

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ARCHITEKTURY**

DISERTAČNÍ PRÁCE

v doktorském studijním programu

ARCHITEKTURA A URBANISMUS

obor

ARCHITEKTURA, STAVITELSTVÍ A TECHNOLOGIE AST

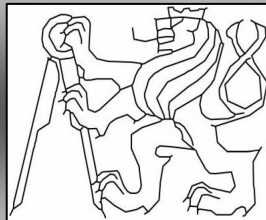
(z původ. ARCHITEKTURA A POZEMNÍ STAVITELSTVÍ)

téma disertační práce

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

školitel

Doc.Ing. Karel Lorenz, CSc.



V Praze, r. 2013

zpracoval Ing. Zdeněk Vacek.

Osobní údaje autora:

Titul, jméno a příjmení:

Ing. Zdeněk VACEK

Korespondenční adresa:

Kpt. Jaroše 1458/2,
266 01 Beroun 2, Beroun - Město

Telefonní spojení:

(+420) 725 628 999

Email:

zdenek.vacek@spinvest.cz,
ecasiopea@seznam.cz

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

Obsah:

1. IDENTIFIKACE PROBLÉMU - UVEDENÍ ZÁMĚRU	7
1.1. Formulace cílů	7
1.2. Prezentace a využitelnost.....	7
1.3. Výchozí informační prameny.....	7
1.4. Identifikace konstrukčního potenciálu	8
1.4.1. Sklo, světlo, energie	8
1.4.2. Sklo, světlo, konstrukce.....	8
1.4.3. Sklo, energie a konstrukce, energetická náročnost.....	8
1.4.4. Struktura bytového fondu.....	9
1.4.5. Obnova budov.....	10
1.5. Koncepce a ekologické principy ve výstavbě.....	11
1.5.1. Ekologické a tedy energeticky úsporné principy	11
1.6. Technologické možnosti a směřování.....	11
1.7. Problematika skla	13
1.7.1. Studijní prameny.....	13
1.7.2. Systematizace informací.....	13
1.7.3. Specifika informací.....	14
1.7.4. Specifika skla.....	15
1.7.5. Sklo v umění, architektuře a designu	15
1.8. METODIKA DOKTORSKÉ PRÁCE, METODOLOGICKÉ ZATŘÍDĚNÍ.....	15
2. DEFINICE PROBLEMATIKY - HISTORIE A TRADICE SKLA	16
2.1. Světová historie skla.....	16
2.1.1. Mezopotámie.....	16
2.1.2. Sýrie	16
2.1.3. Egypt,.....	16
2.1.4. Fénicičané	16
2.2. Evropská historie skla.....	17
2.2.1. Kořeny	17
2.2.2. Období Karolínské a otonské	17
2.2.3. Benátské sklo.....	17
2.2.4. Období 9. až 15. stol.	17
2.2.5. Období 16. až 18. stol.	18
2.2.6. Jazykové doplnění.....	18
2.3. České země	18
2.3.1. Původ.....	18
2.3.2. Sklářské hutě	19
2.3.3. Nejstarší sklářská škola.....	20
2.3.4. Český křišťál.....	20
2.3.5. České křišťálové lustry	20
2.4. Sklo 20. století.....	21
2.4.1. 19. a 20. století	21
2.4.2. Období v letech 1945-1970.....	21
3. DEFINICE PROBLEMATIKY - VÝROBA SKLA	22
3.1. Historie výroby.....	22
3.1.1. Sklářské hutě	22
3.1.2. Sklářská píšťala	23
3.1.3. Výroba plochého skla v 19. a 20. století.....	23
3.1.4. Výroba opálového skla ve 30. letech 20. století.....	24
3.2. Současná výroba	24
3.2.1. Základní technologický postup výroby skla	24
3.2.2. Úprava a přehled sklářských surovin	25
3.2.3. Zakládání	27
3.2.4. Proces tavení	27
3.2.5. Vlastní tavení.....	28
3.2.6. Homogenizace	29
3.2.7. Ochlazení skloviny	29

3.3. Způsoby výroby.....	29
3.3.1. Automatická výroba - obecně.....	29
3.3.2. Tažení.....	29
3.3.3. Lítí.....	29
3.3.4. Flotace - plavení.....	29
3.3.5. Válcování.....	29
3.3.6. Lisování.....	29
3.3.7. Foukání skla.....	30
3.3.8. Rozfukávání.....	30
3.3.9. Odstředování.....	30
3.3.10. Ruční výroba skla.....	30
3.3.11. Fúzování skla (Fusing).....	30
3.3.12. Mikrovlnné tavení skla.....	31
3.4. Příklady výrobků.....	31
3.4.1. Duté sklo, obalové sklo.....	31
3.4.2. Ploché sklo.....	31
3.4.3. Tvarovky.....	31
3.4.4. Zrcadlové sklo.....	31
3.4.5. Bezpečnostní sklo.....	32
3.4.6. Sklo chemické a laboratorní.....	32
3.4.7. Sklo optické.....	32
3.4.8. Osvětlovací sklo a lustry.....	33
3.4.9. Jablonecká bižuterie.....	33
3.4.10. Křišťál a sklo s vyšším obsahem olova.....	33
3.4.11. Křemenné sklo.....	34
3.4.12. Vodní sklo.....	34
3.4.13. Horninové a vulkanické sklo.....	34
3.4.14. Skleněná vlákna.....	35
3.4.15. Speciální skla pro elektroniku.....	36
3.5. Techniky následných úprav vč. zdobení a dekorace.....	36
3.5.1. Broušení.....	37
3.5.2. Rytí skla.....	37
3.5.3. Glazury (polevy).....	37
3.5.4. Emaily (smalty).....	37
3.5.5. Malba skla.....	37
3.5.6. Lazurování.....	38
3.5.7. Leptání a matování.....	39
3.5.8. Opracování a dekorace laserem.....	39
3.5.9. Opracování vodním paprskem.....	39
3.5.10. Optický dekor.....	40
3.5.11. Spékání a ohýbání, zapalování skla.....	40
3.5.12. Pískování.....	40
3.5.13. Tiffany.....	40
3.5.14. Vitráž.....	41
3.5.15. Galvanické zušlechťení.....	41
3.5.16. Lepení.....	41
4. DEFINICE PROBLEMATIKY - MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA SKLA	42
4.1. Fyzikálně chemické vlastnosti.....	42
4.1.1. Základní vlastnosti.....	42
4.1.2. Optické vlastnosti.....	43
4.1.3. Základní popis.....	44
4.1.4. Základní dělení skla.....	45
4.2. Suroviny výroby skla.....	45
4.2.1. Kyselé suroviny.....	46
4.2.2. Zásadité suroviny.....	46
4.3. Zbarvení skla - barviva.....	46
4.3.1. Vliv jednotlivých sloučenin a iontů na barvu skla.....	47
4.3.2. Doplnění.....	48
4.3.3. Zbarvení skla ionizujícím zářením.....	48
4.3.4. Měření barevnosti skla - kolorimetrie.....	48
4.3.5. Historické názvy barevných skel.....	48
4.3.6. Solarizace, nežádoucí zbarvení skel.....	49

4.4.	Kaliva	49
5.	DEFINICE PROBLEMATIKY - SKLO JAKO ODPAD	50
5.1.	Odpad, skleněné nádoby	50
5.2.	Odpad, sklo zlomkové	50
5.3.	Odpady z sklářské produkce	50
5.4.	Vitřifikace	50
5.5.	Slinování neboli sintrace	50
6.	DEFINICE PROBLEMATIKY - PŘÍBUZNÉ APLIKACE	52
6.1.	Sklokeramika, sklokystalické hmoty	52
6.2.	Pěnové sklo	53
6.2.1.	Výroba pěnového skla	53
6.2.2.	Materiálové vlastnosti pěnového skla	53
6.3.	Vakuové izolace	53
6.4.	Slinované sklokystalické prvky	54
6.4.1.	Výrobní proces sklokystalických prvků	54
6.4.2.	Materiálové vlastnosti sklokystalických prvků	54
6.5.	Alkalivzdorná skleněná vlákna do betonů a malt	55
6.6.	Osvětlovací optická vlákna	55
7.	DEFINICE PROBLEMATIKY - MATERIÁLOVÝ VÝZKUM A POHLED DO BUDOUCNOSTI	57
7.1.	Kovové sklo	57
7.1.1.	Struktura	57
7.1.2.	Experimentální výroba	57
7.1.3.	Vlastnosti	57
7.2.	Fosforečnanové, chalkogenidové a halogenidové sklo	57
7.3.	Křemenná vata a výroba ze sol-gelů	58
7.4.	Nanokompozitní materiály	58
8.	DEFINICE PROBLEMATIKY - PODROBNÁ MECHANIKA SKLA	60
8.1.	Pevnost skla	60
8.1.1.	Deformace	60
8.1.2.	Modul pružnosti	61
8.1.3.	Pravděpodobnost porušení	61
8.1.4.	Závislost na zatížení v čase	62
8.1.5.	Závislost na vnějším prostředí	62
8.1.6.	Působení vody	63
8.2.	Citlivost skla	63
8.2.1.	Koncentrované napětí	63
8.2.2.	Mechanický ráz	64
8.2.3.	Teplotní pole	64
8.2.4.	Teplotní roztažnost	64
8.3.	Lineární lomová mechanika pružného tělesa	65
8.3.1.	Šíření trhlin	65
8.3.2.	Destruktivní zkoušky pevnosti	65
8.3.3.	Parametry lomové mechaniky	67
8.3.4.	Teplotní ráz	67
8.3.5.	Mechanický ráz	68
8.3.6.	Nedestruktivní zkoušky pevnosti	68
8.3.7.	Zkoušky opotřebení	68
8.3.8.	Analýza a specifika lomu	69
8.3.9.	Fotoelastický jev	70
8.4.	Zvyšování pevnosti skla, zvyšování odolnosti proti porušení	70
8.4.1.	Ochrana před vznikem povrchových vad	70
8.4.2.	Úprava povrchu odstraněním a zmenšením vad	72
8.4.3.	Dosažení předpětí v povrchové vrstvě, tvrzení	73
8.5.	Princip opracování skla	77
8.5.1.	Opracování ohřevem povrchu	78
8.5.2.	Vrtání	78
8.5.3.	Lámání s naříznutím	78
8.5.4.	Sekání	78
8.5.5.	Opukávání	78
8.5.6.	Kontrolované rozšiřování trhlinky	78
9.	DEFINICE PROBLEMATIKY - SOLÁRNÍ ENERGETICKÉ KONSTUKCE	79

9.1.	Energetická návratnost.....	79
9.2.	Základní pojmy.....	79
9.2.1.	Využití solárního tepla a denního světla	79
9.2.2.	Ochrana před nadměrným slunečním zářením.....	80
9.3.	Tabulka přehledu vlivů solárních opatření na vlastnosti budovy.....	82
9.4.	Zimní zahrada.....	83
9.5.	Zasklení balkonu.....	83
9.6.	Solární vytápěné konstrukce s využitím TI.....	83
9.6.1.	Transparentní prvky – transparentní izolace - TI.....	83
9.6.2.	Solární vytápěné konstrukce s využitím TI - obecně	84
9.7.	Solární vytápěné konstrukce vzduchovými kolektory.....	85
9.7.1.	Obvodový plášť se vzduchovým kolektorem	85
9.7.2.	obvodový plášť s nezaskleným vzduchovým kolektorem	86
9.8.	Solární systémy s vodním oběhem pro vytápění a TUV.....	87
9.8.1.	Tabulka relativních tepelných zisků solárního systému dle orientace k obloze.....	87
9.8.2.	Nezasklené solární systémy s vodním oběhem	88
9.9.	Fotovoltaické články	88
9.9.1.	Tabulka relativních tepelných zisků solárního systému dle orientace k obloze.....	89
9.10.	Tepelná izolace pomocí solární energie.....	90
9.10.1.	Zasklená tepelná izolace	90
9.10.2.	Zasklená dvojitá fasáda.....	91
9.10.3.	Dvojitá fasáda se vzduchovým kolektorem.....	92
9.11.	Shrnutí.....	92
10.	FORMULACE CÍLŮ - ZÁSADY KONSTRUOVÁNÍ Z KŘEHKÝCH MATERIÁLŮ	93
10.1.	Obecná doporučení.....	94
10.2.	Bezpečnost provozu.....	95
10.3.	Výpočtové postupy.....	95
10.4.	Příklad jednoduchého výpočtu	100
10.5.	Souhrn doporučení.....	101
11.	ANALÝZA / VYHODNOCENÍ - SMĚŘOVÁNÍ KONSTRUKČNÍHO SKLA, FUTURE KONCEPTY	102
11.1.	TRANSPARENTNÍ ENERGETICKÉ KONSTRUKCE, optické rastry	102
11.2.	MATERIÁLOVÉ A KONSTRUKČNÍ APLIKACE	104
11.3.	TRANSPARENTNÍ ARCHITEKTURA	106
11.4.	Inteligentní konstrukce	108
11.5.	Green glass technology.....	110
11.6.	Distribuce denního světla v urbanistickém měřítku.....	111
12.	ZÁVĚR	114
13.	STUDIUM PRAMENŮ - PRAMENY A ZDROJE INFORMACÍ	115
13.1.	Knihy a odborné časopisy	115
13.1.1.	Technická literatura	115
13.1.2.	Literatura teorie, koncepce, historie	115
13.2.	Internetové prameny	116
13.2.1.	Architektura, design, historie	116
13.2.2.	Konstrukční prvky.....	117
13.2.3.	Technologie.....	118
13.2.4.	Materiály a chemie	119
13.2.5.	Ekologie a biotechnologie.....	121
13.2.6.	Grafika.....	122

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL**1. IDENTIFIKACE PROBLÉMU - UVEDENÍ ZÁMĚRU****1.1. FORMULACE CÍLŮ**

Důležitým cílem projektu v rámci tématu disertační práce „SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL“ je vytvoření ucelené, systematicky strukturované a přístupné informační báze obsahující v ideálním případě souhrn dosažených znalostí a vědomostí v oboru skla a jeho užití ve stavebních konstrukcích, se snahou o srozumitelný komplexní záběr do příbuzných oborů s ohledem na multi-oborový přístup při architektonické tvorbě.

1.2. PREZENTACE A VYUŽITELNOST

Informační báze by měla být vhodná pro tvůrčí navrhování, pro pokročilá konstrukční řešení architektonických projektů a pro orientaci v nabízených souvisejících produktech na trhu. Takovéto projektové snahy a záměry jsou možné pouze při znalosti materiálových vlastností a limitů, příčin statického chování a výrobních postupů skla a znalosti jeho možného uplatnění v kombinaci s dalšími konstrukcemi, materiály a technologiemi.

Design každého projektu právě obvykle řeší následující otázky:

- architekturu a konstrukční návrh,
- účel, funkci,
- hospodárnost a finanční návratnost,
- estetiku,
- stavební fyziku (mikroklima),
- životnost,
- dopad na životní prostředí (EIA)
- v ideálním případě materiálový cyklus s ohledem na trvale udržitelný rozvoj.

1.3. VÝCHOZÍ INFORMAČNÍ PRAMENY

Výchozími informačními zdroji jsou knižní publikace technické literatury se zaměřením na materiálové, užitné a výrobní vlastnosti skla. Následuje je dále literatura o konstrukčním uplatnění skla a literatura s chemickým zaměřením na sklo a příbuzné materiály.

Jiné zdroje jsou zastoupeny firemními prezentacemi. Ty jsou dostupné například na internetu, výstavách nebo ve firemních katalozích a technických listech. Zde referují o praktické aplikaci prezentovaných materiálů a zhotovených komponent se zaměřením na konkrétní výrobky, které jsou určeny k zabudování do stavebních konstrukcí.

Další zdroje informací představují vědecké příspěvky. Ty se v rámci aplikačního výzkumu věnují výše zmíněným stavebním a konstrukčním výrobkům. Ohodnocují je rovněž ve vztahu ke zkušebnictví a k normotvorným procesům ve stavební výrobě.

Jiná skupina odborných článků a publikací se koncepčně zaměřuje na komplexní problematiku hledání a řešení efektivity, energetické a materiálové náročnosti, účelnosti a životnosti z hlediska trvale udržitelného rozvoje ve stavební výrobě. S tím blízce souvisejí i další zdroje vědomostí a poznatků, které se přímo zaměřují na design nízkoenergetických staveb a využití alternativních zdrojů energie.

Nelze zejména opomenout informační zdroje v oblasti architektury, její teorie, koncepcí a hlavně realizací, které jak teoreticky tak v realizacích prověřují životaschopnost a přínos v popisované problematice.

Bližší rozbor a zkušenosti z přístupu k informačním pramenům je uveden v následující kapitole (viz. další kapitoly: **Studijní prameny, Specifika informací**).

1.4. IDENTIFIKACE KONSTRUKČNÍHO POTENCIÁLU

1.4.1. Sklo, světlo, energie

Sklo jako materiál nabízí obecně ze svého potenciálu hned několik dimenzí pro využití v jeho konstrukční realizaci. Mezi jeho přednosti v našem prostředí patří relativní odolnost výrobků, dlouhá životnost, materiálová stálost, nehořlavost, netečnost k prostředí a propustnost pro světlo. Právě propustnost pro světlo je vlastností „jako šitá na míru“ biologickému vývoji a fyziologickému uzpůsobení smyslového vnímání člověka – vnímání zrakem.

V přirozeném životním prostředí je světlo pro člověka nositelem nejenom informace, ale i nositelem energie ve formě radiace. Právě optická propustnost skla pro některé složky spektra radiace umožňuje jejich prostup zabudovaným sklem dále do stavebních konstrukcí a užívaných prostor. Tím nabízí k využití potenciál pro zlepšení a rozšíření funkčnosti stavebního díla v průběhu jeho užívání.

Prostup energie záření transparentními konstrukcemi umožňuje její přeměnu na jinou formu energie nebo její účast v látkových procesech ve vnitřním (ale i venkovním) prostředí stavby. Právě toto rámcově představuje výše zmiňovaný potenciál pro rozpracování funkčnosti stavebního díla. Energetické toky záření v mezích stavby lze regulovat, tlumit, zesilovat nebo koncentrovat prostřednictvím konstrukcí obsahující transparentní i odrazivé materiály. Z hlediska požadované životnosti, trvanlivosti, odolnosti vnějším i vnitřním podmínkám a materiálové technologické úrovni je zde prostor pro použití a nasazení skla.

1.4.2. Sklo, světlo, konstrukce

Zabudování a použití skla určitým způsobem ve struktuře stavby má v přirozeném životním prostředí dopady na průběh fyzikálně-chemických pochodů⁽¹⁾. Tyto jevy lze jako nepříznivé potlačit nebo je naopak prospěšně využít. Pro jednoduché přiblížení lze jmenovat tyto případy:

- Pasivní tepelné zisky jsou způsobené přeměnou energie dopadajícího světelného slunečního záření na teplo. Jev zesílený transparentní konstrukcí o skleníkový efekt je využíván za vhodných podmínek v nízko energetické výstavbě. Tímto způsobem je přímo ohřívána pevná část konstrukce⁽²⁾ nebo k přeměně na teplo dochází v solárních kolektorech. Ohřáté médium na výstupu potom může konat práci nebo teplo předává dál.
- Prostup slunečního světla a jeho dostupnost v interiérech má zásadní vliv na kvalitu mikroklima v užívaných prostorech, například na vlhkost a teplotu vzduchu, a tedy celkově na hygienu (zdravotní i psychickou) užívaných prostor. Kromě prostupy oken a světlíků lze zajistit dostupnost přirozeného denního světla i reflexními světlovody různých tvarů a konstrukcí.
- Přeměna světelné energie na elektrickou se nemusí odehrávat pouze v solárních panelech, ale solární články mohou plnit i funkci v transparentní konstrukci jako sluneční clona před zářením do interiéru užívaných prostor.

Uvedené případy se nabízejí k estetickému a funkčnímu využití a zohlednění v architektonickém návrhu stavby. Lze s výhodou využít dosažených vlastností kompozitních materiálů, které v sobě integrují určité požadavky na stavební konstrukce. Například lze použít betonové konstrukce se zalitými a vhodně uspořádanými optickými vlákny – světlovody⁽³⁾. Sklokystalické desky mohou plnit funkci obkladu stěn i funkci difuzoru zdroje umělého osvětlení v interiéru. Nebo lze do stavby začlenit inteligentní kompozity, které v sobě integrují funkci prosklení, výroby elektrické energie a zastínění dle intenzity oslunění. Takovéto složené materiály musí ale také vykazovat stejnou míru bezporuchovosti, proveditelnosti údržby a bezpečnosti jako běžné stavební materiály.

1.4.3. Sklo, energie a konstrukce, energetická náročnost

Účelem je podpořit tvorbu a vývoj takových stavebních konstrukcí, které nevyužívají skla pouze pro zřejmé optické vlastnosti a jejich základní aplikace v životě a užívání stavebního díla. Účelem je podpora a rozvoj využití možností začlenění skla do konstrukcí se záměrem příznivě ovlivňovat energetické (světelné, tepelné a látkové) potřeby během užívání stavby a současně tyto možnosti architektonicky zhodnotit.

¹ elektrostatické mikroklima, oděrové mikroklima, iontové mikroklima

² např.: Trombeho stěna

³ Vynález maďarského studenta Árona Losonczyho - Litracon, průhledný beton

Jak již bylo uvedeno, v těchto záměrech a cílech je v jádru zahrnuta obecná idea trvale udržitelného rozvoje společnosti z pohledu její závislosti na využívání přírodních zdrojů, která je zde řešena prostřednictvím výrobní a provozní efektivity, energetické a materiálové (ne)náročnosti, účelnosti a životnosti staveb.

Pro názornost (4): tabulka průměrné energetické náročnosti na 1 obyvatele dané země.	
stát, lokalita	W / 1obyv.
<i>současnost:</i>	
Étiopie	500W / prům. na 1 obyvatele
Švýcarsko	6.000W / prům. na 1 obyvatele
USA	10.000W / prům. na 1 obyvatele
<i>zamýšlená budoucnost:</i>	
Celosvětově s ohledem na trvale udržitelný rozvoj.	2.000W / prům. na 1 obyvatele

1.4.4. Struktura bytového fondu

Tento úkol se neomezuje pouze na případy návrhu nových projektů. Ale z hlediska stávající struktury bytového fondu (5) se týká zejména jeho obnovy, tj. projektů rekonstrukce, modernizace, revitalizace, sanace budov, energetické sanace, atd.

Struktura domovního fondu podle krajů, stav k 1.3.2001 (Veřejná databáze Českého Statistického Úřadu):

Území	Domy celkem	z toho		Trvale obydlené domy	z toho		Neobydlené domy s byty	z toho		Neobydlená ubytovací zařízení
		rodinné domy	bytové domy		rodinné domy	bytové domy		rodinné domy	bytové domy	
Česká republika	1 969 018	1 732 077	196 874	1 630 705	1 406 806	195 270	338 003	325 271	1 604	310
Hl. m. Praha	88 200	55 700	29 852	82 160	50 258	29 659	6 032	5 442	193	8
Středočeský kraj	307 120	284 309	17 122	239 553	218 740	16 981	67 520	65 569	141	47
Jihočeský kraj	147 970	133 571	11 496	111 544	98 148	11 368	36 397	35 423	128	29
Plzeňský kraj	120 279	106 265	11 516	95 538	82 423	11 430	24 720	23 842	86	21
Karlovarský kraj	39 866	29 110	9 031	35 666	25 448	8 973	4 197	3 662	58	3
Ústecký kraj	124 567	100 449	20 893	105 241	82 466	20 482	19 312	17 983	411	14
Liberecký kraj	84 883	72 727	9 537	66 347	55 014	9 444	18 524	17 713	93	12
Královéhradecký kraj	128 770	114 574	10 664	101 662	88 594	10 580	27 082	25 980	84	26
Pardubický kraj	118 714	107 980	8 149	96 680	86 696	8 116	22 000	21 284	33	34
Vysočina	129 165	119 619	7 478	103 556	94 685	7 441	25 590	24 934	37	19
Jihomoravský kraj	237 514	216 496	17 927	205 293	185 148	17 847	32 158	31 348	80	63
Olomoucký kraj	126 825	113 106	11 190	110 568	97 613	11 117	16 246	15 493	73	11
Zlínský kraj	133 402	124 151	7 290	114 576	105 977	7 270	18 820	18 174	20	6
Moravskoslezský kraj	181 743	154 020	24 729	162 321	135 596	24 562	19 405	18 424	167	17

⁴ Solární energie: Využití při obnově budov, Andreas Haller, Othmar Humm, Karsten Voss. -- 1. vyd. -- Praha : Grada, 2001.

⁵ Příklad z Německa, 2001: 70% staveb je starších 25 let. Jejich spotřeba elektrické energie je 70% a spotřeba tepelné energie je 95% ze všech stávajících budov. Přírůstek novostaveb je 1% ročně. Příklad z ČR: na vytápění a provoz budovy se spotřebuje více než 30% energie z celkové energetické produkce.

