	Příprava vsázky	76
5.4.1	Manipulace se surovinami	77
5.4.2	Kmenárna	78
5.5	Zakládání vsázky	80
5.6	Tavení	83
5.7	Nátok na cínovou lázeň	91
5.8	Cínová lázeň	92
5.8.1	Tvarování pásu skla na cínové lázni	94
5.9	Chlazení a chladicí pec	98
5.9.1	Charakter napětí ve skle	98
5.9.2	Schéma chladicího postupu	99
5.9.3	Chlazení plochého skla vyráběného plavením	101
5.9.4	Tunelová chladicí pec pro plavené sklo	102
5.9.5	Problematika chlazení skla FLOAT	111
5.10	Mytí a sušení pásu	112
5.11	Pasivace povrchu skla	113
5.12	Detekce vad	113
5.13	Dělení pásu na výstupní formáty	114
5.13.1	Podélný řez	114
5.13.2	Příčný řez	114
5.13.3	Nouzový řez	115
5.14	Práškování a snímání tabule	115
5.15	Výkon zařízení	116
5.16	Vlastnosti plaveného skla	117
5.16.1	Mechanické vlastnosti	118
5.16.2	Tepelné vlastnosti	120
5.16.3	Optické vlastnosti	121
5.16.4	Elektrické vlastnosti	123
5.16.5	Chemická odolnost	123
5.16.6	Borokřemičité floatové sklo	123
5.17	Kontrola kvality	124

6	Zpracování plaveného skla	127
6.1	Mechanické postupy	127
6.1.1	Broušení a leštění skla	127
6.1.2	Řezání skla	130
6.1.3	Vrtání skla	136
6.1.4	Pískování skla	138
6.2	Sklo s funkčními povlaky	138
6.2.1	Vlastnosti skel s povlakem	139
6.2.2	Nanášení funkčních povlaků	149
6.3	Tepelné postupy	157
6.3.1	Tvrzení a tepelné zpevňování plochého skla	158
6.3.2	Ohýbané ploché sklo	168
6.4	Vrstvené ploché sklo	174
6.4.1	Výroba vrstveného skla	175
6.4.2	Výrobky z vrstveného skla	179
6.5	Sklo zpevněné chemicky iontovou výměnou	186
6.5.1	Vlastnosti a aplikace chemicky zpevněného skla	186
6.5.2	Výroba chemicky zpevněného skla	187
6.6	Sklo s dekorativními úpravami	187
6.6.1	Tvarové úpravy hran a povrchu	188
6.6.2	Chemické matování	188
6.6.3	Pískování	189
6.6.4	Barvení povrchu skla	190
6.7	Izolační skla	195
6.7.1	Aplikace a vlastnosti izolačních skel	195
6.7.2	Výroba izolačních skel plněných plynem	196
6.7.3	Standardní izolační skla	198
6.7.4	Izolační skla se zvýšenou tepelnou izolací	199
6.7.5	Zvukově izolační skla	200
6.7.6	Bezpečnostní izolační skla	201
6.7.7	Protisluneční izolační skla	201
6.7.8	Vakuová izolační skla	203
6.7.9	Vícekomorová izolační skla s alternativními materiály	203
6.7.10	Ekonomické a ekologické aspekty používání izolačních skel	204
6.8	Sklo pro konstrukční využití v architektuře	206
6.8.1	Zavěšené fasádní systémy s bodovým uchycením	207
6.8.2	Skleněné nosníky	208
6.8.3	Skleněná zábradlí	211
6.9	Sklo pro automobily a další dopravní prostředky	213
6.9.1	Požadavky na automobilová skla	215
6.9.2	Bezpečnostní tepelně tvrzené sklo	216
6.9.3	Bezpečnostní vrstvené sklo	217
6.9.4	Sklo blokující záření UV a IR	217
6.9.5	Sklo pro ochranu soukromí a snížení tepelné zátěže	218
6.9.6	Vrstvené sklo pro zvukovou izolaci	219
6.9.7	Hydrofobní a snadno čistitelná skla	220

6.9.8	Vyhřívání skla	220
6.9.9	Sklo pro přenos komunikačních signálů	222
6.9.10	Sklo s informační funkcí (HUD)	222
6.10	Opracované sklo pro speciální aplikace	223
6.10.1	Vrstvené sklo pro solární aplikace	224
6.10.2	Sklo se zvýšenou odolností proti ohni	227
7	Tendence v rozvoji kapacit na výrobu a zpracování plochého skla Float	233
7.1	Technické trendy a inovace výroby plochého skla Float	233
7.1.1	Vývojová geneze technologie Float	233
7.1.2	Pecní agregát pro výrobu skla Float	234
7.1.3	Cínová lázeň	234
7.1.4	Chladicí pec	235
7.1.5	Mycí stroj	235
7.1.6	Úprava horního povrchu skla	236
7.1.7	Kontrola kvality	236
7.1.8	Trend uplatnění optimalizace	236
7.1.9	Manipulace a logistika	237
7.2	Nové trendy ve zpracování plochého skla	237
7.3	Rozvoj kapacit na výrobu plochého skla Float	238
	Literatura	243
	Lektorské posudky	251
	Rejstřík	253

Přehled symbolů a zkratek

a, s	rozměr	[m]
A	tvarový součinitel	[-]
B	fotoelastická konstanta skla	[Pa ⁻¹]
C	chladičí modul skla	[nm.s.cm ⁻³ .K ⁻¹]
C	měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
D, M	zrnitost	[μm]
E	modul pružnosti	[Pa]
g	tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
g	činitel prostupu solární energie	[-]
h	rychlost ochlazování	[K.min ⁻¹]
k	parametr charakterizující intenzitu ochlazování	[-]
k	tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
K	koncentrace	[%]
N	jeden řád odpovídající dráhovému rozdílu 540 nm	
q _e , q _i	činitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
R	měrný odpor	[W.cm]
R _w	index neprůzvučnosti	[dB]
S	povrchové napětí	[mN.m ⁻¹]
t	teplota	[°C]
T	teplota	[K]
U	činitel prostupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
x	vzdálenost	[mm]
X	měrný dráhový rozdíl	[nm.cm ⁻¹]
α	úhel	[rad, °]
α	součinitel délkové teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
D	měrný dráhový rozdíl	[nm.cm ⁻¹]
h	dynamická viskozita	[Pa.s]
λ	vlnová délka	[μm; nm]
λ	tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ	Poissonovo číslo	[-]
v	frekvence	[Hz]
ρ	hustota, měrná hmotnost	[kg.m ⁻³]
ρ _e	činitel odrazu záření	[-]
ρ _λ	spektrální propustnost	[%]
δ	napětí, pevnost	[Pa]
τ	doba	[s; min; hod]
τ _e	činitel odrazu záření	[-]
τ _λ	spektrální odrazivost	[%]
ξ	bezrozměrná konstanta	[-]

AGC	firma Asahi Glass Company
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
CVD	Chemical Vapor Deposition
CCD	zobrazovací modul Charge Coupled Device
CIE	barevný diagram zkonstruovaný mezinárodní kalorimetrickou organizací (CIE)
ČSN	česká státní norma
DIA	diamant
EN	evropská norma
ERM	edge roll machine
EVA	etylvinylacetát
GEPVP	Groupement Européen des Producteurs de Verre Plat
GO	generální oprava
HDPE	High Density Polyethylen
HST	tepelně tvrzené prohřívané sklo
HUD	Head-Up-Display
IR	infračervené záření
ITT	Initial Type Testing
LOR	zvedací válce
LTO	lehký topný olej
LVC	Laminar Vapor Coating
PB	firma Pilkington Brothers
PMMA	polymetylmetakrylát
PN	podniková norma
PPG	firma PPG Industries (dříve Pittsburgh Plate Glass Co.)
PVB	polyvinylbutyral
RC	Roller Coating
SGP	ionoplast Sentry Glass Plus
TRM	Top Roll Machine
TS	sklářský tavný písek
UC	Under Cleaner
UPS	náhradní zdroj napětí
UV	ultrafialové záření
VÚSU	Výzkumný ústav Sklo Unionu

Předmluva

Výroba plochého skla je již historicky jednou z nejsložitějších technologií, která svým zvládnutím byla a je dosud měřítkem úspěšnosti ekonomiky.

Moderní výroba skla Float je vysoce sofistikovanou výrobní metodou, která s sebou nese širokou škálu špičkových parametrů z hlediska zvládnutí technologie řízení, inspekční činnosti, rozsáhlého monitoringu a zejména vysokých nároků na dlouhodobou stabilitu systému. Spolu s tím přicházejí požadavky na použité materiály sklářského tavícího agregátu a cínové plavící lázně, na strojní zařízení, na jeho spolehlivost a odolnost vůči extrémním podmínkám a současně vysokou úroveň logistiky, která musí denně k jednomu agregátu zajistit více než 700 tun materiálů a surovin na sklářskou vsázku a současně stejné množství produkce opustit linku a brány firmy ve speciálních návěsech kamionů s cílem zásobovat soustavu zpracovatelských a distribučních firem.

Obečným trendem, který výrobci plochého skla Float sledují, je zvětšování podílu výrobků s vysokou přidanou hodnotou, která se realizuje zušlechťením skla speciálními postupy povrchových úprav, mechanickým opracováním, termodynamickými postupy s cílenými speciálními vlastnostmi, zahrnujícími širokou škálu funkčních povlaků, zpevňováním a zvyšováním odolnosti skel jejich vrstvením a s cílenými speciálními vlastnostmi do míst s požadavkem vysoké funkční bezpečnosti i odolnosti vůči ohni, vlivům povětrnosti a počasí s možnostmi modifikace světelné propustnosti a toku tepla ve stavebních aplikacích, v automobilovém průmyslu apod.

Tato práce je podrobnou analýzou procesu automatické výroby plochého a zpracování skla Float s ukázkou jemných nuancí, jejichž komplexní zvládnutí je podmínkou pro úspěšnou a dynamickou výrobu širokého sortimentu plochého skla nejvyšší kvality. Závěrečná kapitola je věnována technickým trendům a marketingovým aspektům rozvoje kapacit na výrobu a zpracování plochého skla Float v globálním měřítku.

Ing. Štěpán Popovič, CSc. Dr.h.c.

1 Historie výroby plochého skla

Výroba skla má velice zajímavou, ale především dlouhou tradici. Sklářství se řadí mezi nejstarší známé druhy řemesel, ale o historii výroby skla, ať již se jedná o místo nebo dobu vzniku, nepanuje dodnes mezi historiky shoda [1]. Nejvíce pravděpodobné se jeví konstatování, že výroba skla mohla mít kořeny nezávisle na několika místech současně, případně v krátkém časovém odstupu. Archeologické výzkumy dokládají nálezy skel v oblasti dnešní Sýrie až z období 5. tisíciletí před naším letopočtem, objevy v Egyptě jsou poněkud mladší a jejich stáří se datuje do doby přibližně 3500 let před naším letopočtem.