Tabulka domovního fondu v ČR k 1.3.2001 (Veřejná databáze Českého Statistického Úřadu):

	Domovní fond celkem		v tom					
			rodinné domy		bytové domy		ostatní	
	abs.	v %	abs.	v %	abs.	v %	abs.	v %
Domy celkem	1 969 568	100,0	1 732 519	100,0	196 430	100,0	40 619	100,0
trvale obydlené	1 630 705	82,8	1 407 248	81,2	194 826	99,2	28 631	70,5
neobydlené	338 863	17,2	325 271	18,8	1 604	0,8	11 988	29,5
v neobydl. domech bytů	353 296	x	331 708	x	9 000	x	12 588	x
Trvale obydlené domy	1 630 705	100,0	1 407 248	100,0	194 826	100,0	28 631	100,0
Vlastník								
soukromá fyzická osoba	1 397 923	85,7	1 362 175	96,8	28 703	14,7	7 045	24,6
obec, stát	79 066	4,8	12 335	0,9	55 506	28,5	11 225	39,2
bytové družstvo	41 808	2,6	2 900	0,2	38 908	20,0	-	-
jiný	103 613	6,4	24 461	1,7	70 849	36,4	8 303	29,0
Období výstavby								
1899 a dříve	135 218	8,3	118 141	8,4	12 161	6,2	4 916	17,2
1900 - 1945	446 041	27,4	398 460	28,3	40 226	20,6	7 355	25,7
1946 - 1970	354 229	21,7	285 860	20,3	64 389	33,0	3 980	13,9
1971 - 1990	500 795	30,7	431 592	30,7	64 303	33,0	4 900	17,1
1991 a později	171 092	10,5	154 936	11,0	11 448	5,9	4 708	16,4
Materiál nosných zdí								
cihly, tvárnice	991 080	60,8	875 362	62,2	102 551	52,6	13 167	46,0
kámen a cihly	432 181	26,5	400 149	28,4	22 257	11,4	9 775	34,1
stěnové panely	79 867	4,9	12 695	0,9	65 457	33,6	1 715	6,0
ostatní	113 088	6,9	107 745	7,7	3 677	1,9	1 666	5,8
Vodovod								
v domě	1 594 743	97,8	1 373 784	97,6	194 598	99,9	26 361	92,1
mimo dům	2 514	0,2	2 460	0,2	14	0,0	40	0,1
bez vodovodu	22 271	1,4	21 936	1,6	73	0,0	262	0,9
Ústřední topení								
dálkové nebo bloková kotel	98 473	6,0	9 360	0,7	85 482	43,9	3 631	12,7
kotelna v domě	1 093 700	67,1	1 047 022	74,4	32 243	16,5	14 435	50,4
bez dálkového a ústř. topení	420 416	25,8	336 245	23,9	75 899	39,0	8 272	28,9

1.4.5. Obnova budov

Obnova budovy zahrnuje všechny činnosti, které vedou k vyšší kvalitě a současně k nižší zátěži na životní prostředí. Obnova budovy vede ke zlepšení architektonického vzhledu interiéru a exteriéru, odstraní příčinu a důsledky vlhkých koutů a povrchů, zlepšit světelné poměry, zlepšit mikroklima užívaných prostor, sníží náklady na spotřebu energie. Obnova budovy se dotýká zejména:

- systému větrání
- způsobu přípravy TUV
- výměny oken (okna lze vyměnit kompletně celá nebo lze vestavět a osadit nová tepelně izolační zasklení do ponechaného rámu původního okna)
- tepelné izolace střechy a fasády
- způsobu provedení tepelné izolace podlahy v suterénech
- způsobu eliminace tepelných mostů
- otopné soustavy⁶⁾.

⁶⁾ např.: za účelem snižování spotřeby energie z fosilních paliv, s tím související pokles emisí CO₂ do atmosféry, tj. snížení zátěže životního prostředí.

1.5. KONCEPCE A EKOLOGICKÉ PRINCIPY VE VÝSTAVBĚ

Je nutné si skutečně uvědomit, že přístupů k ekologickým principům ve stavební výrobě a užívání stavby je mnoho a aplikace koncepcí solárních opatření představují pouze jednu kapitolu možných cest. Ekologické a tedy energeticky úsporné principy v architektuře, ve výstavbě a v užívání díla lze například obsáhnout takto:

1.5.1. Ekologické a tedy energeticky úsporné principy

Přístupy v projektování:
Orientace a umístění stavby vzhledem k tvaru okolního terénu, vzhledem k místním klimatickým podmínkám (studené inverze) a převládajícím směrům místních větrů (větrná růžice, návětrné a závětrné strany terénu).
Orientace stavby, volba nosných a kompletačních konstrukcí, uspořádání vnitřních dispozic a provozu užívání vzhledem k světovým stranám (oslunění, intenzita oslunění, průměrné teploty).
Přístupy ve volbě zabudovaných stavebních materiálů:
Zateplení konstrukcí a tělesa stavby jeho zahloubením do terénu.
Zateplení konstrukcí alternativními materiály (lisovaná sláma, ovčí vlna, recyklovaná dřínovina)
Volba materiálů s příznivými parametry energetické náročnosti jejich výroby (el.energie, emise CO, CO ₂ , NO, SO, popel, jiný odpad, spotřeba vody), upřednostnění materiálů se snadnou recyklovatelností v jejich životním cyklu (např. hliněné podlahy, hliněné omítky, jílové omítky, domy a tlakem namáhané konstrukce z nepálené hlíny), upřednostnění materiálů se snadnou nebo příznivou ekologickou odbouratelností a minimálním zatížením životního prostředí jejich odpadními produkty (dřevo, střešní krytiny z došky nebo rákosu, domy s použitím konopí, juty a lnu), upřednostnění konstrukcí z materiálu, který je u konvenčních konstrukcí považován za odpad (tj. prodloužení životnosti výrobků, kdy namísto nich se nemusí vyrábět nové výrobky). (7)
Aplikace energeticky úsporných a ekologicky šetrných technologií:
Kondenzační kotle, zplyňovací kotle na dřevěné peletky a dřevěné palivo.
Zapojení do hospodářství výroby a spotřeby bioplynu.
Přehřev vzduchu teplem získaného rekuperací tepla ze vzduchu odpadního.
Využívání odpadního tepla vzniklého provozem a užíváním stavby.
Přehřev vzduch z registru uloženého v zemi.
Aplikace energeticky ziskových koncepcí:
Větrná energie, větrný mlýn, malé vodní elektrárny.
Solární architektura.
Tepelná čerpadla, inspirace řešením tepelného čerpadla systému VODA-VODA se zdrojem tepla odebíraného z kanalizační stoky (8)
Optické zesilující prostředky v solárních koncepcích (koncentrátory), tj. refrakční konstrukce (Fresnelovy ploché čočky), reflexní konstrukce (parabolická nebo plochá zrcadla, světlovody)
Rekuperace jiných forem energie (např.: rekuperace elektřiny provozem výtahových systémů – kabina výtahu směrem dolů se pohybuje vl.tíží)
Aplikace ekologicky šetrných technologií:
Odpadové hospodářství, kořenové čističky odpadních vod, vsakovací nádrže dešťových vod.
Hospodaření s pitnou a užitkovou vodou (dešťová) v samostatných systémech.
zelená střecha
aj.

1.6. TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI A SMĚŘOVÁNÍ

Ke komplexní problematice konstrukčního skla přísluší i otázky možných budoucích konstrukčních aplikací s ohledem na příslušný technologický pokrok, tedy:

„JAKÉ JE SMĚŘOVÁNÍ UPLATNĚNÍ KONSTRUKČNÍHO SKLA S OHLEDEM NA TECHNOLOGICKÝ VÝVOJ V BUDOUCNOSTI?“

Jako modelový příklad může sloužit studie návrhu Cubed Maze3(9). Studie představuje prostorové bludiště z modulově uspořádaných skleněných dílců z kompozitního materiálu, který obsahuje skleněný recyklát pospojovaný a zalaminovaný ve vrstvách do polymerní matrice. Z tohoto

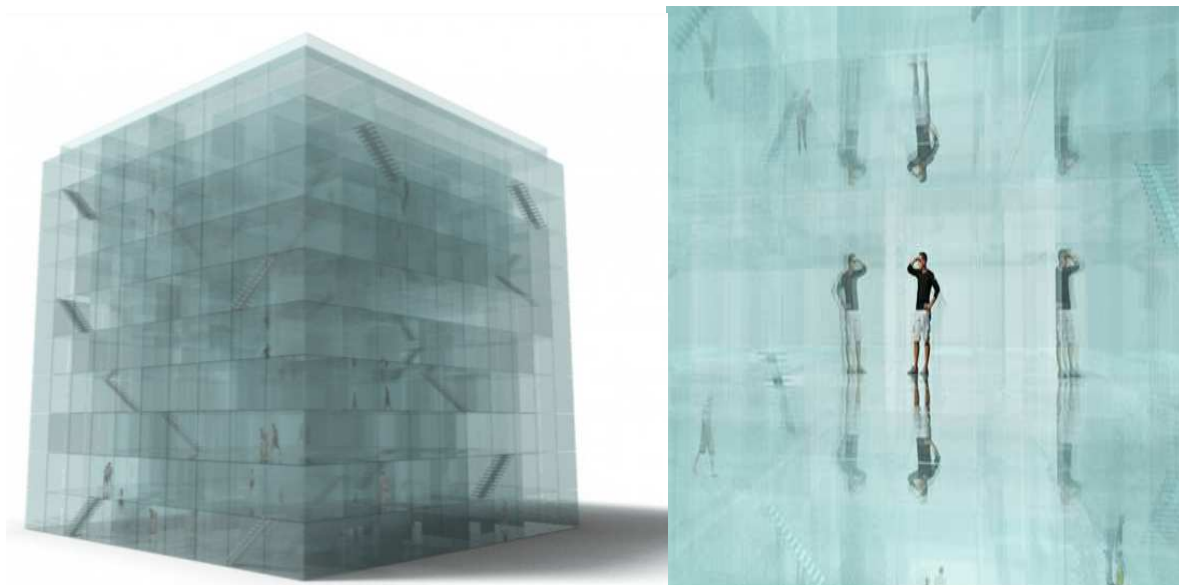
7 inspirace „architektem odpadu“ Michaelem Reynoldsem (<http://garbagewarrior.com/>).

8 pilotní projekt Hlavního města Prahy a PVS, a.s. na vytápění objektu

Základní umělecké školy, Na Popelce v Praze 5 tepelným čerpadlem využívající teplo odpadních vod ze stoky městské kanalizační sítě. (<http://www.gerotop.cz/cz/home/tepelne-cerpadlo-s-neobvyklym-remenim/>).

9 autor Phil Pauley, <http://www.philpauley.com/cubed.php>

kompozitu jsou navrženy všechny transparentní vodorovné a svislé nosné konstrukce (schodiště, rampy, podlaží, stěny, aj.).
Motivačním cílem bludiště je střešní kavárna s výhledem s tím, že návštěvníci mohou hledat cestu i napříč několika podlažími.



Samotná konstrukce bludiště ze skleněných prvků, tj. v maximální míře použitá aplikace skla pro vodorovné a svislé nosné konstrukce, nepředstavuje za dnešní technologické úrovně nedosažitelný cíl¹⁰.



Zmiňovaným „future“ přesahem konceptu je právě užití výše uvedeného skleněného kompozitu v takovém konstrukčním rozsahu s požadovanou pevností, potom zejména s požadovanou optickou transparentností a dalšími konstrukčními parametry.

¹⁰ architektura a design ateliéru Santambrogio, <http://www.santambrogio.com>

1.7. PROBLEMATIKA SKLA

1.7.1. Studijní prameny

Tématika a informační prameny obsahující klíčové slovo „sklo“ nabízejí mnoho možností a variant:

- jak s touto problematikou pracovat,
- z jakého pohledu informacemi postupovat a třídít je,
- jaký výzkumný „interval“ informací, tj. samotný obsah informačních pramenů, akceptovat a jaký již vyloučit ze zpracování.

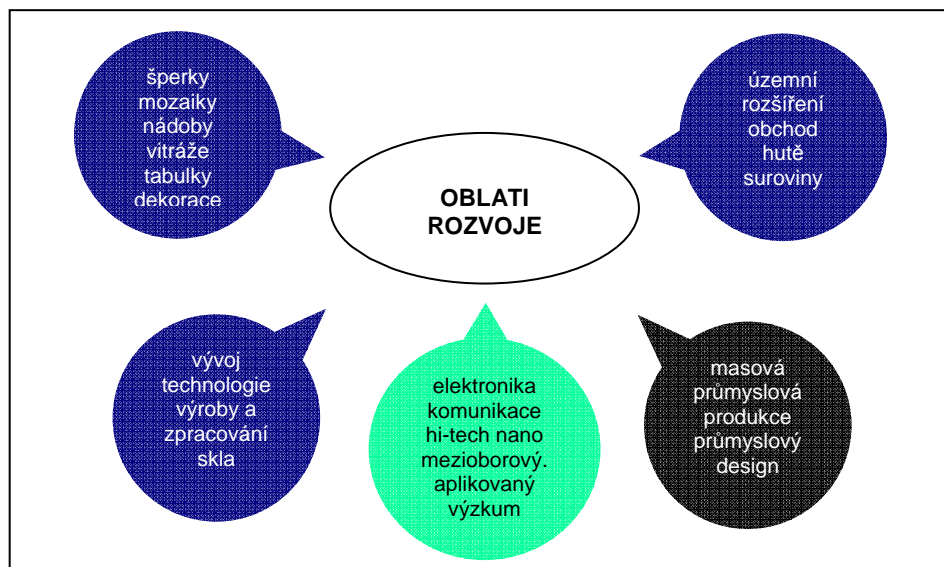
Dále jsou ilustrativně uvedeny příklady příliš specializovaných pramenů (např. historických nebo technologických), které jsou pro účely této práce zahrnuty pouze okrajově nebo jsou úplně vyloučeny ze zpracování:

- Sklo z období raného středověku v Českých zemích na základě nálezů z archeologických výzkumů, (<http://theses.cz/id/2cr081>),
- Sklo raně římské (30 př.n.l. - 25 n.l.), Sklo raného a vrcholného císařství (1. - 3. stol. n.l.), Sklo pozdně římské (4. stol.), Sklo doby stěhování národů (5.- 6. stol.), Sklo raně feudální (6.- 12. stol.), Sklo francké (6. - pol. 8. stol.), Sklo karolinské a otonské (konec 8. - 10. stol), Sklo raného středověku (11. - 12. stol.), (http://www.vlastimilvondruska.cz/sklarstvi_d.php),
- Vývoj sklářských forem a předforem v českých zemích do 19. století, Sklářská praxe 18. století I. - Barokní sklářský receptář, Tepelná bilance sklářských tavicích pecí, Vliv změny otopu na kvalitu skloviny z pánvových pecí, Pozorování vysokoteplotních dějů ve skelné tavenině a analýza vysokoteplotního obrazu, (Technika, technologie, <http://www.glassrevue.cz/>),
- obecně jsou to dále prameny o skle uměleckém, skleněné plastice, dekoračním, bižuterii, užitném skle, aj.

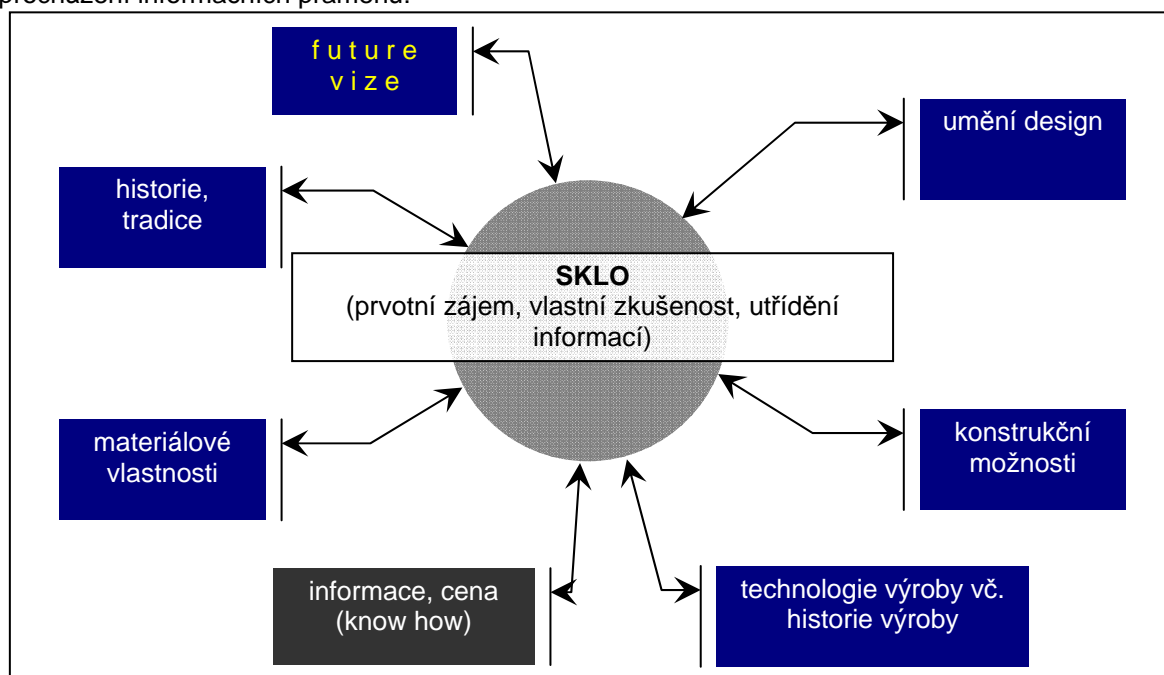
1.7.2. Systematizace informací

Na základě studia a procházení informačních pramenů lze vysledovat a konstatovat některé souhrnné tendence rozvoje skla v kulturním, civilizačním prostředí – antroposféře:

- rozvoj za účelem výroby dekorativních, užitných a estetických předmětů,
- rozvoj v důsledku územního rozšíření technologie výroby skla a adaptace této technologie na místní podmínky,
- rozvoj samotné technologie skla v důsledku -
- řemeslného pokroku,
- kulturního rozvoje společnosti,
- rozvoje přírodních věd,
- rozmach v důsledku průmyslové revoluce (průmyslové výroby a užitného průmyslového designu),
- rozvoj v důsledku moderních, současných, high-end, informačních a jiných technologií,



V důsledku výše uvedeného je pro účely této práce použit následující model kategorizace a procházení informačních pramenů:



1.7.3. Specifika informací

S ohledem na původ a zaměření informačních pramenů se rovněž liší i způsob terminologie, která popisuje totožnou vlastnost skla. Například chemické názvy surovin pro sklářskou vsádku a technologii výroby skla mohou rozdílně (tzn. ne „rozporuplně“, ale „odlišně~nepřesně“) uvádět informační prameny zabývající se historií skla ve srovnání s prameny chemicko-technologickými. V určité sérii informačních pramenů, které pocházejí ze stejného publikačního zdroje (autora, časopisu, atd.) lze vyzkoušet i „recyklaci“ informací, včetně možné nepřesné interpretace použitého původního informačního pramene. Rovněž odbornost a terminologie textů je různá například u výzkumných článků při porovnání s firemními prameny.

Specifický a kritický přístup ve vyhodnocování a ve výzkumném přínosu vyžadují informační materiály obchodní-prodejní, reklamní a prezentované s marketingovou strategií na pozadí. Právě vedlejším žádoucím, ale nezamýšleným účinkem vytvořené ucelené, systematicky strukturované a přístupné informační báze by měla být schopnost studujícího vyfiltrovat a eventuálně pracovat s materiály obchodně-prodejními a reklamními.

Studium informačních materiálů vyžadovalo tedy v některých situacích paralelní ověřování obsahu alternativními prameny.

Zcela záměrně byly vyloučeny do zpracování informační prameny o inteligentních skleněných fasádách / zdvojených fasád, jelikož tato konstrukční problematika je souhrnně a komplexně v současné literatuře dostupná.

1.7.4. Specifika skla

V základu vzato, sklo není běžný konstrukční materiál. Na příkladu dřeva nebo železobetonu lze popsat, že:

- tyto materiály lze dopravit na stavbu v podobě vstupních surovin a nebo stavebního materiálu,
- do konstrukce lze tyto materiály vytvarovat a zabudovat přímo na staveništi,
- dílčí opravy lze provést řemeslně přímo na stavbě ubouráním, výřezem a následným doplněním nebo nastavením nového dílu.

Naopak konstrukční sklo:

- do požadovaného tvaru se na stavbě ani odlévá a ani neřeže, (s výjimkou pěnového tepelně izolačního skla),
- do konstrukce se skleněné prvky zabudovávají již vyhotovené a upravené z tovární nebo dílenské výroby,
- opravy skleněných prvků jsou možné jedině nutnou výměnou poškozeného skleněného dílce.

Jelikož tedy není možné skleněné prvky volně „dotvářet“ přímo při realizaci dle konkrétních požadavků (tzv. „na míru“), je nutná znalost technologie výroby skla a možných úprav pro vhodnou volbu návrhu konkrétního skleněného prvku v konstrukci.

Sepjetí mezi technologií výroby, materiálovými vlastnostmi, možnostmi použití a reálného nasazení je v případě skla velmi těsné a zároveň omezující pro volný návrh.

Specifikou a výjimečností skla jsou rovněž jeho funkční vlastnosti a možnosti jejich souběžného využití v konstrukcích, a to:

- statickou únosností a materiálovou pevností (s určitými omezeními),
- optickou propustností pro energetické záření (vliv na hygienu, mikroklima a tepelnou pohodu),
- vizuální funkci (transparentností pro lidský zrak),
- prosvětlovací funkci pro lidský pohyb a orientaci v prostoru,
- uměleckým a estetickým působením pro lidské vnímání

1.7.5. Sklo v umění, architektuře a designu

S ohledem na celkové směřování práce lze souvislosti k tématu v této kapitole vyjádřit následujícím výňatkem z citace ⁽¹¹⁾:

„...Sklo je jediný materiál, který je čtyřrozměrný, na rozdíl od bronzu, kamene nebo dřeva. Lidé se skla bojí, protože je křehké. Sklo je tak citlivé, že jej může rozbít zvuk, ale je tak schopné žívlům vzdorovat, po tisíciletí. Je tvárné, bourá hranice mezi sochou a architekturou. Sklo je hmota a zároveň hmotu popírá. Hmota se stává snovou a zároveň odhmotnělou. Vytváří daleko působivější paralelu, ale vytváří ještě něco na víc – iluzi...“

1.8. METODIKA DOKTORSKÉ PRÁCE, METODOLOGICKÉ ZATŘÍDĚNÍ

Pro úplnost a formální komplexnost je zde uvedena použitá metodika vědecké práce:

- VÝZKUM - veden se záměrem o „nový pohled na již řešené problematiku“,
- DRUH VÝZKUMU - aplikovaný (účelový),
- ZAMĚŘENÍ VÝZKUMU – pozitivní, deskriptivní s popisem stávajících znalostí a interpretace možného vývoje,
- METODA VÝZKUMU – spekulativní s ověřováním a argumentací k interpretaci možného vývoje,
- ČASOVÁ NÁROČNOST – není ohraničeno, tj. trvá stále aktivní sledování problematiky skla

¹¹ Sklo je jediný materiál, který je čtyřrozměrný, prof.akad.soch.Marián Karel, Ústav průmyslového designu Fakulty architektury ČVUT, Technicall, vydání 3/2011

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL**2. DEFINICE PROBLEMATIKY - HISTORIE A TRADICE SKLA**

Tato kapitola je zařazena z přesvědčení a poznání, že ke komplexnímu poznání problematiky skla je vhodné se seznámit se základní historií skla obecně a zejména se základy historie technologie skla. Tato znalost a informace nejsou samozřejmě nezbytné, ale jsou zde zařazené s ohledem na v úvodní kapitole zmiňovaný multi-oborový přístup při architektonické tvorbě (viz. úvodní kapitola: **Formulace cílů**). Přinejmenším tato kapitola upozorní na klíčové momenty historie skla:

- **migrace technologie** výroby skla s ohledem na vývoj jednotlivých kultur a jejich provázanost (např. obchodními cestami),
- vliv **lokálních surovin** na technologii výroby skla,
- vliv **společenské poptávky** na vyráběný sortiment skla.

Obdobné volné paralely lze například hledat mezi konstruováním dřevěných konstrukcí a dendrologickými znalostmi vhodných dřevin.

Už v pravěku lidé vyráběli hroty šípů z přírodní formy skla, která se nazývá obsidián. Toto sklo je v přírodě tvořeno z vulkanické taveniny. Obsidián byl dlouho užíván k výrobě extrémně ostrých nožů nebo pro výrobu jednoduchých nástrojů⁽¹²⁾.

Rozvoj prvotní technologie výroby skla probíhal souběžně s rozvojem technologie výroby a zpracování kovů.

2.1. SVĚTOVÁ HISTORIE SKLA**2.1.1. Mezopotámie**

Jsou známy sklovité glazury (předchůdce skla) na keramické výrobky, šperky a nádoby⁽¹³⁾. Vyráběli se ze směsi písku, popela z mořských řas nebo popela stepní trávy bohaté na sodík, kalcitu a například drcených lastur. V klínovém písmu jsou dochované receptury na výrobu sklovitých glazur prostřednictvím posypu ze skleněné drtě, která se na keramickém výrobku znovu přivede do žáru a zataví.

Nejstarší známé fragmenty dutých nádob pochází z konce 16. století př. n. l., vyráběli se tvarováním technikou na pískové jádro, velikost se pohybovala okolo 10 cm. Obsahovaly oxid křemičitý, vápník a sodík, jednalo se tedy o sklo křemičité sodnovápenaté.