Výroba plochého skla má historii méně dlouhou, za nejstarší způsob ruční výroby plochého skla je považováno lití skloviny do ploché formy a její uhlazení do tvaru desky. Prvenství je připisováno Římanům. Až přibližně na počátku našeho letopočtu došlo k objevu, který je pro další vývoj sklářské výroby považován za nejvýznamnější – k vynálezu sklářské píšťaly. Využití sklářské píšťaly pro ruční výrobu plochého skla tzv. foukáním je prvním významným krokem k dokonalejší výrobě tabulí skla a touto technologií foukání válců prosluli v Evropě právě čeští skláři [2]. Tomuto způsobu předcházela výroba plochého skla roztáčeného, tzv. korunového, které vykazovalo menší tloušťku a kvalitnější povrch. Z dochovaných pramenů je zřejmé, že na našem území se ploché sklo vyrábělo jak roztáčením, tak foukáním válců, a to přibližně od počátku 15. století. Do té doby ploché sklo používané např. pro zasklívání chrámových oken a pro malbu na skle pocházelo z dovozu, nejspíše z Benátek. Pozoruhodnou skutečností zůstává, že obě historicky nejstarší technologie, tedy foukání válců i roztáčení, byly v malé míře pro ruční výrobu plochého skla u nás využívány ještě přibližně v polovině 20. století. Oba zmíněné způsoby popsal ve svém díle „De Diversis Artibus“ německý mnich Theofilus v roce 1120. Tak jako stolní a nápojové sklo, mělo i ploché sklo již ve svých počátcích uměleckou hodnotu. Svým výtvarným projevem umožnilo pozvednout románský a zejména pak gotický sloh k nebývalé kráse. Důkazem toho jsou překrásné vitráže domů, chrámů, kostelů a klášterů, sestavené z barevného nebo pestře malovaného plochého skla. Nedokonale utavené sklo s četnými vadami ve svém jádře dodávalo sluncem prosvícené malbě plastický výraz.

Nástupem dalších stavebních slohů, především baroka, ztrácelo ploché sklo dominantní umělecké postavení a postupem doby kleslo až na úroveň běžného zasklívacího prvku.

Výroba plochého skla ze skleněných válců

Tento způsob výroby byl založen na foukání skleněné baňky pomocí sklářské píšťaly, jejím postupným protahování, otevření spodního konce, oddělení od píšťaly a po podélném opuknutí vyrovnaní vytvořeného válce v rovnací peci pomocí dřevěného bidla [3].

Od druhé poloviny 14. století vynikali ve výrobě plochého skla z foukaných skleněných válců čeští skláři. Na začátku 15. století přišly z Čech do Alsaska-Lotrinska čtyři sklářské rodiny, které v pohoří Vogézy, bohatém na dřevo, založily v průběhu let přes čtyřicet skláren. Tito skláři naučili francouzské skláře vyrábět ploché sklo způsobem dodnes v tomto kraji nazývaném „procédé de Boheme“ [4].

V zásadě byly provozovány dva způsoby výroby plochého skla ze skleněných válců: český a rýnský. Způsoby se lišily délkou a průměrem foukaných skleněných válců: český způsob 1100/400 mm, rýnský 1300/320 mm. Ruční způsob výroby plochého skla z foukaných skleněných válců se dále zdokonaloval – zvětšovala se délka válců, a to až na 3000 mm a zvyšoval se i tloušťkový sortiment. Ruční výroba popsáním způsobem nebyla nikterak náročná, proto byla provozována prakticky na celém území Čech a Moravy, zejména pak na Šumavě.

Ruční výroba plochého skla roztáčením

V první polovině 14. století oživila Francie v Normandii syrskou, patrně z 9. století našeho letopočtu pocházející, starou výrobní technologii plochého skla roztáčeného tzv. „korunového“. Protože toto sklo vykazovalo menší tloušťku a dobrý ohněm leštěný povrch obou ploch, poklesl rázem po staletí zájem o ploché sklo vyráběné foukáním válců. Výroba kotouče roztáčením byla snadnější, tedy méně pracná, nebylo třeba tak kvalifikovaných sklářů, jako tomu bylo u výroby plochého skla z předem vytvarovaného válce [4].

Tato technologie výroby plochého skla se udržela v Anglii až do začátku 20. století, neboť sklo vykazovalo kvalitní povrch, jednalo se o ohněm leštěné sklo.

Z dochovaných skel je zřejmé, že se na našem území vyrábělo od začátku 15. století okenní ploché sklo jak způsobem „korunovým“, tak i způsobem foukání válců. V 17. století se projevil výrazný zvrat v pojetí obou výrobních technologií, při kterém výroba „korunového“ skla prudce poklesla.

Výroba plochého skla litého a válcovaného na stole

V druhé polovině 17. století došlo k zajímavé události, která vytýčila vývojovou cestu novému druhu skla – litému sklu. V r. 1665 založil francouzský král Ludvík XIV. z popudu svého národohospodáře Jeana Baptisty Colberta sklářskou společnost: „Compagnie de Saint Gobain“. Královská podpora a ekonomická zdatnost Colberta daly světu novou sklářskou technologii, určenou na zdoání benátského monopolu ve výrobě zrcadel.

Princip francouzské výrobní technologie litého skla spočíval v tom, že se pánev s utavenou sklovinou vyjmula z tavicí pece a překlopením se její žhavý obsah vylil na vodorovnou kovovou desku licího stolu. Těžkým kovovým válcem se nalitá sklovina vytvarovala do podoby tabule s určitou tloušťkou a to podle výšky kovových lišt, umístěných na obvodu licí desky, po kterých se válec pohyboval. Autorství prvního manufakturního způsobu výroby litého skla bylo dlouho v technické literatuře připisováno jen Louis Lucasi de Nehou, ale pravým vynálezcem licího způsobu byl Bernard Perrot, jak to přiznávají dnešní oficiální prameny společnosti Saint Gobain.

Tato technologie výroby plochého skla je zajímavá i tím, že neúspěch při jejím zavádění v Anglii napomohl zrodu výroby plaveného skla.

V Anglii se totiž pokoušeli koncem 17. století zavést francouzský způsob výroby litého skla, ale neuspěli. Teprve v polovině 18. století nastala zcela nová situace. Britský parlament ve snaze zabránit pašování zrcadlového skla, jehož cena na černém trhu byla výhodnější než zdaněné sklo domácí provenience, podpořil podnikatele. V r. 1773 povolali Angličané z Francie bývalé pracovníky společnosti Saint Gobain, kteří byli toho názoru, že výroba litého skla podle francouzského způsobu bude v Anglii rychle zavedena. Vždyť prakticky všechny sklářské suroviny a i uhlí byly těženy v okolí uvažované sklárny v Ravensheadu u St. Helens v hrabství Lancashire [5].

Ale stalo se to, co nikdo neočekával. Francouzští odborníci nezvládli provoz tavicích pánvových pecí otápěných černým uhlím, v Anglii již od r. 1701 nařízeným. Byli zvyklí na otop dřevem, kterého bylo ve Francii dostatek. Francouzi přesto tvrději hájili používání otevřených pánví, se kterými byli zvyklí pracovat. Teprve v r. 1792 byly Angličany zavedeny s velkým úspěchem pánve uzavřené (kukaně), které zamezily znečišťování skloviny pecním ovzduším.

Ale ani tato opatření nepřinesla Anglii výraznou změnu ve výrobě zrcadlového skla a tak převážná většina sklářských podnikatelů zůstávala u málo produktivní ruční výroby skla „korunového“. Jedinou kladnou stránkou z doby dobrodružného podnikání byly četné sklárny v okolí St. Helens, které nakonec zakoupili bratři Pilkingtonové, kteří nikdy před tím nebyli skláři. Ti pak v r. 1826 založili sklářskou společnost Pilkington Brothers v St. Helens Lancashire, která je dnes jednou z největších výrobců plochého skla na světě. Ale nejen plochého skla. V tomto kraji se v padesátých letech 20. století zrodila revoluční technologie plochého skla, jeho výroba plavením na roztaveném kovu, tzv. Float Process.

První náznaky strojní výroby plochého skla

Odstranění namáhavé práce sklářů – foukačů při výrobě plochého skla ručním způsobem se stalo vůdčí myšlenkou konstruktérů. Na počátku 20. století se objevily dva způsoby, které však otrocky napodobovaly postup klasické ruční výroby [6, 7]. Oba představovaly mechanizaci dílčích operací a proto nemohly přinést žádoucí obrat do výroby plochého skla. Způsob Sievertův byl založen na vylití utavené skloviny do železného kroužku umístěného na licím stole a s ním posunut pod foukačí zařízení. Následně probíhalo foukání, opuknutí obou konců a rovnání v peci podobně jako u ručního způsobu. První pokusný stroj byl postaven v letech 1903 až 1904 ve Francii v závodě firmy Compagnie des Glaces et Verres Speciaux du Nord S. A. Model vylepšený podle získaných zkušeností, byl instalován v letech 1906 až 1908 v Bílině v Čechách ve sklárně Engels a konečně v letech 1909 až 1910 další pokusný stroj v závodě sklárny Zeller a Hirsch ve Freibergu v Sasku. Provozní realizaci však našel Sievertův způsob v Rusku.

Prakticky současně byla ve Spojených státech amerických zavedena jiná, dokonalejší metoda mechanického foukání skleněných válců podle Lubberse. První pokus táhnout skleněný válec přímo z hladiny utavené skloviny učinil Oppermann v roce 1885 v belgickém Charleroi. Stejnou myšlenku sledoval Lubbers a asi v roce 1905 byl jeho nový způsob schopný soutěže. Na rozdíl od Sievertova postupu není válec jen vyfoukán, nýbrž tažen z vytápěné pánve. Délka obřích válců byla 10 až 12 metrů, po vytažení byly rozděleny na kratší kusy a obvyklým způsobem rovnány. Tato metoda byla krátce provozována i v Čechách a to v letech 1910 až 1921 ve sklárně Třemošná u Plzně.

Mezi uvedené pokusy mechanizovat ruční výrobu plochého skla patří i dvoufázový z působ zkoušený v Anglii, o němž referuje [6].

Teprve na začátku 20. století začal ve světě postupný rozvoj strojní výroby plochého skla, přičemž skláři na severu Čech dosáhli významného postavení. Stalo se tak díky zvládnutí výrobních technologií světové špičkové úrovně.

Lité ploché sklo s drátěnou vložkou

Rostoucí potřeba používání plochého skla ve stavebnictví si vynutila zlepšování jeho vlastností, mezi které patřilo i zvýšení bezpečnosti při jeho aplikaci. Tato zvýšená bezpečnost byla v tehdejší době realizována „armováním“ drátěnou vložkou.