2.1.2. Sýrie

Sírii náleží prvenství ve výrobě skla, nálezy se v této zemi datují již do 5. tisíciletí. Prvními skleněnými předměty byly opakní perly a tyčinky různých barev. Jejich výroba probíhala navíjením skleněných nití. Výroba skla se postupně vyčlenila v době bronzové během 5. a 4. tisíciletí př. n. l. jako vedlejší produkt keramické výroby. Od **1. stol.** se sklo syrského charakteru šířilo po celé říši římské, skláři vyváželi výrobky a zakládali nové sklárny v Egejské oblasti, později v dnešní Itálii, Francii a v Porýní. Ve **2. stol.** přešli do oblastí dnešního Španělska, Belgie, Nizozemí, Švýcarska a Velké Británie. Proto je vývoj skla a sklářství v prvních třech stoletích ve východní a západní části Středomoří analogický.

Mimo jiné ze Sýrie pochází i v Evropě převzatý způsob výroby korunového nebo měsíčního skla.

2.1.3. Egypt,

Této oblasti nepřísluší prvenství ve výrobě skla, jeho výskyt byl doložen až kolem poloviny 4. tisíciletí⁽¹⁴⁾. Kolem roku 1500 př. n. l. vyráběli Egypťané láhve a vázy. Rostavili skleněnou hmotu, ze které potom vytahovali tenké proužky, kladli je na železnou tyč a oviňovali je kolem jádra z hlíny a písku. Někdy toto jádro naopak do roztaveného skla ponořovali.

2.1.4. Féničané

K této kultuře se připisuje první užití sklářské píšťaly a je tímto při výrobě skla vynalezena technika foukání skla sklářskou píšťalou.

¹² V mnoha zemích včetně USA je sběr obsidiánu v některých lokalitách zákonem zakázán.

¹³ Naleziště skleněných perel v sumerském Uru (2 250 př. n. l.), modré kobaltové sklo z mezopotamského Eridu (2 000 př. n. l.)

¹⁴ nejstarší nalezené sklo z pohřebiště u Théb, skleněná perla se stářím 5500 let.

2.2. EVROPSKÁ HISTORIE SKLA

Zjednodušeně lze uvést, že umění sklářství se z Egypta přesunulo do Říma, odkud po rozpadu říše se přesídlilo do centra Byzantské říše. Z Konstantinopole se po pádu Východořímské říše sklářství přemístilo do Benátek na ostrov Murano.

2.2.1. Kořeny

Od 4. stol. migrace sklářů, započaté v Sýrii, ustávají a výroba západní a východní se začíná ve tvarech odlišovat.

Na západě převažuje Porýnská produkce s těžišťem v Kolíně nad Rýnem, která s velkým uměním rozvíjí hutní dekory známé již z východu. Jsou to natavená hadovitá vlákna většinou s kontrastem barevného vlákna nebo různé druhy nálepu. Ve 4. stol. a hlavně v 5. stol. se v celé západořímské výrobě projevovaly patrné změny z úpadku zanikající římské kultury. Římská technologická tradice doznívá ve sklářské výrobě západní Evropy až do konce 1. tisíciletí našeho letopočtu.

Od 1. tisíciletí dochází k zásadnímu odklonu od antické technologie. Z produkce ubývá sklo sodné patrně pro nedostatek dovážených surovin a objevuje se sklo draselné, při jehož výrobě bylo použito jako tavidla drasla, tj. výluhu z popela lesních porostů. Písek k výrobě skla se získával drcením křemene. Touto technologickou změnou byl položen základ k odlišnosti skla zaalpského od skla z oblasti středozemí. Na severu se z pozdně franckého skla vyvíjí "lesní sklo", tj. draselné sklo zelenavé barvy, zatímco Itálie a jí ovlivněná výroba zůstávají věrně sklu sodnému.

2.2.2. Období Karolínského a otonského

Archeologické nálezy dutého skla pocházejí ze Skandinávie, Anglie a Holandska. Hlavní střediska výroby jsou dle písemných pramenů v severní Galii a Porýní. Odtud pochází sklo nalezené v Anglii, Holandsku, severním Německu a Skandinávii. Také lesnatá oblast na francouzsko-belgické hranici patřila zřejmě k místům, kde středověká výroba přímo navazovala na antické kořeny.

2.2.3. Benátské sklo

Místo významných objevů na přelomu středověku a novověku v oblasti přípravy surovin a vlastního tavení skla je Murano, malý ostrov poblíž Benátek.

Zde se podařilo dosáhnout první produkce bezbarvého skla, které se začalo používat pro výrobu luxusních předmětů, které svým vzhledem byly podobné předmětům do té doby zhotovovaných z nerostu horského křišťálu. K výrobě sodného skla se používal pobřežní mořský písek a soda získaná výluhem z popela mořských rostlin.

Muranští mistři si svého objevu cenili a chránili ho všemi způsoby. Sklář riskoval i svoji smrt v případě, že by se pokusil tajemství muranského skla z ostrova vynést. Sklářské rodiny požívaly šlechtických společenských výsad. Muránští mistři jako první na světě uměli sklo barvit a rýt.

Mezi benátskou sklářskou produkcí 14. století lze zařadit výrobku z koštěnkového skla.

2.2.4. Období 9. až 15. stol.

Od 9. až do 12. stol. byla výroba vázána na kláštery, v nichž se uchovávaly technologické znalosti starověku.

K postupnému rozvoji dochází koncem 12. a hlavně ve 13. stol. Důvod změny leží již v 11. stol. Podnikání křížových výprav vymanilo Evropu z izolace od východního světa, dochází k obnovování obchodních a kulturních styků s Blízkým východem. Na vzory z Předního východu navazují nejstarší v rukopisech vyobrazené láhve z 11.-12. století, charakteristické svým kulovitým a štíhlým vysokým hrdlem, které se našly v jižní Francii a v Itálii.

V západní a střední Evropě ve 12. a 13. stol. vznikají kromě klášterních hutí tzv. lesní hutě. Jsou to stěhovavé sklárny, které se v oblastech s hustými lesními porosty přesouvaly za dřevem a byly i předvojem kolonizace neobydlených horských krajín. Geografické podmínky pro vznik lesních hutí byly v Lotrinsku, Hesensku, Durynsku a v Českém lese. Lesní sklárny produkovaly většinou lesní sklo zelenavé, s bublinkami, puchýřky a nečistotou ve sklovině, jež byla způsobena minimálním čištěním surovin (potaše a písku). V 17. stol. byly nedostatky lesního skla částečně odstraněny přidáváním vápence do taveniny (tzv.: „křídové sklo“), který zlepšil čitelnost skloviny.

Ve 14. stol. byla ve Francii zavedena výroba plochého skla pro okenní tabulky. Sklo se rozfukovalo píšťalou do velkých válcovitých těles, které se rozřezávaly a ještě horké rozžehlovaly a rovnaly ve sklářské peci. Tato technologie pronikla do Francie právě z Benátek, a proto tento postup výroby skla jako „benátský“ pronikl v 15. stol. i do barokních českých zemí. Později se sklo foukalo do skleněných koulí, které se pak na opačném konci od píšťaly otevřely a roztočily do plochy o velikosti až 150 cm v průměru. Takto vyrobené sklo se označovalo jako „korunové“ (angl.: Crown Glass) nebo „měsíční“ (němec.: Mondglas). Při roztáčení do plochy se sklovina rovněž tvarovala tlakem o hladítko. Oba uvedené postupy výroby plochého-tabulového skla se udržely společně. Technologickým

zdokonalováním podnítily také vznik samostatné profese skláře-tabuláře a vynutily si i speciální úpravy hutí, kdy se tabulář pohyboval na plošině rozepřené nad jámou, do které se sklo na píšťale vyfukovalo. Později v závěru 18. stol. vyráběné tabule z válců mohly dosahovat po rozvinutí rozměrů až 3,0 x 1,5 m.

Od roku 1688 se za Ludvíka XIV. vyráběla velkoplošná zrcadla litím na kovovou desku, kde byla tuhnutí sklovina následně válcována. Kvůli snaze obchodně konkurovat benátské sklářské produkci byla založena ještě dříve v roce 1665 sklářská společnost "Compagnie de Saint Gobain".

Ve 13. a 14. stol. roste výroba nápojového skla ze skla zeleného. Různé formy kutrolfů (číše a číšky zdobené různými dekory) se rozvinou ve 2. pol. 15. stol. ve známý krautstrunk (velké plastické nálepy) a v 16. stol. v römery. Prameny uvádějí tradici, že zelené sklo je zvláště vhodné při podávání bílého rýnského vína.

2.2.5. Období 16. až 18. stol.

Probíhá pokračující expanze lesního sklářství na sever od Alp. Ve srovnání s drahým benátským sklem je sklo lesní dostupné středním měšťanským vrstvám. Tvary středoevropského lesního skla jsou oblíbené v Německu, Čechách, Holandsku, Francii a ve Skandinávii. Zájem o tyto výrobky trvá až do 18. století. Od 2. pol. 16. stol. se u lesního skla projevují renesanční prvky.

Nejčastějším tvarem v 16. stol. je soudkovitý krautstrunk, römera, válcovité vysoké číše - tzv. stangenglas. Tyto vysoké nádoby se často podávaly kolem stolu a bývaly zdobeny spirálovitě ovinutými vlákny (bandwurmglass) nebo vlákny ve vodorovných pásích (passglas). Tyto pásy pak ukazovaly, kolik má každý "povinnost" vypít. Pohár s velkou zaoblenou kupou, dutým dřikem válcovitého tvaru a zvonovitou nejčastěji vinutou nohou se nazývá römer. Jeho název pochází nejspíše ze slovesa roemen = slaviti a původně asi představoval pohár pro slavnostní přípitky. Po roce 1630 se začínají na römerech objevovat pro ně typické nálepy ve formě malin, které byly tvarovány razidlem. Römery se hojně vyskytují na malbách holandských malířů 16. a 17. století. Mezi kuriózní typy německého skla 17. století se řadí tzv. Daumenglas. Jedná se o sklenice s několika prohlubněmi, do kterých se vejdu prsty a piják se nemusí obávat, že by mu sklenice vyklouzla z ruky. Velmi populární nádobou byla picí láhev s hrdlem splétaným ze dvou a více rourek, rozšířená zejména v Německu, kde byla nazývána kuttrolf, případně angster. Navazovala na syrské vzory. V antice však sloužily podobné nádoby jako schránky na parfémy a na jihu Evropy si podržely tuto funkci i ve středověku a v renesanci. Poprvé je kuttrolf v Německu zmíněn roku 1220 v eposu Willehalma jako "gutteral" na víno. Ve 14. století jsou kuttrolfy známy i ve Francii, v 16. a 17. století se vyráběly v Benátkách. Nikde však nedošly takové obliby jako v Německu, kde je dokázána dokonce masová produkce kuttrolfů ve Spessartu již roku 1409. Jako láhve na víno a pálenku se kuttrolfy běžně užívají ve střední Evropě hluboko do 17. století, doznívají dokonce v 18. a 19. století v lidovém skle.

2.2.6. Jazykové doplnění

České slovo *sklo*, ruské *stěklo* a litevské *stiklas* ukazují na společný balto-slovanský slovní základ (staroslověnské slovo *stiklo*) odlišný od západních (germánských a románských jazyků). Původ slova *sklo* lze rovněž odvodit od slova *stékati* (z gotského označení pro nádobu na pití – *stikls*).

Anglické (také anglosaské) *glass* pochází z latinského *glacies* znamenajícího led nebo název rostliny *glastum*, jejíž popel byl používán jako tavidlo. V němčině *Glas*, v staré angličtině *glaes*. Germánské kmeny užívaly slovo *glaes* na popis jantaru, římským historikem byl zaznamenán jako *glaesum*. Anglosasové užívali slovo *glaer* pro jantar. Původ slova *glass* lze rovněž odvodit od anglosaského slova *gelixam*, tj. lesknout se.

2.3. ČESKÉ ZEMĚ

2.3.1. Původ

Nálezky na našem území ze směnného obchodu ze syrské oblasti a Egypta se datují k 17.- 12. stol. př. n. l.. Jedná se o keltské nálezky u Strakonice (skleněné náramky a nádoby). Od 5. stol. př. n. l. je na našem území vyráběno už původní keltské sklo.

Archeologické nálezky na území Velké Moravy (Velehrad a Dolní Věstonice) dokazují provozování sklářského řemesla v českých zemích již v 8. a 9. století n.l.

Ve 12. stol. je dokladována výroba tzv. chrámového skla, například v Sázavském klášteře za benediktinského opata Reginarda z Met v letech 1162. Výroba skla nejenom na našem území byla zpočátku doménou církve a především mnichů Benediktýnů, kteří vyráběli skla do oken kostelů a klášterů. První zmínky o této výrobě jsou již z 9. století. Ve středověku se sklovina na našem území tavia podle receptu mnicha Theophila ze „dvou dílů“ bukového popela (potaše) a „jednoho dílu“

křemičitého písku. Sklovina byla bezbarvá, slabě žlutá, hnědá nebo zelená. Použitím oxidu kovů se sklovina zbarvila do modra.

Ve 13. a 14. stol. dochází k rozvoji sklářství za Karla IV.. Jsou zakládány první putovní světské sklárny lesní (Wanderhütten). Po vykácení dřeva v okolí se výroba přesunula o několik kilometrů dál. Za vlády Karla IV. se začaly osazovat do oken kostelů barevné vitráže. První psaná zmínka o výrobě a produkci barevného a malovaného skla pro okenní vitráže pochází z roku 1276.

Skláři na našem území byli známí technologií zvanou „procédé de Bohéme“, tzv. „český způsob“. Proces výroby probíhal foukáním skla do válců, jeho následným rozstřihnutím, rozvinutím zchlazené skloviny do roviny a jejím vyhlazením (viz. předchozí kapitola: **Období 9. až 15. stol.**). Tato technologie byla na našem území zdokonalena natolik, že v roce 1448 byly povolány čtyři české sklářské rodiny do Alsasko–Lotrinského vévodství k jejímu předvedení a pro následný úspěch, v průběhu let vedoucí k založení přes čtyřicet hutí, byli členové rodin povýšeni do šlechtického stavu.

2.3.2. Sklářské hutě

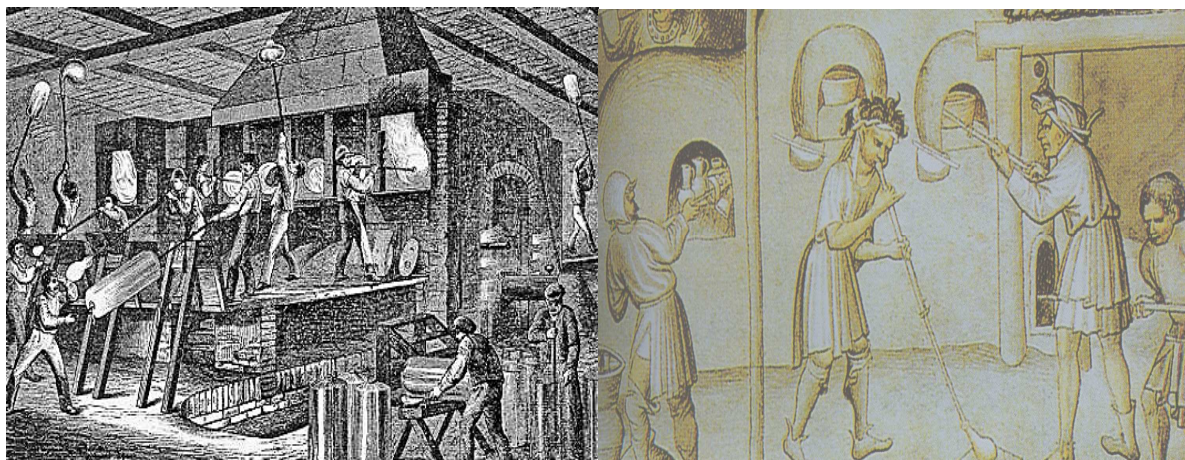
Existence nejstarších sklářských hutí na našem území byla dokázána zčásti písemnými prameny, zčásti povrchovými výstupy v terénu a nepřímými názvy některých městeček a vesnic. Jejich názvy se ve velké míře zachovaly do dnešních dnů, například: Skláře, Skelná huť, Staré hutě. Důležitou podmínkou pro výrobu skla byl dostatek dřeva na výrobu salajky = potaše, vody a suroviny k výrobě skla = křemičitého písku. Všechny tyto podmínky velmi dobře splňovaly pohraniční oblasti Čech: Krušné hory, Jizerské hory, Orlické hory a Šumava. Proto se do těchto oblastí začaly stěhovat sklářské rodiny.

Na severu Čech, na Jablonecku, je doloženo spolu s kupními smlouvami působení skláren od poloviny 14. století. Sklárny a hutě byly zakládány v Jizerských, Orlických a Krušných horách, např.: Sklenařice nad Jizerou, Chříbská, pro výborné podmínky výroby a dostatek surovin.

Pro výborné podmínky výroby se skláři dostali do situace přebytku svých výrobků na domácím území. Měli možnost výrobu snížit nebo vyrobené zboží vyvážet do sousedních zemí. Rozhodli se pro možnost vývozu. Nejstarší písemný doklad o obchodování se sklem je z roku 1376, je to smlouva mezi sklářem z Vysokého Mikulášem Queyssem a Hanušem z Hlohova o dodávce dvaatřiceti set skel. Kolem roku 1430 se skleněné perličky ze šumavských hutí vyvážely přes Norimberk až do Španělska. V 16. století se v Lužických a Jizerských horách a v Krkonoších usazuje řada hutímistrů ze sousedního Saska.

Středověcí skláři byli skvělými řemeslníky a také vynikajícími návrháři a výtvarníky. Proto sklářští mistři byli lidé svobodní bez poddanských závazků k majiteli. Od roku 1497 byli přijímáni mezi rytíře a za vlády císaře Rudolfa II. dokonce mohli získat šlechtický titul⁽¹⁵⁾.

Sklářský kmen se vyráběl z křemene a popela bukového dřeva. Dřevo z okolí hlubokých lesů se využívalo na otop a na výrobu sklářského kmene. Každá huť se zpravidla skládala ze třech různě velkých pecí. Největší pec byla pecí tavící a dvě menší byly pravděpodobně pecemi pomocnými. Jejich přesná funkce není známa, ale snad byly používány k temperování pánví, chlazení výrobků nebo k sušení sklářského kmene.



Obrázek pece <http://euro.e15.cz/profit/19-milniku-ceskeho-hospodarstvi-12-900929>

¹⁵ např. dynastie sklářských hutímistrů Schürerů a Wanderů. Rodina Schürerů v severních Čechách prováděla tavbu modrého kobaltového skla.

České sklo se stalo vyhledávaným obchodním artiklem a od 17. století vstoupilo na evropské trhy¹⁶). V roce 1724 získal brusič skla Josef Palme královské povolení na stavbu lustrů. V malé vesničce Prácheň u severočeského města Kamenický Šenov tak byla otevřena první dílna na výrobu lustrů. Do poloviny 18. století si české křišťálové lustry zcela získaly Evropu a ovlivnily pozdější vývoj a styl lustrů ve světě. Obchodníci se sklem pocházející zejména z Kamenického Šenova a Nového Boru se organizovali v obchodních společnostech, které je zastupovaly v evropských velkoměstech a přístavech v Americe.

V tomto období česká sklářská produkce obohatila svůj sortiment několika technologickými pokroky a vynálezy. Začalo se vyrábět mléčné, tzv. koštěnkové sklo připomínající porcelán. Sklář a technolog Friedrich Egermann z Nového Boru vynalezl opakní barevné skloviny (žluté a červené lazury, opálu, lithyalinu). Hrabě Buquoy na Šumavě vynalezl černý a červený hyalit. Později na Sázavě utavil František Kavalír ve třicátých letech 19. století první chemicky odolné sklo na světě.

2.3.3. Nejstarší sklářská škola

Nejstarší odborná sklářská škola ve světě vznikla v Kamenickém Šenově v roce 1856. Další škola byla založena později v roce 1870 v Novém Boru.

2.3.4. Český křišťál

Slovo křišťál pochází z řečtiny. Tímto výrazem se nazýval led, tedy voda v pevném skupenství, vyznačující se čistotou, průzračností a chladem. V horách se nacházel nerost, který připomínal led - bezbarvé, čiré, průzračné a chladné monokrystaly oxidu křemičitého. Označení pro led se proto přeneslo na tento vyhledávaný materiál a bezbarvé monokrystaly křemene se nazývaly horským křišťálem.

Nedostupnost a obtížná opracovatelnost horského křišťálu vedla ke snaze získat materiál s podobnými vlastnostmi jinou cestou než hledáním v horách a tuto cestu nabídla technologie výroby skla. Ve sklářství se pojem křišťál objevil v okamžiku, kdy se podařilo vyrobit skutečně bezbarvé sklo. Původní skla vždy obsahovala určité množství oxidů železa, pocházejících ze sklářských surovin, což ve spojení se způsobem výroby ve starých sklářských pecích vedlo k tomu, že starověká a středověká skla měla vždy poměrně intenzivní nazelenalý odstín.

Tajemství výroby čistého skla z Benátského Murana a jeho další rozvoj byl výzvou pro skláře prakticky po celé Evropě. Na přelomu 16. a 17. stol. se centrem výroby křišťálového skla staly Čechy. Původní křišťály obsahovaly jako tavivo velké množství oxidu sodného. To usnadňovalo výrobu křišťálu, ale sklo mělo nízkou tvrdost. Tato vlastnost znemožňovala použití pro dekoraci skleněných výrobků technologii rytí, která však byla hlavní technikou používanou při zpracování horského křišťálu. Zásadní technologické objevy při výrobě křišťálu, v té době učiněné v Čechách, vedly ke vzniku požadovaného křišťálového skla, vhodného ke zušlechťení rytím a broušením. Toto sklo pod názvem český křišťál představovalo kvalitativní špičku v oboru křišťálových skel na dobu delší než jedno století. Když se později zjistilo, že přídavek oxidu olovnatého výrazně zlepšuje především jeho optické vlastnosti, zrodil se olovnatý křišťál a rozšířil se po celém světě.

2.3.5. České křišťálové lustry

České křišťálové lustry byly vyhledávané tehdejší aristokracií. Paláce francouzského krále Ludvíka XV., rakouské císařovny Marie Terezie i ruské carevny Alžběty byly mezi těmi, jimž Palmeho originální lustry vtiskly pečeť dokonalosti. České křišťálové lustry, jako symboly dobrého vkusu, bohatství a urozenosti, se staly stejně prestižními jako drahé šperky. Třpyt českých křišťálových lustrů zdobí lesk zámků a paláců hlav států, ozařuje parlamenty, vládní rezidence, university, koncertní sály, chrámy a svatyně po celém světě. České křišťálové lustry visí například v milánské La Scale, v Královské opeře v Římě, ve Versailles, v petrohradské Ermitáži nebo v rezidenci krále Ibn Sauda v Ryjádě.

¹⁶ Rodině Müllerů v sklárně na Šumavě je připisován objev českého křišťálu.

2.4. SKLO 20. STOLETÍ

2.4.1. 19. a 20. století

Přelom 19. a 20. století je o secesi a jejím vlivu na sklářskou výrobu, o české účasti na Světové výstavě v Paříži a Grand prix. Je to doba mezinárodních úspěchů Loetzovy sklárny v Klášterském Mlýně. Je to zvuk secesního skla z Karlových Varů, Nového Světa, Košťan a dalších míst. Je to doba Riedlových skláren a barevné škály jejich tyčového skla a ostatních bižuterních polotovarů.

Začíná strojní výroba lahového skla na Teplicku, kde byly nainstalovány první Owensovy automaty na výrobu lahví. Jejich zakladatel Josef Max Mühlig dále vyjednal s belgickým vynálezcem Emile Fourcaultem zavedení výroby plochého skla tažením pásu přes výtlačnici z hladiny sklářské vany. Stalo se tak roku 1919 v Mühligově sklárně v Hostomicích na Teplicku. J. M. Mühlig tak dal přednost před konkurenční ale časem ustupující metodou výroby plochého skla „Oppermann – Lubbers“, která spočívala ve výrobě tabulí skla ze strojem foukaných válců.

Průmyslový rozmach nejen sklářské strojní výroby mohl být nastolen v důsledku dostupnosti uhlí a kvalitních sklářských surovin v severozápadních a západních Čechách a dále v důsledku dostatku pracovních sil, které vzešly na základě společenských transformací průmyslové revoluce. Dostupnost uhlí jako paliva sklářských pecí, které nahradilo dosavadní palivové dřevo, mělo za následek přesun roztroušené výroby z původně lesních oblastí do koncentrovaných průmyslových sídel.

Přelom 19. a 20. století je také doba tvorby sklářských výtvarnic Z. Braunerové a M. Kirschnerové. Rozmezí mezi dvěma válkami je o skle v Čechách po vzniku samostatné Československé republiky. Je to čas nastolení jeho postavení na zahraničních trzích. V roce 1920 je založena sklářská škola v Železném Brodě a Státní výzkumný ústav sklářský v Hradci Králové. Je to doba S. Ratha, J. Horejce i J. Drahoňovského, jejich žáků a českého skla ve stylu funkcionalismu a art deco. Vyrábí se broušené sodnodraselné sklo a olovnatý křišťál. Další významná jména v oboru jsou A. Metelák, L. Smrčková a L. Prostředník, J. Brychta. Je známá produkce železnobrodských figurek, produkce borských a šenovských rafinerií, aplikace uměleckého skla v architektuře a unikátních lustrech. I světová hospodářská krize měla vliv na sklářskou výrobu, obchod a na účast českého skla na výstavách.

2.4.2. Období v letech 1945-1970

Čtvrtstoletí omylů a objevů českého sklářství probíhá v letech 1945-1970. Došlo k poválečné obnově odborného sklářského školství a sklářského průmyslu, znárodnění firem, zakládání národních podniků, monopolizaci sklářské výroby i zahraničního obchodu. Poúnorové období provází likvidace všech soukromých podnikatelských aktivit, krize sklářské a bižuterní výroby a zahraničního obchodu.

V padesátých letech 20. století se rozvíjel sklářský vývoj a výzkum. Došlo k praktické aplikaci technologií výroby tavením křemene a čediče, nekonečného skleněného vlákna, pěnového skla⁽¹⁷⁾, netradičních optických skel, chemicky i tepelně odolného skla SIMAX.

Dochází ke vzniku Ústředního výtvarného střediska průmyslu skla a vzniku podnikových výtvarných středisek. Výtvarně se zpracovává tavená skleněná plastika, objevuje se nové české sklo na výstavě EXPO 58 a na dalších výstavách v zahraničí. Dochází k překonání pomyslné hranice mezi užitým a volným uměním sklářů a to například díly S. Libenského, R. Roubíčka aj.

Sklo se stalo uměním současnosti. Je o průmyslové sklářské výrobě a ateliérové sklářské tvorbě v 70. a 80. letech. V roce 1969 je podle anglické licence zahájena výroba plochého skla metodou Float v Řetenicích a automatizace výroby domácího skla v Novém Boru, Světlé nad Sázavou aj. Provozuje se ruční výroba hutního, malovaného, broušeného, rytého a ručně lisovaného skla. Existuje autorská sklářská česká tvorba, které se dostává mezinárodního ohlasu, stejně jako českému sklu v architektuře, budování prvních soukromých sklářských pecí v Novém Boru, sklářským sympoziím aj.

České sklo na konci druhého tisíciletí je o sklářské výrobě po pádu komunistického režimu a návratu k soukromému vlastnictví a podnikání, je o rozpadu státních podniků, restitucích majetku a privatizaci, nových firmách. České sklo se objevuje na světových trzích v pozici konkurence, dochází k investicím do modernizace strojní sklářské výroby, k účasti zahraničního kapitálu. Nastavuje se nová filozofie sklářského podnikání, výtvarných aktivit příslušníků všech generací a jejich hlavních představitelů.

¹⁷ použito např. při výstavbě československého pavilonu na Světové výstavě v Bruselu v roce 1958

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL**3. DEFINICE PROBLEMATIKY - VÝROBA SKLA**

Sklo je materiál s výrazným vlivem na vývoj architektury a stavební techniky. Sklo, stejně jako například dřevo, kámen nebo kov, se uplatňuje svým technickým potenciálem (užité vlastnosti, jedinečné fyzikální vlastnosti) a výtvarným potenciálem (architektura, design, interiér, svítidla nebo dekorace).



Exeter Cathedral, the Cathedral Church of Saint Peter, Exeter, Devon, South West England, 1400

Sklo je rovněž materiál s neopomenutelným vlivem v evropské vědě ⁽¹⁸⁾:

„Využití skla mělo být tím, co během průmyslové a vědecké revoluce oddělilo v průběhu 17. a 18. století západní civilizaci od ostatního světa. Bez skla by nebyl vytvořen mikroskop a dalekohled. L. Pasteur by neodhalil původce infekčních nemocí a neodstartoval revoluci lékařství. Biologie by nezkoumala dělení buněk, nepoznala chromozómy a posléze i DNA. Galileiho zkoumání sluneční soustavy by zůstalo ve sféře filozofie. Bylo to sklo, které podnítilo vynález parního stroje. Ten by nevznikl bez barometru, tlakoměru, teploměru a pumpy na vzduch, což umožnilo nakonec objevy Roberta Boylea. A vedlo to nakonec ke strojům vykonávajícím mechanickou práci zvládnutím expandujících plynů.....“

3.1. HISTORIE VÝROBY**3.1.1. Sklářské hutě**

Nejdříve se sklo tavilo v otevřených jámových pecích. Nejstarší sklářské pece byly jednoduché objekty kruhového půdorysu zbudované z kamene a jílu. Měly zaklenutou horní část, která vznikla dusáním kvalitních a žáruvzdorných jílu. Technologie tavení se postupně zdokonalovala a již v době římské byly známy velmi dokonalé typy pecí.

V nejstarších dobách se sklo tvarovalo navíjením na hliněné jádro, stavováním z kousků barevných tyčinek (sklo mozaikové a millefiori), vybrušováním z bloku skla a tavením skleněné drti ve dvoudílné formě nebo metodou na ztracený vosk. Teprve v 1. století před naším letopočtem byla vynalezena technika foukání skla sklářskou píšťalou.

Ve 13. století měly hutě jednoduché dřevěné přístřešky. Mezi nálezy jsou i zlomky technické keramiky - zlomky pánví a kelímků z jílu, mísovité nádoby na tavení skla, malé pánvičky na tavení malého množství skla, malé pánvičky pro barvy, používané k plastické výzdobě nádob, šamotové části pecí a jednoduché nástroje. Nářadí starých sklářů v 13. století není známo, byly nalezeny jen malé fragmenty sklářských píšťal.

Ve 14. století se půdorysy tavicí pece mění na podkovovitý, později až na obdélný tvar. Zdokonalováním konstrukce tavicí pece chtěli skláři dosáhnout nejlepšího teplotního režimu, který ovlivňoval délku tavby a výši teplot a tím následnou kvalitu skla. Součástí tavicích pecí byly i chladicí

¹⁸ Alan Macfarlane, Cambridgeská univerzita, <http://www.alanmacfarlane.com/glass/AMED.pdf>, převzato ze serveru AKADEMON.CZ, <http://akademon.cz/search.asp?searchtext=Alan+Macfarlane>, 17.9.2004

komorové pece, ve kterých se z výrobků postupným chlazením eliminovalo vnitřní prnutí skloviny. Výrobky se do chladicí pece vkládaly v keramických chladících hrncích, kde se ochlazovaly z teploty 400 °C na 50 °C i po dobu několika hodin až dnů.

I přes tyto změny technologický proces foukání skla zůstává ve svém základním principu po staletí stejný, avšak probíhá na vyšší technologické úrovni.

Až do sedmdesátých let 19. století se sklářské pece vytápěly dřevem. Potom začaly využívat generátorového plynu vyráběného spalováním dřeva nebo hnědého uhlí. Sklářny se tak stěhovaly z lesů do blízkosti hnědouhelných dolů nebo železničních stanic.

3.1.2. Sklářská píšťala

Byla vynalezena ještě před změnou letopočtu ⁽¹⁹⁾ a stala se základním sklářským nástrojem nezměněným až do dnešní doby. Tímto vynálezem, který se zřejmě právem přičítá Féničanům, se výroba skla mnohonásobně zrychlila, zjednodušila a zlevnila. Tekutou sklovinu nabíral sklář na dutou píšťalu a střídavým foukáním a vyvalováním na mramorové desce z ní vytvářel baničku. Baňka byla stále nahřívána, aby zůstala vláčnou, nabírala se na ní další sklovina a tvarovala se různými nástroji a pomocí formy a byla pak základem každého foukaného výrobku. Baňku můžeme vrstvit různě barevným sklem, roztáčet do okenního terče nebo fouknout do dvoudílné dřevěné formy, která určí její tvar.

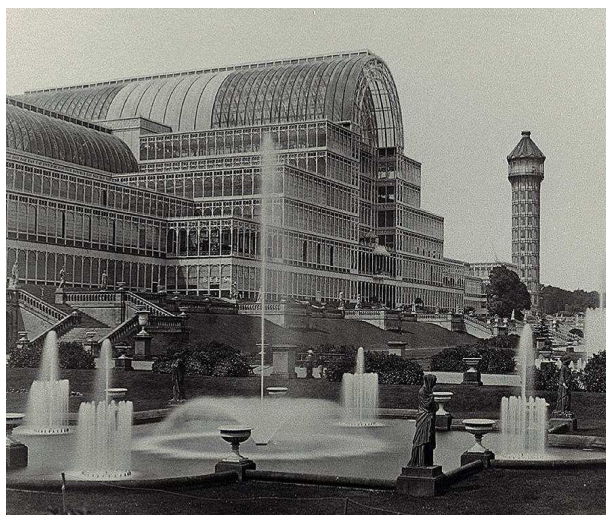


Zdroj: expozice společnosti RÜCKL CRYSTAL a. s., Nižbor

3.1.3. Výroba plochého skla v 19. a 20. století

V návaznosti na Fourcaultovu metodu výroby plochého skla a metodu Oppermann – Lubbers se vyprofilovaly další metody výroby plochého skla. Například v Holešově u Plzně a později v Chudečicích u Bíliny byla provozována diskontinuální výroba plochého, z pánví litého a následně válcovaného zrcadlového skla francouzsko-německým systémem Bicheroux. Kusové ploché sklo bylo dále leštěno na otáčivých stolicích postupně z jedné a po obrácení z druhé strany. Sklo se na leštící stolice upevňovalo sádrou. Leštění probíhalo v několika následných cyklech s postupně jemnějším brusivem a leštivem.

¹⁹ pravděpodobně v Sidonu kolem roku 30 př. n. l.



The Crystal Palace, Joseph Paxton, Hyde Park, London, England, 1851

V roce 1935 byla zavedena společností Pilkington Brothers výroba kontinuálně litého a válcovaného plochého skla s oboustranným broušením a leštěním. Zařízení na tuto výrobu se nazývalo konvektor. V roce 1957 uvedla opět tato společnost první „float“ výrobu plaveného plochého skla, kde hladina roztaveného cínu vespod a plamen shora nahrazovaly následné procesy broušení a leštění povrchu skla.

3.1.4. Výroba opálového skla ve 30. letech 20. století

V souvislosti s rozvojem světelné reklamy na fasádách budov se vyráběly a užívali žárovky z opálového skla. Toto sklo se vyrábělo vrstvením mléčně zbarvené skloviny na tabuli čirého skla. Vrstva dosahovala tloušťky do 0,4 mm. Silnější vrstva opálového skla by snížila průsvitnost pro světlo žárovky. Mléčného zákalu ve sklovině se dosahovalo přidáním živce nebo kryolitu při tavení skloviny.

3.2. SOUČASNÁ VÝROBA

3.2.1. Základní technologický postup výroby skla

Sklo se vyrábí tavením směsi z písku (oxidu křemičitého, křemene, pazourku) ve sklářské peci za pomoci alkalických tavidel, tj. látek, které tavení písku usnadňují (uhličitan vápenatý v podobě vápence nebo mramoru, kalcinovaná soda nebo se síran sodný, uhlí a popř. skelný odpad). Při výrobě draselných skel se používá místo sody potaš. U výroby olovnatých skel místo uhličitanu vápenatého používá ve směsi oxid olovnatý nebo častěji minium (suřík). Směs upravených, mletých, vysušených a navážených surovin se homogenizuje v mísících zařízeních.

Tato připravená surovina (sklářský kmen) se dopravuje do plynové pece, kde se při teplotách 1 500 °C roztaví na řídkou sklovinu, která se vyčeří. Dle složení výsledného skla a tedy výchozího sklářského kmene se rozsah teplot tavení pohybuje v rozmezí 1 350 -1 600 °C .

Taví se ve sklářských vanách nebo ve velkých ohnivzdorných kelímcích, zvaných sklářské pánve. K výrobě malého množství skla se používají pece pánvové. Pod žáruvzdornou klenbou stojí několik šamotových pánví, kolem kterých hoří plyn. Pro řemeslné zpracování se sklovina odebírá sklářskou píšťalou.

Mechanizace a automatizace výroby obalového a plochého skla vedly ke konstrukci velkokapacitních průtokových pecí vanových s denním výkonem až 200 tun skloviny. Pro tavení skloviny slouží plamenný regenerativní tavící agregát, který je vytápěn zemním plynem a předehřátým vzduchem⁽²⁰⁾. Vzduch se předehřívá v regenerátoru se stojatými komorami. Zemní plyn je přiváděn z doregulační řady tlakem cca 50 kPa. Vytápění zemním plynem probíhá s tepelnou účinností 15 až 20%. Dalším při-ohřevem prostřednictvím přímého průchodu elektrického proudu taveninou (tj. elektrické tavení), kdy vlastní sklovina působí jako topný odpor, vzroste tepelná účinnost vytápění až na 70%.

Odporové tavení elektrickým proudem s dosahovanými teplotami až 1 700 °C je výhodnější v malých pecích, protože tepelná účinnost tohoto procesu je dvakrát až třikrát vyšší a tedy výhodnější ve srovnání s tavením při spalování zemního plynu. Rovněž zde nedochází k produkci spalin. Naopak tavení spalováním zemního plynu je výhodnější u velkých pecí z důvodu „dražší“ elektřiny.

Současný vývoj směřuje ke snížení obsahu alkalických sloučenin i v levnějších užitkových sklech (láhvové, okenní). Uhličitan sodný je totiž nejdražší součástí používanou k jejich tavení a síranu sodného se může k tomuto účelu použít jen v omezené míře (např. pro hnědé sklo). Postupuje se při tom tak, že se přidávají levnější nerosty barya a fluoru jako tavidla a obsahem alkalických sloučenin se současně zmenšuje také obsah SiO₂.

Kelímky a vany, v nichž se taví optické sklo (tj. sklo pro optické přístroje), se v moderních provozech v rostoucí míře obkládají platinou.

3.2.2. Úprava a přehled sklářských surovin

Pro dosažení požadovaných vlastností je potřeba suroviny v základu upravovat:

- drcením na frakce a otíráním
- plavením
- praním (odstranění odplavitelných, prachových, jílovitých částic)
- tříděním (docílení požadované zrnitosti frakce 0,6-0,1 mm a 0,1-1,0 mm) a protiproudým tříděním.

Pro výrobu skla požadované vyšší kvality a jakosti je dále zapotřebí náročnějších způsobů úpravy, které vedou ke snížení obsahu barvicích oxidů kovů (Fe₂O₃, TiO₂, CrO):

- elektromagnetická separace
- flotace
- chemické čištění

příklady limitních koncentrací barvicích oxidů kovů přípustné v písku pro výrobu bezbarvého skla	% hmotnostních
Fe ₂ O ₃	0,005 - 0,010
TiO ₂	do 0,5
Cr ₂ O ₃	0,0001 - 0,001

Převzato:
Písek ve sklářství, Petr Exner, Technika, technologie, vydání 13/2002
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=854&cid=6.html>)

Příklady limitních koncentrací barvicích oxidů Fe přípustné v písku pro výrobu určitých druhů skel	% hmotnostních Fe ₂ O ₃
Optické	0,001 - 0,012
Křišťálové	0,008 - 0,015
„bílé“ obalové	0,020 - 0,050

²⁰ Pece jsou vyhřívány většinou generátorovým plynem za použití Siemensova regenerativního systému, v němž se odcházejícími horkými plyny vyhřívají komory vyložené žáruvzdornými cihlami; těmito komorami se pak vedou plyny k spalování, takže vstupují do pece vyhřáté již na vysokou teplotu.

Ploché	0,020 - 0,050
zelené obalové	0,1 - 1,0
Převzato: Písek ve sklářství, Petr Exner, Technika, technologie, vydání 13/2002 (http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=854&cid=6.html)	

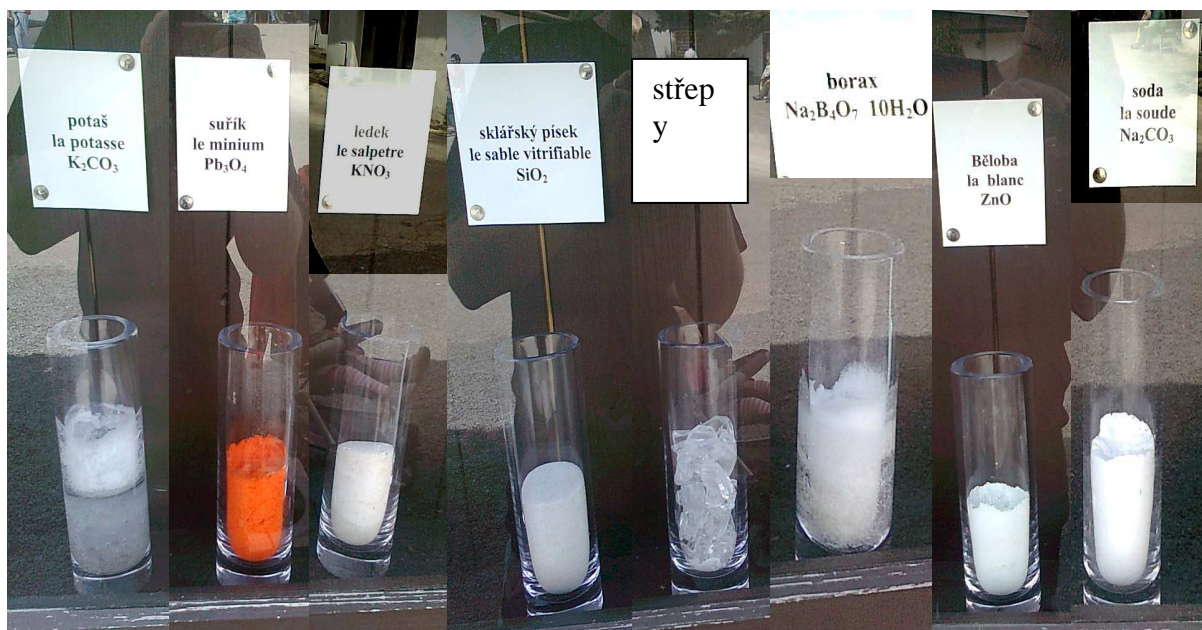
Písek a dolomit se suší. Suroviny na speciální a křišťálová skla se prosévají. Méně často se suroviny drtí a melou. Písek se suší v sušárnách vytápěných plynem nebo párou. V plynových sušárnách plameny šlehají na vrstvu písku nebo plyn hoří pod roštem, nad kterým je vrstva písku. Nevýhodou tohoto způsobu je, že se písek znečišťuje sazemí a má možnost reagovat se spalinami. Sušení párou je výhodnější, protože suroviny zůstávají čisté. V sušárnách na otop párou je rošt z trubek, kterými proudí pára. Mezi trubkami propadá již vysušený písek. Úprava surovin drcením a mletím se provádí v čelistových drtičích nebo kulových mlýnech. Tato úprava se provádí někdy u žnělce nebo sody a potaše. Ztvrdlý ledek se strouhá na strouhacím stroju.

Tabulka přehledu sklářských surovin		
složka skloviny	minerály, sloučeniny	horniny
sklotvorné suroviny		
SiO ₂	křemen, nefelín, dále v omezené míře za určitých podmínek – živce, kaolin, strusky	sklářský (křemenný) písek – tvořící u skel 50-80% hmotnosti vsádky, pegmatit, žnělec, čedič
Al ₂ O ₃	živce, nefelín, kryolit, hydroxid hlinitý	kaolín, fonolit, pegmatity, aplity
B ₂ O ₃	borax, sassolin, kyselina boritá	
P ₂ O ₅	fosfáty - apatit, kostní moučka	
P ₂ O ₅	fosfáty - apatit, kostní moučka	
Stabilizátory		
CaO	kalcit (Ca CO ₃), dolomit, fluorit	vápenec, mramor, travertin, dolomit,
MgO	dolomit (CaMg(CO ₃) ₂), magnezit (MgCO ₃)	dolomit, magnezit
PbO	oxidy Pb ₃ O ₄ nebo PbO, cerusit	
BaO	uhličitán nebo dusičnan baratý	
ZnO	zinková běloba	
Taviva		
Na ₂ O	soda, síran a dusičnan sodný, borax, plagioklasy, nefelín, kryolit	fonolit a další horniny
K ₂ O	potaš, ledek, draselné živce	fonolit a další horniny
Li ₂ O	sloučeniny Li	
B ₂ O ₃	borax, sassolin, kyselina boritá	
NaCl	kuchyňská sůl jako náhrada potaše (od roku 1820 v 19. stol.)	
Na ₂ SO ₄ . 10 H ₂ O	dekahydrát síranu sodného, rovněž jako náhrada potaše (od 17. stol.)	Glauberova sůl, mirabilit
Čeřiva		
SO _x	dihydrát síranu vápenatého (CaSO ₄ . 2 H ₂ O)	přírodní sádrovec, průmyslový sádrovec (energosađrovec)
barvicí substance		
Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Cu, Co, Ni, Cr, Au atd.		
Převzato: Přehled sklářských surovin podle jejich funkcí a chemického složení (Gregerová 1996), Sklo (http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html)		
Doplněno: Scholzův článek o sklářství "v nejnovějších časech" z roku 1820 - II. (http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=3218&cid=6.html)		

V případě požadavku na extrémní čistotu pro náročné aplikace se ve sklářství používá i syntetický chemicky srážený uhlíčan vápenatý.

3.2.3. Zakládání

Vstupní surovinou při zakládání je sklářská vsádka. Je složená z více komponentů : písku, hydrátové potaše, vápenné sody, minia, ledku draselného, kysličníku amonného. Zařízení pro zakládání slouží k pravidelnému přísunu sklářské vsádky v závislosti na odběre skloviny. Sklářská vsádka se dostává ze zásobníku do násypky zakládače, odkud padá přes píst obdélníkového průřezu. Píst se pohybuje pomocí výstředníků a tažných pružin. Zdvih pístu a počet zdvihů pístu je možno plynule regulovat.

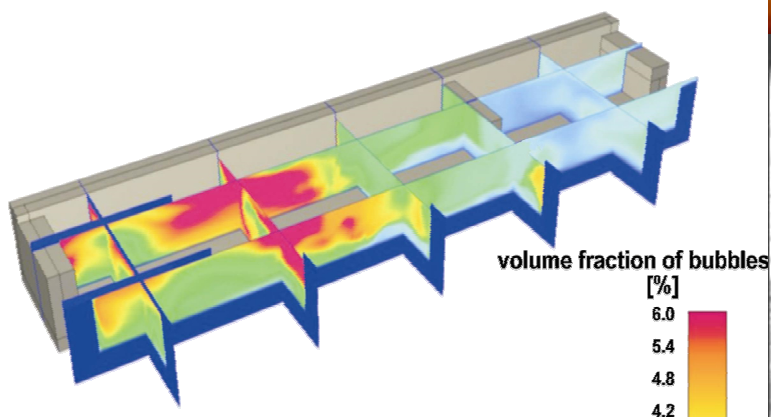
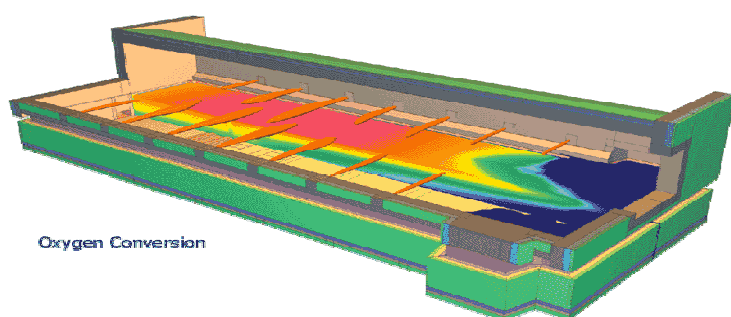
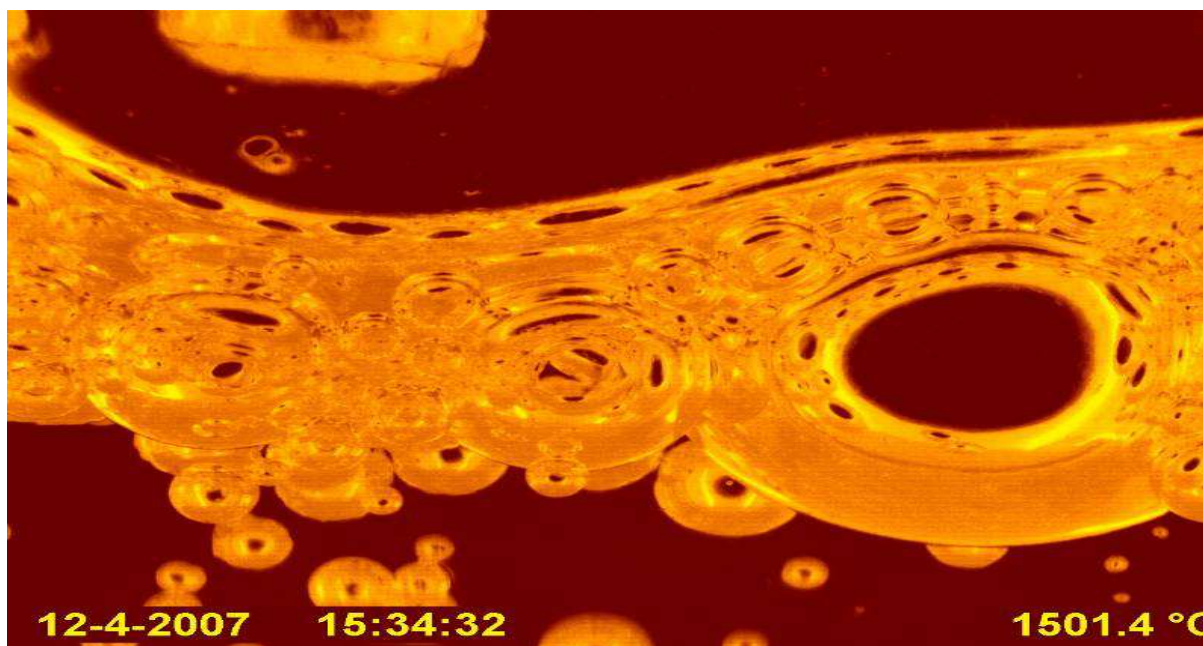


Zdroj: expozice společnosti RÜCKL CRYSTAL a. s., Nížbor

3.2.4. Proces tavení

Při tavení paralelně a nebo následně probíhají tyto děje:

- zahřátí sázky na tavicí teplotu
- reakce mezi jednotlivými složkami:
 $(\text{Na}_2\text{CO}_3 + 4 \text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 + 3 \text{SiO}_2 + \text{CO}_2)$
 $(6\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 + 2\text{CO}_2)$
- čeření k rozpuštění všech složek a k odstranění bublin ve sklovině
- chemická homogenizace taveniny
- ochlazení skloviny na pracovní teplotu



Zdroj: Sklo kolem nás, Prof. Ing. Lubomír Němec, DrSc. a kol., VŠCHT v Praze, 4.12.2007



3.2.5. Vlastní tavení

Je to první etapa pochodu tavení, končíci vymizením posledních zbytků pevných látek. Tuto etapu rozdělujeme ještě na období chemických reakcí a období rozpouštění zbytku pevných látek vytvořených dříve v tavenině.