Zhruba v polovině 20. století se řada výrobců snažila vyrábět ploché lité sklo s drátěnou vložkou nejprve odléváním do formy. Způsob výroby spočíval v nalití skloviny na stůl, položení drátěné sítě, nalití další dávky skloviny a v následném válcování.

Malá produkce nestačila uspokojovat rostoucí poptávku odběratelů na bezpečnostní lité sklo s drátěnou vložkou a způsobila návrat ke klasické technologii lití skla na stole. Řada vzniklých variant řešení a získané zkušenosti byly později využity u jiných zařízení na výrobu litého skla s drátěnou vložkou a jeho výroba kontinuálním způsobem je v menším rozsahu provozována i v současné době.

Lité ploché sklo tvarované přetržitým litím

Výrobní technologie umožňující vyrábět ploché sklo přetržitým litím představují další vývojovou etapu lití plochého skla, kdy se licí stůl stává nikoliv tvarovacím prvkem, ale tvarovaná tabule se na něj pouze pokládá a stůl vykonává jen funkci dopravníku, zatímco vlastní tvarování skloviny probíhá mezi válci ve vertikální poloze s přechodem do horizontální. Řada výrobních strojů se objevila na konci 19. a na začátku 20. století v Americe, Anglii, Francii a Německu. Tyto stroje umožňovaly výrobu surového (brusného) skla, skla s drátěnou vložkou i vzorovaného skla, mimo jiné mohly produkovat i sklo barevné [4].

V českých zemích se licí stroje na výrobu plochého skla používaly ve více závodech, ve sklářském slangu se jim říkalo „šancky“ a poslední ukončila svůj provoz v duchcovské sklárně v roce 1952.

Strojní lití plochého skla

Vývoj civilizace a s ním spojené rostoucí požadavky na úroveň osvětlení interiérů obytných i dalších prostor si vyžádaly výrobu velkých skelněných tabulí, které mohly mít i vzorovaný povrch, případně mohly být opatřeny drátěnou vložkou. Z tohoto pohledu se rozvíjená výroba litého plochého skla rozčlenila do tří jen volně souvisejících odvětví: surové brusné sklo, vzorované sklo a sklo s drátěnou vložkou. Vzorované licí stoly byly velmi drahé, výroba a provoz velkých licích stolů byly obtížné. Řešením bylo přetržené válcování mezi dvěma válci, z nichž jeden může být vzorovaný. Válce svým „nekonečným“ povrchem nahrazují velmi důmyslně licí stůl, kterému zůstává zachována pouze funkce přepravy. Tento způsob, kterého použila jako první anglická firma Chance Brothers asi v r. 1890, umožňuje vyrábět tabule až do velikosti 32 m² a v upravené, „duplexní“ verzi, i sklo s drátěnou vložkou. Spíše kvantitativním zdokonalením je systém Bicheroux z dvacátých let, dovolující vyrábět tabule skla velkých rozměrů. Poslední vývojovou etapou je nepřetržené (kontinuální) lití, patentované firmami Ford a Saint Gobain v letech 1925 až 1932 a zavedené koncem třicátých let [8].

V poválečných letech byly zprvu vyvinuty zvláštní stroje na výrobu litého skla, zásobující složité a mohutné konvejery, pracující na principu postupného hladinářského broušení a leštění vyrobeného plochého skla. S rozšířením výroby plaveného skla se postupně zastavuje výroba litého skla k broušení, ale současně s rozvojem moderního stavebnictví roste poptávka po litém skle vzorovaném a po skle s drátěnou vložkou.

Strojní výroba plochého skla tažením

Hlavními výrobci ručně foukaného plochého skla používaného pro zasklívání byly v Evropě Rakousko-Uhersko (převážně země české) a Belgie. Jak již bylo řečeno, na počátku 20. století se objevily první pokusy mechanizovat tuto výrobu. Způsob Sievertův byl

provozován jen pokusně v letech 1906 až 1909 v bílinské sklárně, větší pozornost však byla zaměřena na způsob Oppermann-Lubbersův, který byl do výroby zaveden o několik roků později. Ale ani tato mechanizace, která příliš kopírovala ruční výrobu rovnání ručně foukaných válců, nemohla obstát v masivně rostoucí poptávce po kvalitním okenním skle.

Zajímavým se v této souvislosti jeví patent Francouze F. Vallina z r. 1871, v němž jsou uvedeny tři možné varianty svislého tažení skleněného pásu a to tažení směrem nahoru, tažení vzhůru s následným ohýbáním taženého pásu do horizontálního směru a svislé tažení směrem dolů [9]. Tyto myšlenky, jak známo, byly později rozpracovány a jejich principy se staly zásluhou dalších vynálezců základem samostatných výrobních technologií [10, 11, 12].

Prvním z nich byl Emile Fourcault, který přišel s technologií s kolmého tažení pásu skla za použití šamotové výtlačnice a později Gregorius pracující bez výtlačnice (způsob Pittsburgh). Druhým byl Colburn s kolmým tažením bez výtlačnice, ale s následným ohýbáním přes válec do vodorovné polohy (Libbey-Owens) a třetím fa. Corning Glass Co. USA s kolmým tažením směrem dolů.

Ale vraťme se do prvních let 20. století. Do popředí se dostává myšlenka Belgičana Emile Fourcaulta, který jako první přišel se snahou o realizaci vertikálního tažení skleněného pásu směrem vzhůru nepřetržitým způsobem pomocí šamotové výtlačnice [10]. Přes nesmírné počáteční obtíže se mu podařilo dotáhnout řešení tohoto problému do konečného stádia, takže můžeme konstatovat, že vpravdě revoluční krok v oblasti výroby plochého skla se uskutečnil 1.4. 1919 v české sklárně v Hostomicích u Bíliny, kde byla poprvé na světě zahájena výroba nepřetržitého vertikálního tažení pásu skla podle Fourcaultova způsobu. Je smutným konstatováním, že sám vynálezce se tohoto data nedožil.

Souběžně se evropským způsobem vertikálního tažení pásu skla podle Fourcaulta se zrodil v USA způsob Libbey-Owensův, jehož původním vynálezcem je Irwing Coburn. Tento způsob spočívá v tažení pásu skla z volné hladiny směrem vzhůru až do výše přibližně 600 mm, kdy dochází k ohnutí pásu do vodorovné polohy, v níž sklo prochází chladicí pecí [3].

Způsob umožňoval vyrábět širokou paletu tlouštěk od 0,5 mm. V Evropě se postup dostal do Belgie a Německa, na území Československa k realizaci nedošlo.

Způsob Pittsburgh vznikl teprve na rozhraní 20. a 30. let a jeho autorem byl Američan I. S. Gregorius. V podstatě šlo o nepřetržitě vertikální tažení pásu skla směrem vzhůru za využití některých technologických uzlů ze způsobů Fourcault a Libbey-Owens. Jeho vývojem se začali zabývat výrobci plochého skla v americkém Pittsburghu, podle kterého byl nový způsob nazván a na jméno vynálezce se zapomnělo.

Do Evropy se postup dostal asi roku 1931, u nás byla výroba skla tímto způsobem provozována těsně před 2. světovou válkou v Duchcově, k obnově provozu došlo v r. 1952.

Kromě zmíněných výrobních způsobů byly ověřovány i další varianty bezvýtlačnicového tažení, jedním z nich byl i způsob Asahi.

Výroba plochého zrcadlového skla

Ploché sklo lité i tažené je charakterizováno nepříliš kvalitním povrchem, což je možno rozpoznat i prostým pozorováním objektu umístěného za takovým sklem. U litého skla nerovnost povrchu činí toto sklo prakticky neprůhledným, u taženého skla je zvlnění povrchu zřetelné např. při postříbření jedné strany, tedy při výrobě zrcadel. Právě výroba

zrcadel, ale i kvalitativní požadavky prudce se rozvíjejícího automobilového průmyslu, přinesly nutnost řešit při výrobě plochého skla i problém kvality jeho povrchu. Řešení se našlo v mechanickém broušení a následném leštění povrchu. Surovinou pro tyto operace se přirozeně stalo tzv. brusné sklo, které mechanickým opracováním obou stran získalo zrcadlovou kvalitu. Jako surovina (brusné sklo) se používalo zpočátku ručně foukané ploché sklo, později sklo lité i sklo vyrobené tažením.

Vývoj strojního zařízení pro tuto technologii postupného broušení a leštění plochého skla lze pro přehlednost sledovat na třech typech strojů, které se liší vzájemným pohybem skla a pracovního nástroje. V podstatě dělíme strojní zařízení především na individuální stroje, kde se tabule pohybuje rovnoměrným pohybem střídavě dopředu a vzad a obráběcí nástroj je poháněn a rotuje na povrchu opracovávaného skla. Dalším typem jsou stroje rotační, kdy se otáčí kruhový stůl se sklem a pracovní nástroj se po povrchu skla odvaluje třením. Posléze jsou to konvejery, kde broušení a leštění probíhá v jedné lince a tvoří nepřetržitý technologický tok.

Nejvyšším stupněm vývoje při broušení a leštění plochého skla byly *oboustranně pracující konvejery*. Tato technologie se vyznačovala nejvyšší produktivitou. Celý technologický postup opracování skla navazuje na tavení a tvarování skla a vytváří tak jeden výrobní celek, na jehož konci vychází broušené a leštěné sklo. Jde v podstatě o výrobu litého skla, které po vytvarování a vychlazení prochází řadou brusek. Tyto oboustranné brusky opracovávají současně horní i spodní stranu skla. Po vybroušení pokračuje sklo v podobě nekonečného pásu do oboustranných leštiček, z nichž vystupuje finální produkt [13].

Nástup procesu Float

V době, kdy sklářský průmysl vyřešil otázku kvality povrchu plochého skla zavedením složitých konvejerů, se objevuje principiálně zcela nová výrobní technologie plaveného plochého skla (Float Process). Angličané, kteří rovněž provozovali vlastní konvejery, intenzivně pokračovali v utajovaném výzkumu, takže datum 20. ledna 1959 vešlo do dějin sklářského průmyslu jako den nástupu nové výrobní technologie, která na zcela odlišném principu byla schopna produkovat ploché sklo s oboustranně zrcadlovou kvalitou povrchu bez použití složitých a nákladných konvejerů.

Myšlenka vyrábět ploché sklo plavením na lázni roztaveného kovu se objevila v konkrétnější podobě již na počátku 20. století, kdy Američané Heal (1902) a Hitchcock (1905) patentovali postupně poznatky, které pro další rozvíjení tohoto způsobu byly podstatné. Trvalo ale více než padesát let, než technika dosáhla takové úrovně, aby bylo možné zvládnout stanovené cíle. Anglická společnost Pilkington Brothers zahájila výzkumné práce v roce 1952 a tyto práce, které si vyžádaly 7 let usilovné snahy a vynaložení obrovských nákladů, byly korunovány úspěchem, který ve výrobě plochého skla zrcadlové kvality představoval další významný mezník. Nejenže zavedení technologie plavení skla uzavřelo éru mechanického opracování povrchu složitým a ekonomicky nákladným způsobem pomocí konvejerů, ale otevřelo i cestu dalšího rozvíjení aplikací plochého skla ve stavebnictví a architektuře, i v dalších průmyslových odvětvích [14, 15].