Některé reakce při tavení skla (teplota v °C):	
(teplota v °C)	Reakce schématicky
500 - 800 °C	$K_2CO_3 + SiO_2 \Rightarrow K_2SiO_3 + CO_2$
500 - 600 °C	$Pb_2O_3 \Rightarrow 3 PbO + 0,5 O_2$
600 - 700 °C	tvorba olovnatých křemičitanů
700 - 900 °C	tavení olovnatých křemičitanů
879 °C	tavení PbO

891 °C

tavení K₂CO₃

3.2.6. Homogenizace

Jde o proces odstranění plynných uzavřenin a vyrovnávání složení taveniny v celé hmotě.

3.2.7. Ochlazení skloviny

Čirá sklovina se nechá zchladnout z 1 400 °C na pracovní teplotu asi 1 200 °C, při které se sklo dá odebírat k tvarování. Ze žhavé viskózní skloviny lze výrobky vyfukovat, odlévat, válcovat, lisovat nebo táhnout v podobě tabulí, trubek a vláken. Po vytvarování se skleněné výrobky udržují zahřáté na teplotě 500 - 600 °C (komorové, tunelové pece). Následuje konečné ochlazení výrobků na teplotu 30 - 50 °C pro odstranění vnitřních pnutí z teplotních změn, teplotních polí a z toho vznikajících napětí, která mohou vést až k poruše celistvosti a pevnosti výrobků.

Chlazení tenkostěnných těles je technologicky jednodušší. Chlazení tlustostěnných výrobků je časově náročnější na udržení požadované teploty v závislosti na čase chladnutí.

Naopak delší chladnutí za vyšších teplot může vést k nežádoucí krystalizaci. Aby nedocházelo například u sodnovápenatokřemičitého skla ke krystalizaci skloviny, musí řízené ochlazování probíhat rychlostí 0,001 - 1 K.min⁻¹.

U speciálních výrobků s nároky na tvarovou přesnost a optické parametry (velké astronomické čočky do teleskopů) probíhá řízené a monitorované chlazení v období řádově několika měsíců.

3.3. ZPŮSOBY VÝROBY

3.3.1. Automatická výroba - obecně

Tímto způsobem se vyrábí hromadně užitkové i obalové sklo. Základem foukaných tvarů je foukací stroj, do kterého se dávkuje sklovina a na jednotlivých stanicích se rozfukuje. Další metodou je lisování skla na lisech. V některých případech (automatická výroba kalíšků) se oba způsoby kombinují (složitě foukací automaty a lisy opatřené kovovými formami).

3.3.2. Tažení

Vznikají slabší okenní tabule. Nepřetržitý pás skloviny vytahují z vany vzhůru dvojice azbestových válečků. Vychladlý pás se řeže na tabule, které se prokládají papírem. Mezi tažená skla patří například skla matová a ledová, zrcadlové sklo, determální skla, bezpečnostní a tvrzená skla.

3.3.3. Lití

Takto se zhotovují silné tabule výkladních skříní. Sklovina vytéká na litinový stůl ohraničený lištami a vyrovná se vyhříváním válcem. Surové vychlazené tabule se musí brousit a leštit.

3.3.4. Flotace - plavení

Jedná se o zvláštní způsob tvarování skla, kdy proud skla vstupuje do komory s roztaveným cínem (tvz. cínová lázeň) z velkokapacitní vanové tavicí pece, na kterém se rovnoměrně roztéká a získává rovnoměrnou tloušťku a hladkou vyleštěnou plochu. Objevitelem této technologie byl sir Alastair Pilkington (1920 - 1995). Tento způsob se u nás používá od roku 1958 na základě licence Pilkington Brothers a nazývá se float (plavené sklo). První linka byla u nás zprovozněna 22.10.1969 ve sklárně v Řetenicích. Dnešní výrobní kapacity mohou pro názornost dosahovat až 900 t za den.

3.3.5. Válcování

Vyrábí zrcadlové sklo. Sklovina vytéká z vanové pece mezi chlazené vodorovné válce, které ji vyrovnávají v desku. Po průchodu chladicí pecí se tabule z obou stran brousí a leští. Při válcování lze do tabulí vtačovat vzor nebo vkládat drátěné pletivo. Převratnou změnu výroby zrcadlového skla přinesla technologie plavení. Vláčný pás skloviny se přivádí v komoře s netečnou dusíkovou atmosférou na hladinu kovové lázně (cínu, hliníku, olova). Na roztaveném kovu získá tabule z obou stran ideálně hladký povrch.

3.3.6. Lisování

Takto se zhotovují některé výrobky, jako jsou skleněné tvarovky, tašky a užitkové sériové předměty. Při lisování se monitoruje výskyt event. technologických vad, jako jsou:

- nedochlazení tvarovaného výlisku
- lepení skloviny
- nedolisování výlisku

- špatná zpracovatelnost skloviny
- nežádoucí ochlazování skla od nerovnoměrně ohřáté formy

K eliminaci těchto vad se od roku 1994 - 1999 v ČR experimentálně používaly tzv. **izotermické formy** nebo razníky. V těchto formách probíhalo lisování skla za teploty blízké transformační teplotě právě lisovaného druhu skla.

Principem fungování izotermické formy je průběžné a nepřetržité vyrovnávání lokálních teplotních rozdílů na lisovací straně formy. V důsledku neustále se opakujícího pravidelného nerovnoměrného kontaktu žhavého skla s lisovací plochou v lisovacím automatu pásové výroby dochází k nerovnoměrnému prohřátí lisovací plochy. Nejvíce se prohřeje ty části plochy lisu, které se jako první dostávají do kontaktu se žhavou dávkou skloviny určené k naformování.

Původní konvenční nerovnoměrně prohřáté formy způsobovaly viditelné tvarové a optické deformace ve vylišovaném výrobku a za vysokých teplot kolem transformační teploty skla způsobovaly lepivost a přilnavost lisované skloviny k lisu. Rozdíly lokálních teplot na formě lisu dosahovaly kolem 100 °C.

Izotermická forma je konstruovaná jako dutina s ocelovou obálkou, která je vyplněná žáruvzdornou porézni hmotou. Porézni hmota v dutině je za provozu lisování napuštěná tekutinou, která se v dutině lokálně vypařuje, cirkuluje a kondenzuje, čímž termodynamickými ději v prostoru přenáší teplo a prouděním vyrovnává lokální teplotní rozdíly z druhé strany ocelové lisovací formy. Rozdíly lokálních teplot na izotermické formě lisu dosahovaly kolem 10 °C. Tekutinou, pracovním médiem pro teploty blízké transformační teplotě lisovaného skla (např. 510 – 540 °C pro sklo Simax) jsou roztavené kapalné slitiny alkalických kovů Na a K.

Mezi další specializované obory lisování patří například **technologie izostatického lisování za tepla** (*HIP - hot isostatic pressing*). Principem této technologie je lisování za vysokých teplot (cca do 2 000 °C), za kterých je lisovaná sklovina tekutá. Proto se vnější lisovací tlak (dle Pascalova zákona) roznáší v tekutině rovnoměrně, tj. při lisování v celém objemu materiálu výlisku je stejný tlak.

Výlisek za těchto podmínek získá hutnou strukturu bez pórů se zvýšenou povrchovou odolností a tvrdostí a s minimem povrchových vad. Touto technologií lze lisovat i výrobky složitých tvarů. Průmyslově se takto vyrábějí speciální skleněné součástky a optické bloky ze skleněných vláken.

3.3.7. Foukání skla

Pomocí sklářských píšťal při ručním zpracování nabere mistr na sklářskou píšťalu (železnou trubku s náustkem) roztavenou sklovinu a mírným vyfouknutím vytvoří základní baničku. Na ni nabírá podle velikosti výrobku další sklovinu. Za stálého otáčení píšťalou vytvoří polotovar, který dostane konečnou podobu vyfouknutím do dřevěné (namočené) formy. Po oddělení od píšťaly postupuje výrobek do chladicí pece, kde několik hodin chladne, aby se ve skle vyrovnalo vnitřní pnutí. Jinak sklo popraská. Ostré okraje se zabrušují.

Strojní foukání do forem může dosahovat výrobních kapacit například až 500 ks lahví za minutu. Formy při tavení elektrickým proudem jsou materiálově sádropískové s kovovou výztuží. S ohledem na vlastnosti formy tavení nesmí překročit teplotu 900 °C.

3.3.8. Rozfoukávání

Takto se zhotovují například některá skleněná vlákna.

3.3.9. Odstředování

Výroba skleněné vlny.

3.3.10. Ruční výroba skla

Skleněné výrobky, figurky atd.

3.3.11. Fúzování skla (Fusing)

Principem tohoto výrobního procesu je vzájemné spékání skleněných zrn, prachu, tyčinek, drti (fritu) a střepů do libovolného tvaru za vysokých teplot (750 - 850 °C). Například dle designérského návrhu lze takto kombinovat skla různých barev. Ke spékání a tedy ke spojování dochází na rozhraní jednotlivých vložených skleněných částí, které lze kombinovat i v několika vrstvách. Vlivem vysokých teplot dochází rovněž k zaoblování ostrých hran střepů. Výsledné těleso lze za tepla

rovněž dále tvarovat ve formách, plasticky dekorovat vtisknutým reliéfem nebo strukturálními otisky. Proces následného ochlazení trvá 10 -12 hodin (²¹).

3.3.12. Mikrovlnné tavení skla

Jde o patentově chráněnou technologii v ČR. V porovnání s tavením odporově elektrickým proudem se jedná o energetický úspornější proces (cca 1/3 konvenční technologie).

Proces tavení se „nastartuje“ soustředěním energie mikrovln do jednoho bodu na pomocné těleso, které způsobí lokální ohřev vedoucí ke vzniku taveniny. Bez pomocného tělesa by se proces tavení nenastartoval, sklo je pro mikrovlnné záření propustné.

Obecně lze uvést, že termochemické procesy a reakce tavení nejsou totožné pro sklářský kmen a střepy v porovnání s běžným způsobem tavení. Mikrovlnné tavení proto i umožňuje dosáhnout jinak obtížně navoditelných barevných variant a lesku konečného výrobku.

Mezi výhody tavení skla mikrovlnným zářením patří:

- dosažení vysokých teplot v poměrně velmi krátkém čase
- lze pracovat s teplotami 1 000 až 1 400 °C v tavicích formách
- lepší chemická čistota probíhající reakce v porovnání s tavením u „otevřeného“ plamene produkujícího spaliny
- vyšší reakční rychlost
- rovnoměrný ohřev v celém objemu taveniny
- forma kelímku taveniny se průchodem mikrovln tolik neohřívá jako u konvenčního způsobu tavení, forma tedy tepelně nedegeneruje a udrží taveninu i o vyšší teplotě. Vyšší teploty ovšem vylučují konvenčním materiálem sádku obsahující formy navíc s kovovou výztuží.

3.4. PŘÍKLADY VÝROBKŮ

Podle tvaru a účelu výrobku se rozlišuje sklo duté (foukané), ploché a speciální (např. figurky tvášené pomocí kahanu, mačkané korále).

3.4.1. Duté sklo, obalové sklo

Výrobky jako láhve, sklenice, nápojové sklo, farmaceutické ampulky a žárovky se tvarují ručním nebo strojním foukáním (užitkové sklo).

3.4.2. Ploché sklo

Vyrábí se strojním tažením, litím, válcováním a plavením. Maximální uváděné výrobní rozměry plochého skla jsou např. 7 500 x 3 210 mm.

3.4.3. Tvarovky

Skleněná tvarovka se vyrábí svařením dvou skleněných výlisků. Základní tloušťka stěny výrobku se uvádí 80 mm (²²). Při výrobě jsou jednotlivé poloviny tvárnice svařovány za horka, proto vzduch obsažený uvnitř tvárnice je po vychladnutí pod nižším tlakem.

Světelná propustnost u čirých tvárnice je při kolmo dopadajícím světle do interiéru uváděna na 77% (ekvivalent běžného dvojskla). U barevných tvárnice se hodnota světelné propustnosti uvádí od 50 do 70%, a to dle barvy a její sytosti. Tvárnice zajišťují rovnoměrné osvětlení interiéru denním světlem. Brání jevu vznikajícího u standardního zasklení, při kterém v interiéru kontrastně působí intenzivní světlo u okna a stín ve vzdálenějších místech. Matová tvárnice úplně znemožňuje průhled i při zachování prostupu světla.

3.4.4. Zrcadlové sklo

Vyrábí se nanesením vrstvy stříbra a mědi, která se opatří ochranným lakem.

²¹ Např.: Wikipedie Fusing - <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fusing>,

Fusing - spékání skla v mikrovlnné troubě - <http://www.brydova.cz/techniky/7-techniky/159-fusing-mikrovlanka>

²² Jsou dostupné i skleněné tvárnice v tloušťce 98 mm. Takto upravená tvárnice má potom nepatrně lepší tepelné izolační schopnosti, hlukově izolační schopnosti.

3.4.5. Bezpečnostní sklo

K zasklívání dopravních prostředků se vyrábí sklo bezpečnostní. Je vrstvené s pláty (Thorax), které zamezují rozpadnutí šavlovitých střepein. Tvrzené bezpečnostní sklo se získá zahříváním zrcadlového skla nad teplotu měknutí a rychlým ochlazením. Vyvolané vnitřní pnutí vytvoří při náraze drobné tupohranné úlomky, které nezpůsobují vážná zranění.

3.4.6. Sklo chemické a laboratorní

Do této skupiny technických skel patří skla ze speciálních sklovin ($\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$) s vyššími obsahy zejména oxidu křemičitého, boritého a dalších. Tato boritokřemičitá (borosilikátová) skla jsou odolná vůči chemikáliím, tepelným nárazům (nízký koeficient tepelné roztažnosti), jsou žáruvzdorná a vykazují některé speciální vlastnosti (krystalická průzračnost, neporéznost a odolnost UV záření). Tato skla se používají na výrobky laboratorní, varné, pro vakuovou elektrotechniku, v domácnostech, pro křbová okna (Pyrex), apod.. Mezi další technické sklo patří laboratorní chemické sklo, teploměry, misky, odměrné nádoby. Jde zejména o potrubí a aparatury pro chemický a potravinářský průmysl (mlékárny, mlýny), kde lze vizuálně zrakem kontrolovat probíhající děje. Neopomenutelnou aplikací borosilikátového skla je výroba vakuových absorpčních trubic pro fototerminické solární panely.

Vyráběné skloviny jsou např.:

- tzv. jenské sklo (75 % SiO_2 a 8 % B_2O_3),
- sklo Simax (SiO_2 - B_2O_3 - Na_2O - Al_2O_3 - K_2O),
- sklo Duran (80 % SiO_2 a 12,8 % B_2O_3),
- sklo Pyrex (dle ISO 3585, v systému SiO_2 - B_2O_3 - Na_2O - Al_2O_3 - MgO - CaO - K_2O).

Chemická skladba skloviny Pyrex	%
SiO_2	79,5 až 80,5
B_2O_3	12,0 až 13,0
Al_2O_3	2,0 až 2,8
Na_2O	4,5 až 5,5
K_2O	0,0 až 1,1

Převzato:
 Tepelně odolná boritokřemičitá skla typu Pyrex,
 Petr Exnar, Technická univerzita Liberec, Technika, technologie, vydání 32/2002
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1479&cid=6.html>

První tepelně odolné (laboratorní) sklo bylo u nás vyrobeno již v roce 1837 v Sázavě. Předchůdce značky Pyrex byl patentově chráněn v USA od roku 1915 (autor: Sullivan a Tailor). Sklovina Pyrexu se taví kvůli převažujícímu podílu SiO_2 za vysokých teplot 1 600 °C v elektrických pecích.

Vysoká teplotní odolnost proti teplotním šokům do 110 - 180 °C (u tvrzeného skla) a do 210 - 320 °C (u tvrzeného tenkostěnného skla) a neporéznost umožňuje snadnou čistitelnost a sterilizaci, což předurčuje rovněž toto sklo pro zdravotně nezávadné aplikace. Jako tepelně odolná skla se označují ta skla, která mají lineární koeficient teplotní roztažnosti menší než $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, tj. kolem $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (tzn. výrobek v délce 1 m se změnou teploty o 100 °C roztáhne nebo zkrátí o 0,33 mm).

U skel systému $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ je popsán negativní jev tzv. *odmísení*, kdy se sklovina oddělí na dvě samostatné fáze sodnoboritanovou a křemičitou. Tento jev, při kterém dojde zároveň i ke snížení chemické odolnosti skla, nastává při nevhodném poměru složek $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ v původní sklovině.

K chemické odolnosti skla je vhodné doplnit, že působením vodných roztoků kyselin se na povrchu skla vyluhuje alkalokřemičitá vrstvička. Sklo lze naleptávat kyselinou fluorovodíkovou, kyselinou trihydrogenfosforečnou a horkými alkalickými hydroxidy. Sklo rozrušuje rovněž střídává expozice kyselinami a zásadami.

3.4.7. Sklo optické

Dělí se na jemné optické (přístrojové) sklo, polooptické (skla do brýlí), protisluneční a ochranná skla a filtry. K jejich výrobě se používá řada speciálních oxidů a výrobních metod. Sklo pro výrobu optických přístrojů (čochky, hranoly, optické filtry) obsahuje kromě olova i baryum, zinek a titan. Podle chemického složení se rozlišuje optické sklo:

- **korunové** bezolovnaté sodnovápenaté nebo draselnovápenaté) v systému $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O -K}_2\text{O -ZnO}$
- **flintové** (sodnoolovnaté nebo draselnoolovnaté) v systému $\text{SiO}_2\text{-PbO -Na}_2\text{O -K}_2\text{O}$
- speciální optická skla fosforečná, lanthanidová v systému $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO -Al}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_2$

3.4.8. Osvětlovací sklo a lustry

Pro jejich výrobu se používají obdobné techniky jako u skla užitkového. Navíc se používá řada různých kovových doplňků, vyráběných zejména pasířským způsobem. Pro výrobu klasických lustrů se tvarují různé skleněné díly jako ramena, lišty, lupeny, háčky, ověsy a podobně.

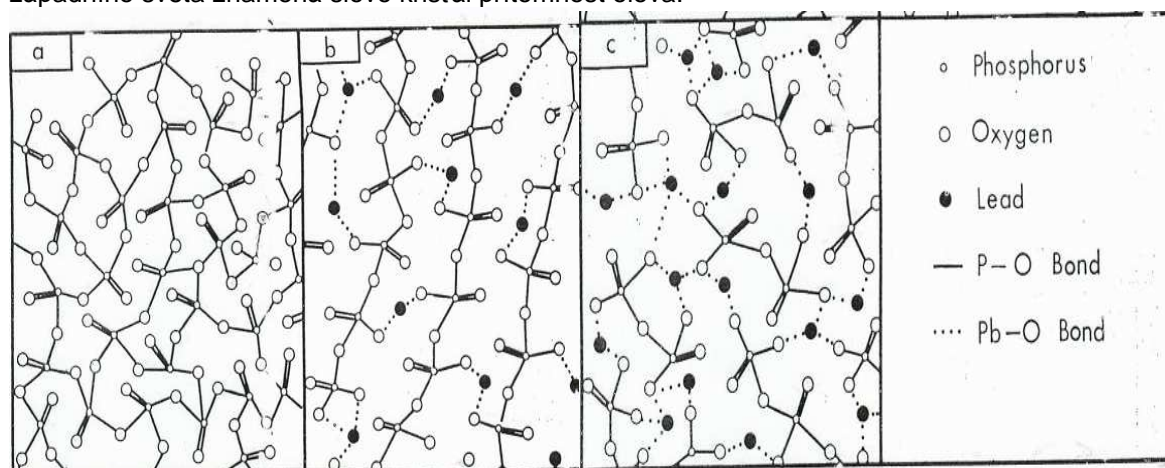
3.4.9. Jablonecká bižuterie

Vznikla původně náhradou polodrahokamů skleněnými kompozicemi. Základem jsou tyče, tyčinky a trubice s přebohatou barevnou škálou, které se různými technikami zpracovávají dále na perly, kameny a korálky. Z nich se zhotovuje ozdobná bižuterie. Do tohoto oboru patří i světoznámé železnobrodské figurky.

3.4.10. Křišťál a sklo s vyšším obsahem olova

Soustava $\text{K}_2\text{O - CaO}$ (resp. BaO) - SiO_2 je tzv. český draselnovápenatý křišťál s přídavkem Na_2O a B_2O_3 .

Soustava $\text{K}_2\text{O - PbO - SiO}_2$ je tzv. anglický draselnoolovnatý křišťál s přídavkem Na_2O a ZnO . Mezi křišťálem a sklem existuje rozdíl, který se však mění podle výkladu každé země. Pro většinu západního světa znamená slovo křišťál přítomnost olova.



Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT v Praze

Podle pravidel Evropského společenství je skleněné zboží, obsahující méně než 4% oxidu olovnatého, definováno jako "sklo", skleněné zboží s obsahem olova větším než 10% je "křišťál" a sklo s obsahem olova větším než 30% je označeno jako "vysoce olovnatý křišťál" ⁽²³⁾. V USA stačí 1% olova a sklo je kvalifikováno jako křišťál.

V ČR lze chápat význam slova a termínu *křišťál* pro označení jakéhokoliv vytříbeného, vysoce kvalitního skla. Olovnatým křišťálem se potom rozumí křišťál mající více než 24% oxidu olovnatého. Vyhláška č. 379/2000 Ministerstva průmyslu a obchodu z 10.10.2000, kterou se stanoví podmínky pro určování jednotlivých druhů křišťálového skla, jejich vlastností a způsoby označování výrobků z křišťálového skla, rozlišuje tyto druhy křišťálového skla:

- a) skupina 1: vysoce olovnaté křišťálové sklo s 30 % PbO ,
- b) skupina 2: olovnaté křišťálové sklo s 24 % PbO ,
- c) skupina 3: křišťálové sklo krystalin
- d) skupina 4: křišťálové sklo.

²³ Jiné prameny uvádějí, že podle současné mezinárodní konvence se pojem křišťálové sklo omezuje pouze na olovnaté sklo s více než 24 % PbO a s indexem lomu vyšším než 1,545 (Hlaváč 1988).

Sklo sodnodraselné se za křišťálové sklo již nepovažuje. Jednotlivé skupiny jsou potom dále vyhláškou definovány pomocí procentuálního zastoupení oxidů kovů, hustotou, indexem lomu, tvrdostí povrchu a symbolem pro označení.

Sklo s vyšším obsahem olova se vyznačuje vysokým indexem lomu, tj. vyšším než $n_d=1,545$. Olovnaté sklo se používá pro výrobu lustrů, bižuterie, ozdobných karaf a sklenic (²⁴). Přítomnost olova změkčuje sklo a tím ho činí přístupnějším pro broušení a rytí. Olovo přidává sklu na hmotnosti a způsobuje, že sklo láme světlo, takže tříští paprsky procházející sklem do duhových barev. Sklo pro výrobu dekoračních figurek má obsah olova až 49%, aby se dosáhlo maximální tvárnosti. Variantou je křišťál obsahující méně než standardních 24% olova, má však větší procento oxidu barnatého, který zajišťuje požadovanou kvalitu lomu světla.

Rozdíl mezi sklem a křišťálem je patrný zrakem, když křišťálový výrobek vrhá po místnosti barevná spektra. Čím vyšší je obsah olova, tím větší je jeho oslnivý třpyt.

V roce 1991 bylo prokázáno, že při dlouhodobém skladování nápojů v olovnatých skleněných obalech dochází k hygienicky nepřijatelnému výluhu PbO ze skloviny do tekutiny.

3.4.11. Křemenné sklo

Chemicky nejjednodušší je křemenné sklo, tavený čistý oxid křemičitý SiO_2 . Propouští ultrafialové záření, má výbornou chemickou tepelnou odolnost a snese prudké ochlazení bez popraskání. Vysoká tavicí teplota kolem $1\ 800\ ^\circ\text{C}$ - $2\ 000\ ^\circ\text{C}$ a s tím spojená cena křemenného skla omezuje jeho praktické využití na výrobu laboratorních potřeb a speciálních žárovek. Křemenné sklo je dražší než obyčejné.

3.4.12. Vodní sklo

Vznikne pokud ke křemennému sklu přidáme alkalické sloučeniny (sody, potaše), které působí jako tavivo. Čímž klesne tavicí teplota SiO_2 , avšak zhorší se vlastnosti. Používalo se nebo se stále používá:

- k impregnaci papírových tkanin, dřeva a textilu,
- ke konzervaci vajec,
- jako plnivo do mýdel a čistících a odmašťovacích prostředků,
- k ochraně a sanaci přírodního kamene a například freskových maleb,
- jako pojivo kyselinovzdorných a žáruvzdorných tmelů a lepidel,
- jako slévárenská surovina pro výrobu forem žáruvzdorných materiálů (např. v kombinaci se šamotovou moučkou slévárenského písku),
- jako složka nástřiků pro protipožární ochranu konstrukcí,
- rovněž jako složka nehořlavých stavebních materiálů nebo geopolymérů, (např. silikátová paropropustná nátěrová hmota na bázi draselného vodního skla s modifikovanou akrylátovou disperzí s pigmentem recyklovaného skla, vhodný prostředek pro opravu a ochranu silikátových povrchů stavebních konstrukcí (²⁵).

Vodní sklo se prodává nejčastěji ve formě vodných roztoků, vzniklých rozpouštěním skloviny vodou nebo vodní párou. Vodní sklo *draselné* je viskózní čirá kapalina, bezbarvá nebo lehce nažloutlá, neomezeně mísitelná s vodou. Vodní sklo *sodné* je čirá nebo slabě zakalená bezbarvá viskózní kapalina alkalické reakce, neomezeně mísitelná s vodou. Vodní sklo sodné obsahuje křemičitan sodný ($\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$). Za působení atmosférického CO_2 a vysycháním se vylučuje gel SiO_2 , který jako složka směsí způsobuje jejich celkové tuhnutí.

3.4.13. Horninové a vulkanické sklo

Tato kategorie je zde uvedena kvůli systematickému přehledu. Skla *horninová* vznikají záměrným průmyslovým tavením krystalických hornin s alkáliemi.

Z čediče a znělce se vyrábějí tmavá skla na pivní láhve. Tavený čedič je surovinou pro výrobu dlaždic s vysokou odolností v oděru a rour odolných vůči kyselinám. Čedičová vlákna a čedičová vata vynikají tepelnou a zvukovou izolací.

Z přírodního perlitu se prudkým ohřevem při 900 - $1300\ ^\circ\text{C}$ a výparem obsažené vody průmyslově vyrábí vylehčený expandovaný perlit s téměř 5-10x násobně navýšeným objemem. Expandovaný

²⁴ Toto brilantní sklo je podle vídeňského klenotníka Strassera nazýváno "štras". Slouží k napodobování drahokamů, avšak pro svou měkkost brzy ztrácí lesk.

²⁵ Silikátový paropropustný nátěr V5R - výsledek RIV/00216305:26110/10:PR24755 výzkumného záměru MSM0021630511 - Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí (2005-2011, MSM), předkladatel - Vysoké učení technické v Brně / Fakulta stavební, dodavatel MSM - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT).

perlit je vhodný ve stavebních aplikacích pro tepelně a zvukově-izolační vlastnosti. Jako sklo je pro chemicky a objemově stálý (v intervalu -200°C až $+900^{\circ}\text{C}$), nehořlavý, netoxický, bez pohlcování vlhkosti s odolností proti mrazu a proti biologické korozi.

Naopak *vulkanické* sklo je přírodní materiál (přírodní forma skla), který vznikl geomorfologickými procesy v zemské kůře nebo na jejím povrchu, a to například:

- při prudkém ochlazení rozstříklé horninové taveniny – lávy z vulkanické činnosti (obsidián),
- při velmi rychlém tuhnutí v okrajových partiích lávových polí a příkrovů (smolek, perlit, pemza),
- při prudkém ochlazení rozstříklé horninové taveniny po dopadu meteoritu (vltavín).

Tedy pro úplnost lze dodat, že *vulkanická* skla jsou vstupní surovinou pro výrobu skla *horninového*. Vulkanická skla jsou i předmětem aplikačního materiálového výzkumu v kompozitních stavebních materiálech⁽²⁶⁾.

3.4.14. Skleněná vlákna

Novodobý materiál používaný zejména jako tepelně izolační skleněná vlna pro rozsah teplot od -20 až do $+300^{\circ}\text{C}$ je rovněž součástí sklolaminátů, skleněných textilií atd. Ve srovnání s masivním sklem mají skleněná vlákna vyšší pevnost v tahu, která překračuje i pevnost tahu oceli. Dalšími výhodami skleněných vláken jsou:

- vysoká hodnota Youngova modulu v tahu
- odolnost vůči vysokým teplotám a nehořlavost
- chemická odolnost
- elektrická nevodivost
- vynikajících tepelná a zvuková izolace

Skleněná vlákna se vyrábějí tavením nad 1000°C , kontinuálním tažením z platinových vaniček a navíjením na cívku nebo odstředivým rozfukováním ze speciálních sklovin. Sklolamináty nebo i jiné kompozity se skleněným vláknem ve funkci tahové výztuže mohou nahradit kovové nosné prvky v různých aplikacích: automobily, lodě, letadla, lokomotivy, vagóny, přístavní mola, pracovní plošiny, potrubí, podzemní nádrže, vrtule větrných elektráren, odlehčené betonové mostní konstrukce. Jiný příklad aplikace skleněných vláken je uveden v samostatné kapitole.

Z roku 1916 pochází první patent na plast s výstužnými skleněnými vlákny. Ve vývoji jsou i konstrukční koncepce se skleněnými staticky zatíženými vlákny ve funkci předpjaté výztuže.

Podrobnější informace o využití vláken ve funkci rozptýlené výztuže do betonu a malt jsou uvedeny v následné samostatné kapitole (viz. kapitola: **Alkalivzdorná skleněná vlákna do betonů a malt**).

V literatuře se rozlišuje několik typů sklovin pro materiál skleněných vláken:

- E sklo - nejrozšířenější vyráběný typ vláknového bezalkalického boritohlinitokremičitého skla pro optické kabely s minimálním obsahem alkalických oxidů (pod 1%) v systému $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-B}_2\text{O}_3$. Zastoupení CaO dosahuje 15 – 20% a MgO do 5%. Vlákna se vyrábí v rozmezí tlouštěk 3,5 - 20 μm . Nároky splňované na chemickou čistotu sklovin vyroběného E skla musí garantovat jeho transparentnost v délce sta kilometrů pro procházející signály v infračerveném spektru.
- S sklo - sklovina v systému $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ s pevností vláken v tahu o 30% vyšší ve srovnání s E sklem. Pevnost vláken v tahu výrazně klesá s teplotami nad 600°C . Sklovina je používána v kompozitech pro leteckou techniku a v rotorech vrtulníků.
- D sklo - vyráběné pro účely elektrotechniky, s nižší pevností ve srovnání s E sklem.
- C sklo - chemicky odolné sklo v systému $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Na}_2\text{O}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, s nižší pevností ve srovnání s E sklem.
- L sklo - sklo s vysokým obsahem PbO , které v kompozitu pro lékařské aplikace ostiňuje rentgenové záření.

²⁶ Kompozitní plast s kyselým vulkanickým sklem a expandovaným slinutým jílem pro eliminaci tepelných mostů (2008) – výsledek RIV/00216305:26110/08:PR23312 výzkumného záměru MSM0021630511 - Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí (2005-2011, MSM), předkladatel - Vysoké učení technické v Brně / Fakulta stavební, dodavatel MSM - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT).

Z optického hlediska se světlovodná vlákna vyrábějí jako dvouvrstvé válce ze sklovin s odlišným indexem lomu, čímž dochází uvnitř ve vlákně v ideálním případě k opakovanému odrazu procházejícího signálu. Tento princip byl teoreticky popsán již v roce 1870, kdy anglický fyzik John Tyndall (1820-1893) demonstroval vedení světla v zakřiveném tryskajícím proudu vody, ale k současné podobě optického kabelu se dopracoval až v roce 1950.

Pro vysoké nároky na extrémní čistotu skloviny pro výrobu optických komunikačních vláken prochází plynný SiCl_4 chlorid křemičitý několikanásobnou destilací a filtrací, následně tento plyn reaguje s plynným O_2 za vysrážení vysoce čistých (jiným materiálem nekontaminovaných) vloček SiO_2 oxidu křemičitého. K této reakci dochází ve skleněné trubici s rozdílným indexem lomu světla. Trubice, s obsaženými vločkami uvnitř, se za teplot 2 100 °C podélným protahováním příčně stáhne v tyč a následně odvíjí v dvouvrstvé optické vlákno.

V 50. letech 20. století se prováděly rovněž pokusy s dálkovým přenosem obrazu přímo optickými vlákny, tj. bez digitalizace obrazu. Obraz se přenášel svazky paralelně uspořádaných vláken (tzv. obrazovody), kde jedno vlákno představovalo jeden přenášený obrazový (mozaikový) bod. Vlákna se v průřezu svazku uspořádaly pravouhle do čtvercové sítě nebo do buněk ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku (resp. šestihranu).

Podrobnější informace o systémech osvětlovacích optických vláken jsou uvedeny v následné samostatné kapitole (viz. kapitola: **Osvětlovací optická vlákna**).

3.4.15. Speciální skla pro elektroniku

Pro toto sofistikované odvětví průmyslu se používá široká škála speciálních skel a sklokystalických hmot, jako např.:

- nízkotavné pájky systému $\text{PbO-ZnO-B}_2\text{O}_3$ a $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (s 50 – 90% podílem PbO) pro pájení a spojování kovových, keramických a skleněných prvků. Skelné pájky se taví při teplotě kolem 500 °C a opakovaným zahřáním je jejich spoj rozebíratelný. Sklokystalické pájky při opakovaném nebo dlouhodobém zahřátí krystalizují a ve spoji se teplem tedy nerozpojují. Kompozitní pájky jsou aplikovány s plnivý zrn SiO_2 pro zajištění spojů s nízkou teplotní roztažností.
- vysokoteplotní pájky systému $\text{BaO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ pro sodíkové lampy,
- tzv. substráty pro elektronické displeje, což jsou speciální sodnovápenatá a borosilikátová skla, řezaná laserovým nožem na tenké ploché vrstvy o tloušťce do pod 0,9 mm.

Z důvodu vysokých nároků na chemickou čistotu jsou speciální skloviny taveny v platinových kelímcích elektrickým proudem (indukčním nebo odporovým).

3.5. TECHNIKY NÁSLEDNÝCH ÚPRAV VČ. ZDOBENÍ A DEKORACE

Velmi příznivou vlastností skla je, že zahříváním na teplotu tání pozvolna měkne. Měknutí probíhá daleko dříve než by došlo ke zkapalnění skla. To umožňuje formovat sklo při vystavení a zpracování za žáru.



Zdroj: technologický postup broušení a leštění olovnatého křišťálu, expozice společnosti RÜCKL CRYSTAL a. s., Nižbor

3.5.1. Broušení

Používá se v mnoha odvětvích sklářského průmyslu. V užitkovém skle kromě obrušování výrobků i k výbrusu řezů, hran a ploch. Jako brusný materiál slouží buď **volná zrna** karbidu křemíku, karbidu bóru, elektrokorundu, diamantu a oxidu zirkoničitého nebo **brusiva vázaná** ve formě brusných kotoučů. Nejvýkonnější jsou kotouče diamantové. Rychlost pohybu brusiva na brusném kotouči po povrchu opracovávaného tělesa se pohybuje v rozmezí $1 - 30 \text{ m.s}^{-1}$ (tj. $3,6 - 108 \text{ km.h}^{-1}$). Velikost průměru brusného zrna se pohybuje v rozmezí $1 - 300 \mu\text{m}$.

Broušené vzory vznikají řezem do povrchu skla pomocí profilovaného brusného kotouče. Při vlastním broušení je opracovávané těleso narušováno pohybem brusného zrna po jeho povrchu. Opakovaným a neustálým pohybem brusiva jsou vytrženy nově vzniklé částičky odstraňovány z povrchu opracovávaného tělesa.

Řezy se leští směsí kyseliny fluorovodíkové a sírové. Kaménkový reliéf vybroušený až po leštění zůstává matný.

3.5.2. Rytí skla

Je pokládáno za nejušlechtlejší způsob zdobení skla. Rytina *reliéfní* nebo *do hloubky* se provádí menšími kotouči, aby vyniklo jemné a přesné zpracování detailů. Vyřtělé detaily se vyhlazují a leští kotoučky ze dřeva, kůže nebo olova. Rytí (*gravírování*) patří spolu s jednoduchým matným brusem k nejjemnějším technikám zdůrazňujícím křehkost tenkostěnných nápojových souprav například z tvrdého českého křišťálu.

Mezi nejstarší techniky rytí skla až ze 4.stol. patří technika *diatret/diatreta* (z řeck. *diatreton* – prolomení, provrtání). Při této technice dochází v původním objemu skla, tzv. *zadním broušením*, k jeho vyřtění v hloubce skloviny i za ponechanou hmotou z původního povrchu polotovaru. Tím se ze skla modeluje subtilní vystouplá prostorová ornamentální síť, která nabývá na působivosti například při zpracování vícebarevného vrstveného skla.

3.5.3. Glazury (polevy)

Jsou to tenké skleněné povlaky provedené na předmětech z jiných látek (porcelán, kovy).

3.5.4. Emaily (smalty)

Zde jsou to neprůhledné glazury s přídavkem oxidu cíničitého (SnO_2) nebo oxidu titaničitého (TiO_2). Z historie jsou doložitelné smalty na oknech ze 13.stol. za použití směsi $\text{Cu} + \text{CuO} + \text{CoO}$.

3.5.5. Malba skla

Provádí se speciálními sklářskými barvami, což jsou buď smalty (nízkotavitelná boritoolovnatokřemičitá skla) nebo preparáty drahých kovů (zlato, platina, stříbro). V historii se používaly i organické sloučeniny kovů (železo, kobalt, uran, mangan, cín) smíchané s organickou sloučeninou olova ve funkci pojiva k podkladu skla. Nejběžnějším dekorem jsou květinové motivy kombinované se zlatem.

K vytvoření barevných vzorů se využívá malování prášků z lehce tavitelných skel s terpentýnovou silicí. Malířské barvy se nanášejí ručně, stříkáním nebo sítotiskem. Vypálením se prášek slině na průhledný plastický vzor nebo neprůhledný smalt, proto se barvy rozlišují jako *transparentní*, *krycí* a nebo *reliéfní*. Barva při technologickém procesu vypalování může k podkladu *slinout*, *roztéct* se v souvislou vrstvu nebo *zatavit* do podkladu.

Slinuté barvy jsou bez lesku se sametovým matným povrchem. Při výpalu nanesené vrstvy slinuté barvy se roztaví tavivo přítomné v barvivo, které stmelí mezery práškové barvy nově vzniklou sklovinou. Při výpalu slinuté barvy nedochází k úplnému roztavení nanesené barvicí vrstvy.

Při aplikaci roztékaných barev během výpalu je důležité, aby povrch původního skla byl smáčivý vůči tavenině nanesené barvy. Výpal takových barev probíhá za teploty o $30 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší, než je tzv. „transformační teplota skla“.

Při aplikaci zatavených barev dochází k propojení skloviny povrchu barveného skla se sklovinou z taveniny nanesené vrstvy barviva. Chemicky tak dojde na povrchu upravovaného skla ke vzniku tenké vrstvy skloviny s odlišným chemickým složením, než je původní sklo.

Pro všechny způsoby výpalu platí, že lesk, sytost a odstín výsledné barvy a rozmezí teplot, za kterých dochází k zatavení nanesené barvy, je závislý na mnoha parametrech technologického procesu výpalu (např.: tl. barvy, chemické složení barvy a podkladu, teplota a čas výpalu, způsob zahřátí a chladnutí, atmosféra ve vypalovací peci, atd.). Nejcitlivější na úzké rozmezí možných teplot výpalu jsou červená barviva. V praxi se rozmezí teplot pro výpal slinutých, roztékaných a zatavených barev stanovuje experimentálně:

Rozmezí teplot pro výpal barev	• °C
Slinutých	390 - 430
roztékaných	410 - 450
Zatavených	530 - 540

Převzato:
 Děje probíhající při vypalování sklářských barev
 Ing. Ivana Hladká, Sahm, s.r.o. Praha, Technika, technologie, vydání 14/2002
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=889&cid=6.html>

Vliv teplot na barevné podání	• °C
změna barevného odstínu barvy	530 - 540
stabilní barevné podání (po zkuš.dobu až 130 min.)	540 - 560
ztráta lesku a barevnosti	580 - 600

Převzato:
 Děje probíhající při vypalování sklářských barev
 Ing. Ivana Hladká, Sahm, s.r.o. Praha, Technika, technologie, vydání 14/2002
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=889&cid=6.html>

3.5.6. Lazurování

Jedná se o jednu z nejstarších malířských technik dekorování skla. Například stříbrná lazura, neboli stříbrná žluť, je doložitelná z chrámových oken vyhotovených v raném středověku kolem 11. století. Až v 19. stol. v Novém Boru významný sklářský technolog Bedřich Egermann (1777 – 1864) zavedl do průmyslové výroby dekorovaného skla aplikaci stříbrné lazury žluté a rovněž aplikaci technologicky náročnější měděné lazury červené, ke které je přímo autorem vynálezu z roku 1832 (viz. předchozí kapitola: **Sklářské hutě**). Stříbrným lazurováním se vyráběly kromě dekorovaného skla i žluté optické filtry pro potlačení světla oblohy při fotografování krajiny.

Lazura způsobuje zbarvení skla pronikáním kovových kationtů (tj. Ag^+ , Cu^+) do povrchu skloviny, čímž ji do určité hloubky v řádech desítek mikrometrů (u Cu^+) až sta mikrometrů (u Ag^+) od povrchu probarví. Lazura netvoří na rozdíl od povrchově nanášených transparentních barev ostré rozhraní s hlouběji neprobarveným sklem, přechod probarvení do původní skloviny je plynulý.

Lazurovací směsi se na povrch barveného skla nanášejí ručně štětcem nebo strojovým nástřikem a nátiskem. Lazurovací směsi obsahují kationty stříbra (Ag^+ např. v $AgCl$) nebo mědi (Cu^{2+} např. v $CuSO_4$), které následně difundují do povrchu probarveného skla, kde ve sklovině nahrazují kationty alkalických kovů (např. Na^+). K náhradě dochází u kationtů přibližně obdobné velikosti a stejného elektrického náboje (viz. Na^+), proto se měďnatý kationt (Cu^{2+}) redukuje na kationt měďný (Cu^+), který již do skla difunduje. Pro lazurování (Ag^+) jsou vhodná sodnovápenatokřemičitá skla, sodnodraselná skla s obsahem čeřiva oxidu antimonitého (Sb_2O_3) nebo olovnatý křišťál. Pro lazurování (Cu^+) jsou vhodná skla sodnovápenatokřemičitá a draselnovápenatokřemičitá. Konkrétní chemické složení skla má vliv na průběh reakcí mezi lazurovací směsí a sklem, tj. má vliv na výsledné zbarvení lazury. Proto se lazurování provádí na chemicky homogenní sklo, kde nevzniknou nežádoucí změny v zbarvení vlivem rozdílného chemického složení povrchu skla.

Ke skutečné fyzikálně-chemické difúzi a k náhradě kationtů dochází již za teplot od 200 °C, technologický průmyslový proces výpalu lazurovací směsi probíhá za teplot 400 - 500 °C (u Ag^+) a 550 - 600 °C (u prvního výpalu Cu^+), tj. nad tzv. „transformační teplotou skla“. K jednorázovému výpalu lazur (Ag^+) dochází po dobu několika desítek minut. K výpalu lazur (Cu^+) dochází v několika (až třech) odlišných technologických krocích, jelikož ve srovnání se stříbrem pronikání iontů mědi do povrchu skla je pomalejší, účinnější do menší hloubky a chemicky náročnější. Ke vzniku vlastního zbarvení povrchu skloviny dochází až po redukcí difundovaných kationtů (Ag^+ , resp. Cu^+) na kovové shluky částic stříbra, resp. mědi.

Kationt Ag^+ je redukován ve sklovině přítomnými ionty arsenu, antimonu, železa a síry. Kovové částice stříbra dle chemického složení a tepelného zpracování skla způsobují zbarvení ve škále žluté, žlutohnědé, hnědé, červenohnědé, červené, fialové a modré.

Kationt mědi způsobuje po prvním výpalu za přístupu vzduchu žlutozelenou barvu skla, která vznikla opětovnou oxidací kationtů Cu^+ na Cu^{2+} . Kationt Cu^+ je opět redukován při druhém výpalu za teploty 400 °C prostřednictvím uhlí, zemního plynu a nebo plynného vodíku. Při následném třetím výpalu za přístupu vzduchu a teploty 500 – 550 °C se vylučují v povrchu skla shluky částic mědi, které způsobují konečné červené zabarvení. Pokud je výpal proveden za vyšších teplot a po delší dobu, vznikne ve sklovině černé zabarvení, tj. černá lazura (nebo tzv. „ušlechtilá malířská černá“), která je černá pro odražené světlo a temně zelená pro procházející světlo v tenké vrstvě skla.

Lazurovaný povrch skla lze dále dekorovat rytinou nebo jeho probušováním. Zároveň naopak lze lazurování aplikovat na předem upravované a dekorované povrchy čirého nebo barevného skla. Lazura v povrchu upraveného skla nemění jeho původní lesk. Lazura způsobuje zvýšenou chemickou odolnost povrchu skla ve srovnání s chemickou odolností původního povrchu, čehož je využíváno při výrobě chemického a laboratorního skla. Obecně je nutné lazurovaný povrch pro tloušťku pozměněného skla ochránit před mechanickým poškozením (např. poškrábáním).

3.5.7. Leptání a matování

Kyselina fluorovodíková a její soli mají schopnost leptat sklo. Toho se využívá k jemnému matování, liniovému leptu nebo dekorativnímu odleptávání skla. Matovat dále lze pomocí pískování. Vzor vyrytý na plochách pokrytých kyselinovzdorným voskem se zahloubí ponořením do lázně. Ručně s čárovými motivy přenáší vzor do vosku pantograf nebo gilošovací stroj. Leptáním ploch se sklo též matuje.

3.5.8. Opracování a dekorace laserem

Tato velice moderní technologie umožňuje pomocí jednotlivých bodů vyrýt - vygravírovat libovolné motivy do průhledných materiálů, jako je sklo nebo umělá hmota. Při tomto procesu nedochází k porušení povrchu gravírovaného materiálu. Vygravírovaný motiv se nachází uvnitř hmoty a to tak, že neexistuje žádný otevřený styk mezi motivem a okolním prostředím. Z tohoto důvodu nemůže dojít ke znečištění vygravírovaného motivu kontaminací s vnějším prostředím. Pomocí této metody lze uvnitř skla či umělé hmoty realizovat jak dvojrozměrné, tak i třírozměrné motivy.

Laserové technologie je rovněž používáno pro řezání trubicového skla a pro uzavírání a zatavování skleněných ampulí. Laserové řezací/dělicí stroje jsou nasazovány i u výroby plochého skla, kde nahrazují kovové, keramické nebo diamantové řezací mechanické stroje. Samotné řezání laserem je pomalejší než řezání mechanické. Ale kvalita hrany řezané a zatavené laserem uspoří čas, úsilí a materiály na opracování jinak ostré hrany s mikro-vrpy po mechanickém řezání, tzn. následné broušení, leštění a mytí mechanicky opracované hrany.

3.5.9. Opracování vodním paprskem

Technologie řezání materiálů s využitím kinetické energie vodního paprsku event. vodního paprsku obohaceného o abrazivo se rozvíjela ve 30. - 60. letech 20. stol..

Vodní paprsek dopadá na řezaný materiál rychlostí 600 – 900 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (tj. 2 160 – 3 240 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) pod tlakem 380 - 690 MPa. Materiál se v řezu dopadem vodního paprsku drolí / odštěpuje a nastává tzv. *microchipping*. Tento způsob hydrodynamického řezání se označuje zkratkou WJM (*Water Jet Machining*) a je vhodný spíše pro tenkostěnné a měkké materiály (plasty, dřevo, papír, atd.). Průměr řezného paprsku je 0,2 mm dle opotřebenosti výstupní trysky.

Přidáním abraziva se řezný efekt zesiluje a v místě řezu dochází i k odštěpování třísek. Jako abrazivo se užívá levnějšího křemičitého písku nebo dražších zrn syntetických granátů nebo zirkonů. S jemnějším abrazivem je kvalita řezu hladší, ale spotřeba abraziva je vyšší. Tento způsob hydroabrazivního řezání se označuje zkratkou AWJ (*Abrasive Water Jet Machining*) a je vhodný pro tlustostěnné, tvrdé, houževnaté materiály (sklo, kov, kámen). Průměr řezného paprsku je dán výstupní tryskou s průměrem 0,75 – 2,50 mm dle zrnitosti abraziva.