Československo se pak stalo první zemí střední a východní Evropy, které tuto licenci zakoupilo a v Teplicích-Řetenicích [16, 17] vybudovalo výrobní linku na plavené sklo, jejíž zkušební provoz byl zahájen 22. 10. 1969. V současné době výroba plochého skla způsobem Float Process zcela ovládla svět a bez plochého skla vyrobeného touto technologií si rozvoj celé řady průmyslových odvětví nelze představit.

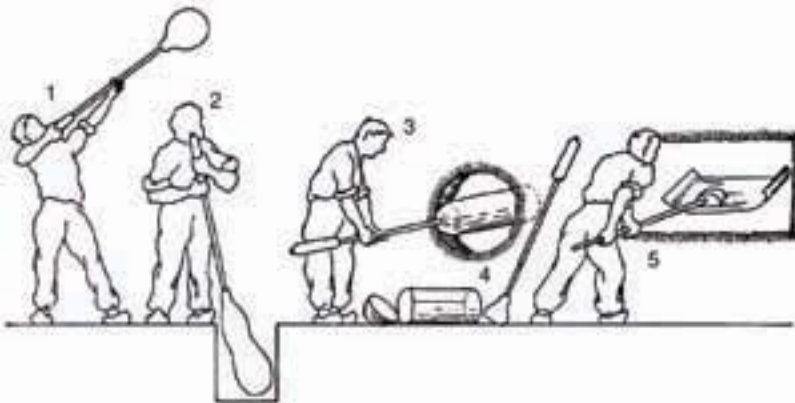
2 Ruční výroba

Ještě značnou dobu trvalo, nežli se po objevení skla jako materiálu podařilo vyrobit z tohoto materiálu desku. Prvenství v tomto ohledu je připisováno starým Římanům, kteří odlévali utavené sklo na hladkou podložku a jeho povrch uhlazovali pomocí primitivních nástrojů. Takto získané tabule pak používali k zasklívání oken. Teprve později byly objeveny další způsoby, jimiž bylo ploché sklo ručně vyráběno.

2.1 Foukání válců

Objev této technologie, která při tvarování plochého skla využívá sklářské píšťaly, se datuje přibližně do 10. století. Zmiňovaný způsob výroby (*obr. 2.1*) se vyznačuje tím, že se na sklářskou píšťalu nabere z pánve vhodné množství utavené skloviny (náběrů může být postupně i více) a následně se vyfukuje protáhlá baňka, jejíž tvar se prodlužuje současným komíháním píšťaly se sklovinou nad pracovní jámou.

Sklovina je přitom udržována ve tvárném stavu opakovaným zahříváním, nejčastěji v plynem vytápěném bubnu. Kombinací foukání a komíhání se vytvoří uzavřený válec s tloušťkou stěny přibližně 3 mm o délce až 1500 mm. Po dosažení těchto rozměrů se na konci vzdáleném od píšťaly válec otevře a jeho okraje se vyrovnají pomocí nůžek. V další fázi se válec umístí na dřevěnou podložku a opuknutím se oddělí od píšťaly. Po zchladnutí se provede podélné otevření válce tím způsobem, že se po jeho vnitřním povrchu přejíždí zahřátým koncem železné tyče až dojde k podélnému prasknutí. Takto připravený skleněný válec se přemístí do rovnací pece, zde se znovu ohřeje na teplotu měknutí a pomocí tyče se rozevře [10]. Jeho vyrovnání na podložené šamotové desce se provede „vyžehlením“, tj. přejížděním povrchu špalkem z topolového dřeva. Vyrovaná tabule je pak přemístěna do chladičí pece, kde dojde ke konečnému vychlazení.



Obr. 2.1 Tvarování plochého skla ručním foukáním

1 – foukání baňky; 2 – vytvarování válce foukáním a komíháním; 3 – přehřívání válce během tvarování; 4 – opukávání; 5 – rovnání v rovnací peci

Popsaným způsobem je možné vyrobit i vrstvené (přejímané) ploché sklo a přes historický aspekt vzniku této technologie její praktické využívání probíhalo v Československé republice přibližně do začátku devadesátých let minulého století, kdy bylo tímto způsobem vyráběno tzv. signální sklo používané v barevném provedení pro optické zabezpečovací systémy v dopravě. Hlavním důvodem byla možnost tavení barevných sklovin v pánvích, tedy v relativně malém množství.

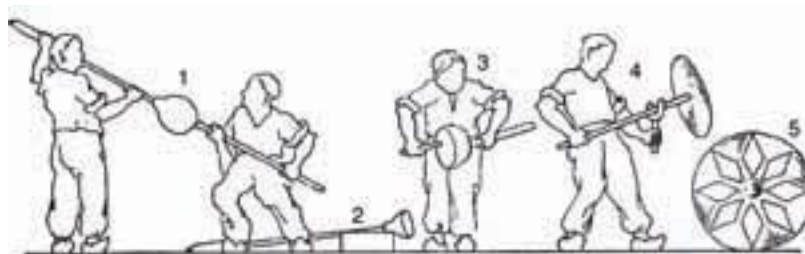
2.2 Válcování skla

Historická technologie byla „znovuobjevena“ ve Francii ve druhé polovině 17. století, kdy při stavbě zámku ve Versailles nestačily rozšířené poptávce tabule skla vyráběné foukáním válců. Myšlenka byla vlastně původní – utavená sklovina se vylila na kovový stůl a vyválcovala. Po vychlazení byly obě plochy postupně mechanicky broušeny a leštěny, aby získaly požadovanou kvalitu. Takto vyrobené tabule měly rozměry zhruba 1 × 1,5 m. Technologie byla v průběhu let neustále zdokonalována především s cílem vyrobit tabule větších rozměrů, takže na výstavě v Paříži v r. 1878 byla předvedena tabule skla o rozměrech 6,61 × 4,17 m.