Touto technologií nedochází k nežádoucímu vývinu tepla a k lokálnímu zvýšení teploty v řezaném materiálu, nárůst teploty je do 30 °C. Řezaný materiál není tedy teplotně namáhán a modifikován v místě řezu. Jelikož nedochází k produkci odpadního tepla, jedná se o technologii s vysokou energetickou účinností (cca 70%).

Přesnost řezání se pohybuje v rozmezí $\pm 0,1 - 0,2$ mm na plochu 1 m^2 . Doporučené tloušťky řezaného materiálu jsou v rozmezí 0,1 – 110 mm, u skla lze řezat až do tloušťky 200 mm. S narůstající tloušťkou řezu klesá přesnost a kvalita obráběné hrany, tento jev je výraznější u tvrdých a houževnatých materiálů. Změnou parametrů řezací hlavy, regulací tlaku a výstupní rychlosti lze mimo řezání provádět i následující operace:

- oplachování řezu,

- otryskání povrchu,
- tlakové čištění,
- vyřezávání do určité hloubky,
- srážení hran,
- vrtání,
- frézování,
- gravitování.



Lze řezat povlakované, pokovené nebo jinak povrchově upravené skleněné materiály. Neřezané plochy se zakrytím ochrání a probíhající řezný paprsek nepoškodí na vzniklých hranách povrchové úpravy (např. u zrcadel a lepených skel).

3.5.10. Optický dekor

Vzniká fouknutím baňky do žebrované nebo jinak reliéfně zdobené formy, reliéf však dalším rozfouknutím ztrácí svou plastičnost a místy je patrný jen opticky. U pece se sklo také zdobí natavováním tažených vláken, štípaných lístků, křídélek, hřebínků atd.

3.5.11. Spékání a ohýbání, zapalování skla

Proces probíhá zatahováním kousků skla a ohýbáním za tepla. Speciálně u výroby skleněných ampulí z trubcového dutého skla se dno ampulí nebo zkumavek zhotovuje zapalováním skla, což obnáší následující operace:

- zahřátí výrobku v zapalovaném místě a v jeho okolí na transformační teplotu,
- zapálení (otavení) okraje výrobku při teplotě nad transformační teplotou (kolem 1 000 °C),
- řízené ochlazení výrobku.

3.5.12. Pískování

Je poměrně stará metoda dekorování, zejména skla a to ať již plochého či užitkového. Tato metoda byla hojně rozšířena a používána v období secese. V současné době si tato technologie nalézá cestu zpět na výsluní, například v bytové architektuře (výplně do dveří či oken), ale i v reklamě. Pískování je vlastně proces, při kterém dochází k povrchovému narušení pískovaného předmětu (omatování), ať už je to sklo nebo keramika či jiný materiál. Na pískovaný předmět se aplikuje vykrývací šablona, ve které je vyřezán dekor nebo logo, které se má pískovat. Přes tuto šablonu se pod tlakem tryská abrazivo (písek), které zamatuje místa a plochy, která nejsou kryta šablonou.

3.5.13. Tiffany

Technika neboli způsob spojování jednotlivých dílů z barevného skla pomocí na hranách nalepených měděných folií se v poslední době velice rozšiřuje na českém a slovenském trhu. V současnosti se jí věnuje poměrně široká řada zájemců o zpracování barevného skla. Tiffany technika nemá za úkol nahradit nebo vytlačit klasickou vitráž do olova. Ale možností detailu, jednoduchostí výroby a především možností vytvářet různé prostorové objekty včetně tolik populárních lamp "starého Tiffanyho" si nachází stále větší uplatnění v interiéru, ale i malých realizacích jako je šperk, malá závěsná vitrážka atd.

3.5.14. Vitráž

Klasická vitráž probíhá do olova nebo za použití měděných pásek.

3.5.15. Galvanické zušlechťení

Galvanické zušlechťení probíhá pomocí kovových prvků (moření, lakování, platina, nikl, zlato, staromosaz, staroměď....apod.). Například zlacení, stříbření nebo chromování je založeno na spojení jemně rozptýlených částic drahého kovu v organickém pojivu, které se po nanesení (štětcem nebo razítkem) v peci spálí. Zrcadla a vakuový prostor termosky se pokovují redukcí stříbra z dusičnanu stříbrného.

Antireflexní povrch slunečních brýlí způsobuje vrstva MgF_2 .

Fotochromická resp.heliocentrická skla jsou opatřena vrstvou Ag a Ce, kde sluneční záření způsobí redukci stříbrných kationů na elementární stříbro a oxidaci cerité soli (senzibilizátoru) na sůl ceričitou. Tato reakce je vratná, tj. reversibilní, Elementární stříbro způsobí barevné zatemnění skla.

3.5.16. Lepení

Tato kapitola je zde pro svou rozsáhlost a komplexnost uvedena pouze okrajově. Technologie lepení je obecně samostatnou a obsáhlou problematikou. Proto je zde uvedeno pouze několik ilustrativních bodů k tématu „skla“:

Pro přímé pevné zasklívání se v automobilovém průmyslu užívá lepení polyuretany. V nábytkářské výrobě se používají akrylátová lepidla.

Vodní sklo se technicky řadí dle chemického složení mezi přírodní anorganická lepidla.

Ve strojním lepení se používá vytvoření tzv.mikrodesénu pro zvýšení lepivosti na povrchu skla.

V aplikaci lepení sklo zaujímá rovněž funkci plniva lepidel ve formě skleněných vláken. Tato vlákna ve formě textilie jsou například součástí kompozitní fólie, která se pomocí epoxidové pryskyřice lepí pro svou výztužnou funkci na namáhaná místa kovových karosérií.

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

4. DEFINICE PROBLEMATIKY - MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA SKLA

4.1. FYZIKÁLNĚ CHEMICKÉ VLASTNOSTI

4.1.1. Základní vlastnosti

vlastnost	jednotka	rozpětí hodnot dle druhu skla
hustota	kg·m ⁻³	2 200 – 6 000
pevnost v tlaku	MPa	700 – 1 200
pevnost v tahu ⁽²⁷⁾	MPa	30 - 100
pevnost v ohybu	MPa [N·mm ⁻²]	40 – 190 (vyšší hodnoty např. pro kalená skla) 45 MPa - plavené vrstvené bezp. sklo, 70 MPa – tepelně zpevněné vrstvené bezp. sklo, 120 MPa – kalené/tvrzené vrstvené bezp. sklo
doporučené hodnoty pro namáhání v tlaku	MPa	100
doporučené hodnoty pro namáhání v tahu	MPa	3,5
doporučené hodnoty pro namáhání v ohybu	MPa	7
modul pružnosti v tahu E u křemičitých skel	GPa	50 - 90
modul pružnosti v tahu E u křemenného skla	GPa	74
modul pružnosti ve smyku G	GPa	26,5
součinitel délkové teplotní roztažnosti (Coefficient of Thermal Expansion)		(v rozmezí teplot 20 – 300 °C)
- pro skla tvrdá titaničito-křemičitá, křemenná	K ⁻¹	0 - 0,6 · 10 ⁻⁶
- pro skla tvrdá boritokřemičitá	K ⁻¹	3 – 6 · 10 ⁻⁶
- pro skla měkká s vyšším obsahem alkálií a olovnatá skla	K ⁻¹	8 – 10 · 10 ⁻⁶
- pro speciální skloviny	K ⁻¹	20 · 10 ⁻⁶
součinitel tepelné vodivosti (za normální teploty)	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0,6 – 1,38
měrná tepelná kapacita	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	850 – 1 000
Poissonův součinitel	-	0,14 - 0,32
tvrdost podle Mohse - 6. stupeň tvrdosti (živec) ⁽²⁸⁾	-	6 - 7
index lomu, resp. ABSOLUTNÍ INDEX LOMU	-	1,5 - 2,25
elektrický nevodivé - - s výjimkou případů, kdy se na povrchu skla vlivem vzdušné vlhkosti vytvoří adsorbovaná vrstvička vody s měřitelnou povrchovou vodivostí		
Pozn.: pevnost skel obecně vzrůstá s rostoucím obsahem SiO ₂ a klesajícím Na ₂ O, výrazně závisí také na vlastnostech povrchu, rozměrech vzorku a vnitřních defektech.		
Převzato: Fyzikální a mechanické vlastnosti skla (podle Hlaváče 1988 a Svobody et al. 2004). (http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html)		
Převzato a upraveno: Sklo, http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html Vlastnosti SIMAXU, Bohuslav Vtípil, Technika, technologie, vydání 9/2004 (http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=2731&cid=6.html)		

Křehkost skla je důsledkem nepříznivé kombinace vysoké hodnoty modulu pružnosti a malé pevnosti v tahu. Sklo se rozbíjí se na ostré střepey. Tyto vlastnosti mohou být modifikovány nebo úplně změněny přidáním jiných sloučenin nebo tepelným zpracováním.

S tím souvisí i **odolnost proti teplotnímu rázu** (také: tepelná odolnost, citlivost skla proti náhlé změně teploty), která klesá s rostoucí teplotní roztažností a tloušťkou skla. Náhlá změna teploty

²⁷ Pro srovnání: skleněné vlákno o průměru 12-20 μm a o délce 6-24 mm má pevnost v tahu tohoto skleněného vlákna o velikosti 400-2.000 MPa.

²⁸ Nejmenší tvrdost je u skel olovnatých, naopak nejtvrďší skla jsou borito-křemičitá a křemičitá.

vede nezdědk k prasknutí skleněných předmětů. Sklo zahřáté na vysokou teplotu se musí velmi pozvolna chladit. V opačném případě jinak dochází k vnitřnímu pnutí.

4.1.2. Optické vlastnosti

Mezi optické vlastnosti skla patří:

- **index lomu** nebo-li také **refrakční index**, který popisuje **lom** světla při jeho šíření na rozhraní opticky rozdílných prostředí.
- **Difrakce** popisuje naopak **ohyb** světla při jeho šíření ve stejném optickém prostředí ale po střetu s překážkou, která má rozměry blízké vlnové délce procházejícího světla.
- **disperze** nebo-li barevný **rozklad** bílého světla na monochromatické složky, který souvisí s fyzikálním jevem, při kterém se vzrůstající vlnovou délkou procházejícího světla se zmenšuje index lomu. Tedy index lomu pro modré světlo je vyšší než index lomu pro světlo červené.
- reflexe, odraz světla
- **absorpce, pohlcení** světla tím, že dojde k útlumu šíření světla (tj. viditelného spektra elektromagnetického záření).

Běžné průhledné (**transparentní**) sklo vytváří **opticky průhledné** prostředí, tzn. umožňuje šíření světla ve svém objemu. Zakalené (**translucentní**, též **opakní**) sklo vytváří už jenom **opticky průsvitné** prostředí, tzn. umožňuje pouze částečné šíření světla ve svém objemu.

Povrch skla částečně odráží, pohlcuje a propouští dopadající světlo. Sklo odráží přibližně 8% z kolmo na něj dopadajících paprsků a odrazivost se zvyšuje s rostoucím úhlem dopadu. Pohltivost a propustnost závisí na vlnové délce světla a tloušťce skla. Běžná skla pohlcují UV záření (ultrafialové světlo, UltraViolet) dle obsahu oxidu železitého a nebo uhličitanu sodného. Tedy nepropouští světlo o vlnové délce nižší (kratší) než 380 nm. Čisté SiO₂ křemenné sklo neabsorbuje UV světlo a je užíváno na aplikace požadující transparentci v této oblasti spektra záření. Běžná skla propouštějí infračervené záření, tj. záření s vlnovou délkou nad 780 nm.

Index lomu skla lze popsat **absolutně (n)** a **relativně (N)**. Absolutní index lomu skla se popisuje poměrem rychlosti světla ve vakuu k rychlosti světla v uvažovaném skle. Je-li **n** určitého skla rovno 1,5, znamená to, že v tomto skle se světlo šíří 1,5-x pomaleji než ve vakuu. Index lomu skla je proměnlivou veličinou se závislosti na:

- aktuální teplotě skla
- mechanickém namáhání a materiálové napjatosti skla
- způsobu, rychlosti a průběhu ochlazování skloviny
- vlnové délce procházejícího světla
- chemickém složení skloviny

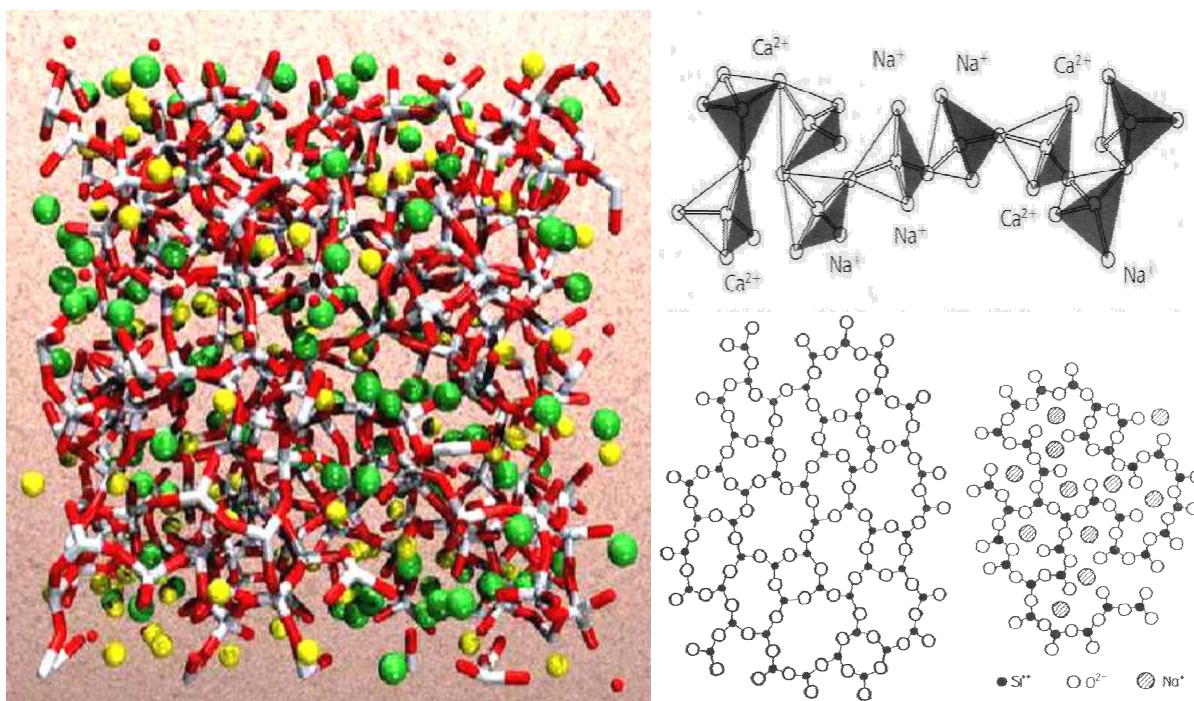
příklady transparentních materiálů	nd
fluoridové optické sklo	1,33
fluorid vápenatý	1,43
křemenné sklo	1,46
sklo simax	1,47
běžné obalové sklo	1,51-1,52
sodnodraselný křišťál	1,52
olovnatý křišťál (24 %)	1,545
olovnatý křišťál (30 %)	1,56
vysoce olovnaté sklo (79 %)	1,72
akrylát	1,49
plast CR 39	1,50
polykarbonát	1,57
polystyren	1,59
chalkogenidové sklo (GeAsTe)	3,55
diamant	2,42

nd = značí index lomu pro procházející světlo ze pro sodíkové lampy

4.1.3. Základní popis

Čisté sklo je tuhý, transparentní (průhledný), relativně pevný materiál, odolný proti opotřebení, v podstatě inertní (s výjimkou chemické koroze) a biologicky neaktivní, tj. po dobu své životnosti je ve svých materiálových parametrech stabilní (s výjimkou např. tečení skla). Může být formováno do všech existujících tvarů. Tyto žádané vlastnosti jej předurčují k velkému množství použití ve většině oborů lidské činnosti, např. pro „dlouhodobé“ konstrukční aplikace.

Technicky vzato je sklo podchlazená tekutina, nemá výraznou krystalickou strukturu, tzn. sklo nemá pravidelné, symetrické a periodické uspořádání základních stavebních jednotek na delší vzdálenosti. Částice jsou uspořádány pouze v sousedství na krátké vzdálenosti, jelikož ani v tavenině nejsou všechny krystaly rozrušeny a rozpuštěny, tj. sklo není 100% amorfní. Tyto krystalky představují ve většinové skelné amorfní fázi jemná keramická zrna v rozmezí velikostí 0,1 – 10 μm z oxidů SiO₂, Al₂O₃, LiO, MgO, TiO₂ a nebo P₂O₅.



Zdroj: Aspects of Structural Glass, Tim Morgan, Institute of Structural Engineers, 2010

Sklo je **anorganický homogenní** (tj. stejné v celém objemu) **amorfní izotropní** (tj. stejné ve všech směrech) **tuhý** materiál. Tyto vlastnosti se projevují například tak, že těleso ze skla se teplotně roztahuje v každém směru, naopak krystalické těleso se teplotně roztahuje významně podle krystalických os.

Pokud je čiré sklo dlouhodobě vystavené určité vyšší teplotě (tzv. teplota krystalizace), za které probíhá ve sklovině restrukturalizace zárodků v malé krystalky (tzv. zpětná krystalizace), dojde ve výsledku ke ztrátě čirosti skla - tzv. odskelnění.

Lokální krystalizace skla je nežádoucí, jelikož vyvolává ve sklovině nežádoucí lokální vady v pnutí materiálu. Tyto lokální nehomogenity jsou zdrojem poruch a prasklin ve sklovině.

Sklo velice pomalu teče. Lze to pozorovat na velmi starých okenních tabulkách, které jsou v dolní části měřitelně silnější, než nahoře. Velké problémy působí tečení skla v čočkách a zrcadlech obřích optických teleskopů, kde i změny rozměrů v řádu setin milimetru mohou zhoršit optické vlastnosti přístroje.

Chemickým složením lze sklo zjednodušeně chápat jako směs křemičitanů, tuhý roztok kovových oxidů v oxidu křemičitém. Běžné tzv. "normální sklo" se vždy blíží chemickým složením hexakřemičitanu disodnovápenatému Na₂O.CaO.₆SiO₂ (Na₂CaSi₆O₁₄). Amorfní struktura tohoto křemičitanu je tvořena nepravidelně uspořádanými řetězci kovalentních tetraedrů SiO₄ (spojených vrcholky) a ionty Na⁺ a Ca⁺, které se k tomuto polykřemičitanovému skeletu (s aniontovým charakterem) poutají v podstatě iontovou vazbou. Samotná chemická vazba Si-O je iontově kovalentní a předurčuje sklovině vysokou pevnost, viskozitu a chemickou odolnost. Dvojmocný atom kyslíku vytváří ve sklovině polymer (X)-Si-O-Si-(X).

Při procesu chladnutí zabrání rostoucí viskozita skloviny pohybu molekul, a tím i brání krystalizaci křemičitých sloučenin. Sklo tedy nemá přesnou teplotu tání, ale rozsah teplot, kdy s klesající teplotou roste viskozita. Vznikne průhledné sklo. Jeho vlastnosti - tavitelnost, tepelná roztažnost, mechanická a chemická odolnost, tvrdost, lesk, propustnost a lom světla - závisí na chemickém složení. Vhodnou skladbou surovin lze docílit požadované vlastnosti technických skel.

Sklo obsahuje především oxid křemičitý (70-75%), který je obsažen v křemenu nebo křemičitém písku (též sklářském písku), ze kterého se vyrábí. Teplota tání křemene je okolo 2 000 °C (3 632 °F). Proto se při výrobě skla přidávají alkalické látky, které tuto teplotu výrazně snižují. Mezi takové látky patří soda (uhlíčitan sodný) a potaš (uhlíčitan draselný), které snižují teplotu tání asi na 1000 °C. Protože alkálie snižují odolnost skla vůči vodě, což je nežádoucí, přidává se také oxid vápenatý, který tuto odolnost zlepšuje ⁽²⁹⁾.

Příklad chemického složení (v % hmotnostních %) -	- plochého skla	- obalového skla
	rovněž označení „sodnovápenaté sklo“	
Oxid křemičitý (SiO ₂)	72,6	71 až 73
Oxid sodný (Na ₂ O)	13,6	12 až 14
Oxid vápenatý (CaO) z uhlíčitanu vápenatého CaCO ₃	6 – 11 (obvykl. 8,6)	9 až 12
Oxid hořečnatý (MgO)	1,5 – 4,5 (obvykl. 4,1)	0,2 až 3,5
Oxid hlinitý (Al ₂ O ₃)	0,7	1 až 3
Oxid draselný (K ₂ O)	0,3	0,3 až 1,5
Oxid sírový (SO ₃)	0,17	0,05 až 0,3

4.1.4. Základní dělení skla

Sklo **sodné** je lehce tavitelné a vhodné na foukání. Je měkké a tvárné, tuhne poměrně pomalu a proto je lze dlouho složitě tvarovat bez nutnosti následných úprav broušením a řezáním. Všechna antická skla byla sodná, stejně tak i sklo benátské a sklo v benátském stylu od 15. až do 18. století. Obsah alkálií ve skle způsobuje vyšší koeficient tepelné roztažnosti, který snižuje odolnost skla vůči tepelné zátěži vyvolané prudkými změnami teploty.

Sklo **draselné** je tvrdé, vhodné na řezání a broušení. Má vyšší teplotu tání. Nejdříve se z něj vyrábělo zelenavé lesní sklo a po zvládnutí technologie čištění a odbarvování také sklo křišťálové.

Měkké **olovnaté** sklo je vhodné na lití do forem a na výrobu optického skla. Olovnaté sklo má sníženou odolnost proti chemickému působení. V optických aplikacích se používá spolu s korunovým sklem, které nerozptyluje barvy a obsahuje až 70% oxidu fosforečného. Skla bohatá olovem mají relativně nízkou teplotu tání a jsou k chemickým činidlům málo odolná. Charakteristické chemické zastoupení pro tento typ skla představuje 54-65% SiO₂, 25-30% PbO, 13-15% Na₂O nebo K₂O.

Dále lze ještě rozlišovat skla hlinitá, křemičitá (silikátová), boritá, chalkogenidová, halogenidová, fosforečnanová, atd.

4.2. SUROVINY VÝROBY SKLA

Základní surovinou pro výrobu skloviny je směs, nazývaná **sklářský kmen** o přibližném složení:

- 50% oxid křemičitý (SiO₂) z křemene nebo křemenného písku,
- 16% hydrát uhlíčitanu sodného (Na₂CO₃·10H₂O) ze sody nebo uhlíčitanu draselného (K₂CO₃); potaše,
- 12% uhlíčitan vápenatý (CaCO₃) z vápence,
- 18% odpadní sklo z drcených střepek,
- 4% ostatní látky jako borax (Na₂B₄O₇·10H₂O), oxid hlinitý (Al₂O₃), kyselina boritá (H₃BO₃), oxid olovnatý (PbO).

²⁹ Skla s vysokým podílem sloučenin alkalických kovů jsou výrazně narušována vroucí vodou. Dochází totiž k vyluhování těchto alkalických sloučenin ze skla. Opakovaným vyvařením skla se část alkalických sloučenin z povrchu vyluhuje a stálost skla se tím zvyšuje. Místo vroucí vody lze účinněji využít působení vodní páry. Mnohem silněji je však sklo porušováno alkalickými louhy.

Dalšími surovinami pro výrobu skla jsou barviva, kaliva, čeřiva a pomocné suroviny. Tyto modifikátory sami sklo nevytvářejí, pouze mění vlastnosti SiO_2 . Snižují teplotu tavení skloviny, ruší kyslíkové vazby v polymeru $(\text{X})\text{-Si-O-Si-(X)}$, čímž zároveň i zhoršují chemickou odolnost skla. K potlačení těchto negativních dopadů se proto používají v tavenině stabilizátory Na_2O a CaO .

Čeřiva se do sklářského kmene přidávají v malém množství za účelem odstranění bublinek a nečistot z roztavené skloviny, kterou tím zároveň homogenizují. Pro tento účel se používají sírany (sodný, vápenatý, barnatý) nebo dusičnany – ledky (draselný, vápenatý, barnatý). Podle funkce při tvorbě požadovaného skla rozlišujeme základní suroviny kyselé a zásadité.

4.2.1. Kyselé suroviny

Kyselé suroviny mají význam sklotvorný. Sklářský písek (zrnitý křemen) se hodnotí podle čistoty, obsahu železa, podle velikosti a tvaru zrn, na nichž závisí tavitelnost. Železo zbarvuje sklovinu zeleně. Písek pro optické sklo nesmí obsahovat víc než 0,01% oxidu železitého.

Oxid boritý zlepšuje tepelnou a chemickou odolnost skel. Do sklářského kmene se přidává jako kyselina boritá nebo borax. Skla borosilikátová mají část sklotvorného SiO_2 nahrazenou oxidem boritým.

4.2.2. Zásadité suroviny

Zásadité suroviny (několika-složkové, střepy, horniny) jsou taviva a stabilizátory, které zlepšují vlastnosti skloviny a usnadňují její tavení. Zároveň však klesá chemická odolnost výsledného výrobku. Skla bohatá obsahem na sloučeniny alkalických kovů jsou zřetelně narušována vroucí vodou.

Kalcinová soda patří mezi nejdůležitější taviva. Žárem a kyselým prostředím se v peci rozkládá. Unikající oxid uhličitý sklovinu míchá a čeří.