Ve své podstatě byla tato technologie využívána též v Československu, když po 1. světové válce byla v Chodově zavedena přetržitá výroba plochého skla s tím rozdílem, že nebylo vyráběno sklo mechanicky zušlechtnuté, ale barevné opakní (jeho obchodní název Chodopak vznikl z počátečních písmen slova Chodov a opakní) sklo, jehož jeden povrch byl leštěn ohněm a druhý byl opatřen rovnoběžnými drážkami pro pevnější uchycení na podkladovou vrstvu omítky. Tato výroba probíhala řadu let, až v roce 2001 byla z ekonomických důvodů zastavena.

2.3 Měsíční sklo

Přibližně ve 14. století spatřil světlo světa další způsob ruční výroby plochého skla využívající opět sklářskou píšťalu. Toto tzv. měsíční sklo bylo vyráběno tím způsobem (*obr. 2.2*), že z dávky skloviny nabrané na píšťalu se foukáním vytvořila baňka, která se po dosažení vhodného tvaru a velikosti připevnila na opačném konci od píšťaly na lepicí



Obr. 2.2 Výroba měsíčního skla

1 – připevnění na lepicí želízko; 2 – opukávání; 3 – rozšíření baňky; 4 – rotace rozšířené baňky; 5 – rozdělení hotového „měsíce“

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, výsledkem které vznikl kotouč nazývaný měsíc [2]. Odtud tedy přívlastek měsíční sklo. Vytvořený kotouč byl uložen do chladicí pece a po vychlazení z něj byly vyřezávány destičky požadovaného tvaru. Zesílené středy byly využívány rovněž a to pro zasklívání oken pomocí olověných pásků.

Rovněž tato technologie ruční výroby plochého skla byla využívána poměrně dlouho a ještě v 70. letech minulého století se tímto způsobem vyráběla tenká krycí sklíčka pro optickou mikroskopii v tehdejší národního podniku Jablonecké sklárny v Desné.

2.4 Mechanizace ruční výroby

V průběhu doby docházelo neustále ke zvyšování požadavků na objem výroby plochého skla, takže narůstal i tlak na jeho produktivnější výrobu. To bylo v první řadě provázeno snahou zvýšit nejen výkony foukačů, ale v neposlední řadě zvětšit rozměry vyrobených tabulí skla získaného foukáním válců. Pokusy o mechanizaci této technologie spočívaly především a pouze v jejím zdokonalování. Jednalo se o výrobu podle Sievertova (francouzského) způsobu, která se příliš nerozšířila, výrobu Oppermann-Lubbersovým (belgicko-americkým) způsobem, která se ukázala být životnější a konečně o méně známý dvoufázový způsob používaný v Anglii.

Sievertův způsob

Podle tohoto způsobu [3] se utavená sklovina vylévá do velkého železného kroužku, který je součástí pohyblivého licího stolu. Po nalití skloviny se stůl s kroužkem posune pod foukací zařízení, na kroužek se nasadí otočná foukací hlava spojená s přívodem tlakového vzduchu. Foukací hlava je navíc opatřena elektromagnetem, který pevně drží kroužek po odsunutí licího stolu. Tvarování válce probíhá tím způsobem, že sklovina působením nízké viskozity a gravitace stéká dolů za nepřetržitého otáčení a foukání tlakového vzduchu. V počáteční fázi se používá dřevěná opěrka, která zabraňuje přílišnému protažení válce a umožní tak dosažení potřebného průměru. Tvarování pokračuje ve svislém plynovém bubnu, v němž je sklovina přihřívána a její viskozita je udržována na potřebné hodnotě. Po dokončení tvarovacího procesu se vypnutím elektromagnetu uvolní foukací hlava a vytvarovaný válec s kroužkem je přemístěn do vidlice upevněné na kladkostroji. V konečné fázi se opuknou oba konce, válec se rozřízne a vyrovná v rovnací peci. Schéma způsobu foukání válců podle Sieverta je uvedeno na *obr. 2.3*.

Oppermann-Lubbersův způsob

Lubbersův způsob mechanického foukání skleněných válců navazoval na pokusy s tažením válce přímo z hladiny roztavené skloviny, které byly prováděny Oppermannem v Belgii. Skleněný válec je tažen svísele nahoru [3] a současně je vyfukován tlakovým vzduchem. Sklovina se při tomto způsobu výroby válců utaví ve vanové peci a přemístí se jako dávka do zvláštní dvojité pánve, kterou je možno otáčet kolem vodorovné osy pomocí jejího uložení ve dvou čepech umístěných proti sobě. Horní část pánve slouží střídavě jako zásobník skloviny pro vlastní tvarování, spodní část tvoří uzávěr olejové pece, pomocí které je sklovina udržována na potřebné teplotě. Začátek tvarování