Přídavkem potaše, uhličitanu draselného se získává tabulové sklo pro výrobu oken, výkladních skříní apod. Sklovina přitom tuhne na vrstvě roztaveného cínu a vzniklé tabule mají zvlášť hladký povrch (plavené sklo). Potaš je zdrojem oxidu draselného do křišťálových skel určených k broušení.

Vápenec je nejlevnější stabilizátor. Zvyšuje odolnost skla vůči vodě a chemickým vlivům, oxid hořečnatý navíc zlepšuje zpracovatelnost skloviny ve formách.

Oxid olovnatý se přidává do vsázky jako suřík a klejt (oxid olovnatý). Částečně se dá nahradit levnějším oxidem barnatým, zinečnatým nebo sodným.

Několika-složkové suroviny obsahují kromě oxidu křemičitého a složek zásaditých i oxid hlinitý, který je hlavním nositelem dobrých chemických a mechanických vlastností levných horninových skel. Přísada oxidu hlinitého zvyšuje pevnost a zlepšuje zpracovatelnost skloviny. Živce jsou křemičité horniny hlinito-sodné nebo hlinito-draselné. Ve sklovině zastupují písek i alkálie.

4.3. ZBARVENÍ SKLA - BARVIVA

K barvení skla se používají barviva (oxidy a soli kovů, sulfidy, kovové prvky). Principem zbarvení skla je intenzivní pohlcování některé části viditelného spektra původně bílého světla. Zbarvení a jeho intenzita závisí na chemickém složení, stupni oxidace a koncentraci barviva. Také závisí na podmínkách tavení a tepelném zpracování skla. Chemické složení zabarvovaného skla má rovněž vliv na výsledné zbarvení.

Podle fyzikálně chemické podstaty lze barviva rozdělit na iontová, molekulární a koloidní. Barviva mohou působit intenzivní zbarvení v přímé úměře podle množství přítomné barvicí látky. Některá barviva naopak způsobí zbarvení skla pouze v určitém množství a za určitých tepelných podmínek. Barevné lazury skla způsobují barviva, která pronikají do povrchu skloviny při nižších teplotách.

Při výrobě bezbarvých skel se bezbarvosti/odbarvení dosahuje přidáním barvicího činidla, které je doplňkovou barvou k původnímu nežádoucímu zbarvení skloviny. Odbarvené sklo ve srovnání s původně čirým sklem působí tlumivým šedivým nádechem bez lesku v důsledku snížené prostupnosti materiálu pro světlo. Z transparentní sklovina přechází v mírně translucenční.

4.3.1. Vliv jednotlivých sloučenin a iontů na barvu skla

- Oxid cínu s oxidy antimonu a arzenu -
produkují neprůhledné bílé alabastrové sklo. Poprvé bylo použito v Benátkách k výrobě imitace porcelánu (mléčné sklo se zakalujícím oxidem arzenitým (As_2O_3), oxidem cínatým (SnO) a některými fosforečnany). Oxid antimonitý (Sb_2O_3) dodává žlutou barvu.
- Stříbrné sloučeniny -
(zejména dusičnan stříbrný) mohou produkovat rozsah barev od oranžově, červené po žlutou. Metoda, jakou se sklo zahřeje a ochladí, může výsledně ovlivnit barvy produkované těmito sloučeninami.
- Cér - nebarví sklo, ale způsobuje zlatavé krystalky ve sklovině. Rovněž způsobuje nepropustnost pro UV záření.
- Chrom - zbarví zeleně, oxid chromitý (Cr_2O_3) žlutozeleně, při přesycení oxidem chromitým vznikají ve sklovině lesklé šupinky.
- Kobalt - v malé koncentraci (0,025–0,1 %) dává modré sklo, v boritých sklech světle růžovou. Oxid kobaltnatý (CoO) dává tyrkysovou barvu.
- Mangan -
může být přidán v malém množství na odstranění zeleného odstínu od železa, nebo ve vyšších koncentracích na dodání ametystové barvy. Oxid manganičitý (MnO_2) barví fialově, oxid manganatý (MnO) barví žlutě až hnědě, oxid manginitý (Mn_2O_3) barví ametystově fialovou.
- Měď - barví zeleně, modře a červeně. Použití dvou až tří procent oxidů mědi produkuje tyrkysovou barvu. Čistá kovová měď dává velmi tmavě červené, neprůhledné sklo, které je někdy užívané jako náhrada za zlaté rubínové sklo. Oxid měďný (Cu_2O) a oxid měďnatý (CuO) dává červenou barvu.
- Nikl - podle koncentrace produkuje modré, fialové nebo i černé sklo. Oxid nikelnatý (NiO) dává skořicově červenou nebo žlutozelenou barvu.
- Neodym -
způsobuje červenofialové zabarvení. V tenkovrstvé sklovině způsobuje namodralý nádech.
- Praseodym -
způsobuje světle zelené zabarvení. V tenkovrstvé sklovině způsobuje žluté zabarvení.
- Neodym a Praseodym -
společně způsobují šedou až olivově zelenou barvu.
- Selen - může být použit v malých koncentracích na dekolorizaci skla nebo ve vyšších koncentracích na dodání červené barvy. U draselných skel způsobuje růžové zabarvení (rosalina), u sodných skel způsobuje oranžové zabarvení a u olovnatých skel nažloutlé zabarvení. Rumělka vzniká za určitých podmínek.
- Síra - podle mocnosti způsobuje žluté zabarvení, samotná síra způsobuje modré.
- Přidáním titanu -
vzniká citrónově žluté, žluto-hnědé sklo, fialové nebo bílé.
- Uhlík - způsobuje rovněž žluté zabarvení.
- Uran - (0,1–2 % hmotnostního obsahu) může být přidán na dodání fluorescentní žluté nebo zelené barvy. Uranové sklo není typicky „radioaktivní“, ale je potenciálně nebezpečné. Jeho prášek, vzniklý například při leštění brusným papírem, pokud je inhalován (vdechnut), může být karcinogenní.
Proto pro úplnost je vhodné podotknout, že z hlediska legislativy v ČR je na manipulaci s oxidy uranu a jinými jeho sloučeninami při barvení skla nahlíženo jako na zacházení s jaderným materiálem, který musí být povolený, evidovaný a kontrolovaný SÚJB⁽³⁰⁾ v rámci Mezinárodní agentury pro atomovou energii ve Vídni. Dle legislativy v ČR by hmotnostní obsah uranu ve skle neměl přesáhnout 1% z hlediska bezpečné dávky ozáření člověka.
- Vanad - způsobuje zelené zabarvení v křemičitém skle a hnědé v boritém skle.
- Zlato - chlorid zlatitý ($AuCl_3$) ve velmi malých koncentracích (kolem 0,001 %) tvoří silně rubínově zbarvené sklo, kdežto nižší koncentrace produkují méně intenzivní červenou, často marketingově označovanou jako „brusinka“.
- Železo - barví sklo podle mocnosti zelenomodře ($FeO + Fe_2O_3$) nebo nahnědo (Fe_2O_3), v menších koncentracích nažluto. Oxid železitý (Fe_3O_4) způsobí modrozelené zbarvení. Oxid železnatý (FeO) dává černé zabarvení.

³⁰ podle „atomového“ zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření.

4.3.2. Doplnění

Přidání barya a TiO_2 zvýší refrakční index (index lomu). Oxidy PbO a TiO_2 působí zesilování barev. TiO_2 rovněž snižuje součinitel délkové teplotní roztažnosti, zvyšuje chemickou odolnost a zvyšuje pohlcování UV záření. Oxid thoria způsobuje velmi vysoký refrakční index skla a je užíván k produkci vysoce kvalitních čoček.

Větší množství železa jsou užívána ve skle, které absorbuje infračervené spektrum záření, například pro tepelně absorbující filtry ve filmových projektorech a pro netermální skla. Tedy k tzv. posunutí absorpční hrany k nižším (kratším) vlnovým délkám dochází příměsí oxidu železnatého. Cér může být použit pro sklo, které absorbuje UV vlnové délky (biologicky škodlivá ionizující radiace).

Chemické vlastnosti skla nejsou v současnosti kompletně a dostatečně prozkoumány. Často se objevují nová zbarvení skla a nová využití díky nově prozkoumaným vlastnostem, například CaF_2 a $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ působí bílé zakalení skla.

4.3.3. Zbarvení skla ionizujícím zářením

Změnu v zbarvení nebo v barvě skloviny lze dosáhnout nejenom chemickými barvivy, ale i „fyzikálním“ způsobem prostřednictvím průmyslového využití radiace, tj. ionizujícího záření. Zbarvení ozářením se nepoužívá pouze experimentálně, ale jde o sériové průmyslové nasazení ve výrobních linkách.

Radiačně ozářená a zbarvená skla byla například ve velkém rozsahu poprvé použita pro obložení fasády „obrazovkami“ v projektu Nové scény Národního divadla v Praze a na skleněném obložení nástupiště a kolejového tubusu stanice metra B Jinonice rovněž v Praze.

Ozářením určitého druhu skla způsobuje změnu jeho zbarvení do přechodů barev a tónů žlutohnědé až kouřově šedé. Ozáření skla s obsahem manganu způsobuje změnu jeho zbarvení do intenzivních tmavých fialových ametystových barev. Lokálním ozařováním částí skleněného výrobku lze dosáhnout lokálního zbarvení a tedy volitelného dekorování.

Zbarvení způsobené ozářením je stabilní v řádu desítek let, pokud nedojde k působení vysokých teplot. Například vystavení skla Simax vůči UV záření (a nebo rentgenovému a gama záření) způsobí barevné změny, které lze odstranit zahřáním skla na teplotu 400 – 450 °C.

4.3.4. Měření barevnosti skla - kolorimetrie

Kolorimetrií se rozumí moderní metoda měření barevnosti pro objektivní měření barev a barevných odstínů tělesa, které slouží ke standardizovanému popisu této vlastnosti nezávisle na subjektivním vnímání. Subjektivní vnímání barevného tónu může být mimo jiné ovlivněné i pozorovacím úhlem vůči oku³¹.

Pro měření barevnosti se používá dvou paprskový spektrofotometr, který měří zvláště spektrální složení paprsku viditelného světla odraženého od měřeného tělesa a spektrální složení paprsku viditelného světla procházejícího tím samým měřeným tělesem. Pro zdroj světla se používají normalizované druhy světelných lamp a filtrů s definovaným spektrem záření.

Kolorimetrie slouží v průmyslové výrobě ke kontrole stejné barvy a barevného tónu určité série výrobku, která může pocházet z jedné výrobní linky nebo i několika paralelních výrobních linek a která může být vyrobena v jednom časovém úseku nebo v průběhu několika časových odstupů.

Kromě barevnosti skleněných výrobků se rovněž měří i bezbarvost u výrobků z čirého skla.

4.3.5. Historické názvy barevných skel

Při výrobě barevných skel se v průběhu historie do určité míry ustálily názvy pro upravené skloviny, které přejímaly označení dle barevné podobnosti s polodrahokamy, drahokamy, jinými minerály, event. rostlinami. Např.: Akvamarín, Ametyst, Citrín, Granát, Hyacint, Chalcedon, Chrysopras, Jade, Kryzolit (Crizolit, Chryzolit), Opál, Rosalín, Rubín, Safír, Smaragd, Topas, Tyrkys, aj.

Hematinon -

(také: červený hyalit), označení pro červené opakní zbarvení skloviny, které je způsobeno oxidy mědi a železa. Další historická označení jsou Welschrot (vlašská červeň), Siegellackrot (pečetní vosk) nebo Kupferglas (měděné sklo).

Opalín - (také: koštěnka), Beinglas, Knochenglas (kostní sklo), Waisl, mléčná slabě namodralá sklovina zakalená kapičkami fosforečnanu vápenatého $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, který v tavenině vytváří emulzi. V tenké vrstvě sklovina zbarvuje procházející bílé světlo žlutými až hnědými tóny. Fosforečnan vápenatý se do skloviny získával ve formě rozdrčené kostní moučky.

Opalíny nelze zaměňovat s rovněž neprůhlednými opalovými a alabastrovými sklovinami.

³¹ dle nestejnomyerného rozpoložení tyčinek a čípků na sítnici oka.

Avanturin -

(také: aventurin), jsou zelenavé skloviny, v jejichž struktuře jsou vysrážené měděné krystalky nebo krystalky oxidu chromitého Cr₂O₃, které se do taveniny přidávají v nadbytečném množství.

4.3.6. Solarizace, nežádoucí zbarvení skel

Tento jev souvisí s procesem fyzikálního a chemického odbarvování skloviny prostřednictvím barvicího činidla dodávajícího doplňkovou barvu. Historické sklářské receptury dokládají použití právě oxidu manganitého (MnO₂, burel, pyroluzit) jako tohoto odbarvujícího barevného činidla. Vlivem dlouhodobého působení slunečního UV záření reaguje mangan, přítomný ve sklovině v podobě MnO, s oxidem arseničitým (As₂O₅, součást dřívě užívaných čeřiv) za vzniku nežádoucích fialových a hnědofialových barevných tónů.

Solarizaci skloviny lze vratně odstranit teplotním působením nad 350 °C. Skloviny vyrobené s obsahem PbO (nad 3%) solarizaci nepodléhají.

4.4. KALIVA

Kaliva jsou látky, které zvyšují rozptyl světla a tím zvyšují neprůhlednost a zákal skel. Rozptyl světla je způsobován velkým množstvím malých částic přítomných ve skle, které mají jiný index lomu, ať již vyšší, nebo nižší, než má sklo, které tyto částice obklopuje.

Dalším příznivým efektem k rozptýlení procházejícího světla a tedy k zakalení skloviny je vhodná velikost částic ve skle, která se blíží vlnové délce viditelného světla. Pokud je velikost částic menší než vlnová délka viditelného světla, k rozptylu téměř nedochází (např. hranice mezi viditelným fialovým světlem a UV zářením je 380 nm). Naopak se zvyšující se velikostí částic dochází u skloviny k opalescenci a dále k rozptylu.

vliv velikosti rozptylujících částic ve sklovině	nm
opalescence	200
zakalení	300
neprůhlednost – objem kalících částic může dosahovat 10% objemu skloviny	1 000
Převzato: Zakalená bižuterní skla, Petr Exnar, Technická univerzita Liberec, Technika, technologie, vydání 3/2003, http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1656&cid=6.html	

Podle způsobu vzniku těchto částic lze dělit zákal na krystalické (vyvolané přítomností krystalických látek), emulzní (vyvolané kapičkami skla jiného složení) a plynné (způsobené bublinkami plynu). Kalící částice se vyčleňují z původní homogenní skloviny při poklesu teploty taveniny kolem 1 200 °C, kdy při dalším poklesu teploty taveniny samostatně krystalizují. Z chemického hlediska se jako kaliva používají fluoridy, fosforečnany, sírany, arseničnany, oxidy céru a cínu. K docílení intenzivnějšího efektu zakalení je výhodné chemicky odlišná kaliva použít společně v jedné tavenině.

Tvorba zákalů je velmi důležitá při výrobě osvětlovacího skla, některých druhů plochého skla, pro výrobu skleněných obkládaček, skla a výrobků používaných v domácnosti, bižuterie atd.

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL**5. DEFINICE PROBLEMATIKY - SKLO JAKO ODPAD**

Využitím drčeného odpadního skla a skleněných střepů v určitém podílu vsázky dochází k materiálovému využití odpadů jako *taviva*, úspoře základních nerostných surovin a současně ke zrychlení tavicího procesu a zlepšení homogenity skloviny. Pokud by však podíl skleněného odpadu vsázce byl větší než 30 až 40 %, docházelo by k nežádoucímu prodloužení doby čerení skloviny.

5.1. ODPAD, SKLENĚNÉ NÁDOBY

Mezi tento skleněný odpad se řadí skleněné láhve, dózy a jiné nádoby používané jako obaly pro nápoje a jiné potraviny. Vratné skleněné nádoby lze znovu použít k původnímu účelu, případně při výrobě skla lze použít jako přídatnou surovinu. Systém sběru se ve světě uplatňuje zatím omezeně formou výkupu zálohovaných lahví, který je zajišťován výrobcem nebo obchodním prodejcem. V některých zemích se rozšiřuje sběr tříděných lahví přímo od obyvatel.

5.2. ODPAD, SKLO ZLOMKOVÉ

Mezi tento skleněný odpad se řadí úlomky skleněných obalů a střepy vznikající při zpracování technického a stavebního skla, tj. zlomky tabulového skla neobsahujícího železo, zlomky skleněných obalů z potravinářského a obalového průmyslu bez korunkových korkových uzávěrů, zlomky skla z pivovarů, různé druhy profilovaného skla, skla z optického průmyslu, olovnatého skla, skla z izolačních nádob, zrcadlového skla, skla z obrazovek, zářivek atd..

Ve světovém měřítku se při výrobě skla stále více používají skleněné úlomky. Průmyslový odpad vytříděný podle druhů a barev, následně zbavený cizích příměsí se dodává přímo sběrnám, případně zpracovateli.

5.3. ODPADY Z SKLÁŘSKÉ PRODUKCE

Jinou skupinu tvoří průmyslové odpady ze samotné výroby a úpravy skla. Nejedná se tedy o zpracování odpadu nebo jeho recyklaci z použitého nebo nefunkčního (rozbitého) sklářského výrobku. Sklářská výroba a její průmysl zapřičiňuje vedlejší produkci odpadních materiálů, u kterých není možná opětovná recyklace ve výrobním procesu a nelze u nich zajistit ani jiné materiálové využití jako vstupní suroviny (např.: sintrací).

Mezi takové odpady patří například toxické sklářské brusné kaly z výroby olovnatého křišťálu s vysokým podílem PbO nebo produkty výluhů z chemického leštění skla kyselinou HF. Toxicita odpadu (a nejen z sklářského průmyslu) komplikuje nebo znemožňuje jeho běžné skládkování, protože dochází k uvolňování nebezpečných látek do okolí a do životního prostředí (např. popel, popílek, prach).

Mezi další toxické produkty sklářské výroby patří z těžké oxidy olova, arzenu a antimonu, které se uvolňují z horké taveniny. K jejich separaci ze spalin pece se používá elektrostatická filtrace.

5.4. VITRIFIKACE

Možné zpracování toxického odpadu přeměnou na formu méně toxickou nebo dokonce na odpad netoxický nabízí opět sklo v podobě vitrifikace. Procesem vitrifikace se toxický materiál tepelně zakomponuje za běžných tavicích teplot do taveniny skla, čímž se odpad po vychlazení zapouzdří do obalu chemicky netečného a odolného skla.

Vázanému odpadu ve skle není tímto umožněno samovolné uvolňování nebezpečných látek do okolí, například výluhem. Dále odpad svých působením nerozruší schránku z chemicky odolného a netečného skla. Hmotnostní poměr odpadu ve výsledné sklovině je možný v běžném rozmezí 40-85 %. Výsledný produkt může být pouze amorfni skleněný nebo i řízeně sklokrytalický.

Vitřifikovaný odpad lze následně sládkovat běžným způsobem nebo jej lze v určitých případech opětovně použít jako stavební materiál. Sklokrytalický výrobek se zakomponovaným popílkem a struskou může mechanickou, povrchovou a chemickou odolností konkurovat trubním kanalizačním tvarovkám z taveného čediče.

Vitřifikovat lze i radioaktivní materiál, který vyžaduje speciální zatavení v elektrických pecích.

5.5. SLINOVÁNÍ NEBOLI SINTRACE

Jedná se o určitý inovační proces využití recyklovaného skla. Skleněný odpad je nadrcen a vysypán do požadované formy, ve které je skleněná drť následně spečena/slinuta působením tepla do kompaktního tělesa. Slinutím jsou z původního sypkého objemu vytlačeny mezery a póry mezi zrny.

Povrch zrn je vysokou teplotou nataven a jednotlivá zrna se touto povrchovou taveninou navzájem smáčí a po ochlazení tak splynou.

Energetická výhodnost sintrace spočívá ve skutečnosti, že jejího nastartování a průběhu se nedosahuje za vysokých teplot obvyklých pro tavení skloviny, ale podle druhu vstupního materiálu a zastoupení frakcí drti postačuje dosáhnout 80-90% výše teploty tavení, tj. kolem 1 000 °C. Také nedochází k roztavení celého objemu vsádky, ale k natavení povrchů jednotlivých zrn.

Výstupným produktem mohou být například právě sklokystalické obkladové desky⁽³²⁾, které jsou blíže uvedeny v následující kapitole (viz. následující kapitola: **Slinované sklokystalické prvky**).

32

-1) Odpadní skla jako tavivo v surovinové směsi za sucha lisovaných keramických dlaždic (2009) výsledek RIV/00216305:26110/09:PU82961,
- 2) Recyklované sklo ze zářivek jako alternativní surovina pro výrobu obkladů na bázi spékaného skla (2011) výsledek RIV/00216305:26110/11:PU92171,
- 3) Sintrované desky na bázi skla pocházejícího z demontovaných obrazovek ve stavebnictví (2009) výsledek RIV/00216305:26110/09:PU82887,
vše výsledky z výzkumného záměru MSM0021630511 - Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí (2005-2011, MSM), předkladatel - Vysoké učení technické v Brně / Fakulta stavební, dodavatel MSM - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT).

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

6. DEFINICE PROBLEMATIKY - PŘÍBUZNÉ APLIKACE

6.1. SKLOKERAMIKA, SKLOKRISTALICKÉ HMOTY

První zmínka o sklokeramice pochází z roku 1739, kdy byla publikována první práce o řízené krystalizaci skla k výrobě polykrystalického tzv. Réaumurova porcelánu s nízkou pevností. V 60. letech 20. stol. byla v Československu zvládnutá výroba polykrystalických výrobků z horninového taveného čediče. Vývoj sklokeramiky probíhal v následujících letech po roce 1960. Technologii výroby sklokeramiky, kterou známe ze současné produkce, vyvinuli a poprvé průmyslově nasadili v USA (glass ceramics). V roce 1970 byla představena transparentní sklokeramika (ROBAX).

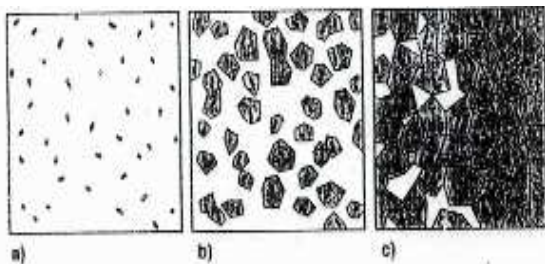


Fig. 11-1 From glass to glass-ceramic. (a) nuclei formation, (b) crystal growth on nuclei, (c) glass ceramic microstructure.

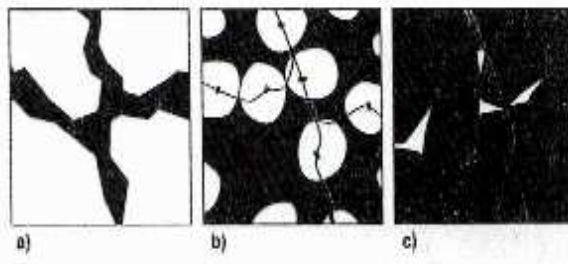


Fig. 11-3 Glass-ceramics from powdered glass. (a) powdered glass compact, (b) densification and incipient crystallization, (c) frit-derived glass-ceramic.

Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT v Praze

Primární tavenina takové skloviny musí vykazovat vysokou chemickou homogenitu. Skladba skloviny obsahuje oxid hlinitý, oxid křemičitý, oxid lithný a oxid hořečnatý. Výsledné skloviny jsou lithnohlinítkřemičité (LiAlSi sklo) nebo hořečnatohlinitokřemičité (SnAlSi sklo).

V další fázi je sklovina zpracovaná do požadovaného tvaru běžnými sklářskými postupy. Následuje fáze vzniku sklokeramického materiálu, kdy polotovary projdou procesem řízeného tepelného opracování. Sklovina se transformuje na neporézní sklokeramiku v celém objemu výrobku. Teplota je řízena s přesností ± 2 °C na 1 000 °C. Při transformaci se ve sklovině vytvářejí krystalické zárodky s velikostí řádově 0,1 - 1 μm (tj. 0,0001 - 0,001 mm). Kvůli řízenému vzniku krystalů se do skloviny přidávají tzv. *nukleátory* (*nukleární činidla*), což jsou v případě kovových nukleátorů částice zlata, mědi nebo platiny a v případě oxidických nukleátorů částice oxidů chromu, titanu nebo zirkonia. Pokud krystalky svou velikostí nepřesáhnou vlnovou délku viditelného světla (0,38 - 0,78 μm , tj. 380 - 780 nm), je výsledná sklokeramická hmota transparentní.

Dosahované pevnosti sklokeramiky jsou v řádu **100 MPa**.

Protože řízená krystalizace probíhá globálně v celém objemu skla a ne pouze lokálně, nevyskytují se ve sklovině nežádoucí lokální vady v pnutí.

Tepelně odolné keramické sklo odolává i tepelným šokům a to i prudkému zchlazení o 650 - 700 °C. Výrobou je dimenzované na teploty 700 - 800 °C. Speciální sklokeramiky odolají šoku na teplotu 1 200 °C. Konkrétně lithnohlinítkřemičité keramické sklo se vyznačuje minimální tepelnou roztažností (Coefficient of Thermal Expansion), kdy:

- součinitel teplotní roztažnosti keramického skla je, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot \text{K}^{-1}$
- součinitel teplotní roztažnosti běžného skla je, $\alpha = 8-9 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$.

Sklokeramické hmoty se používají v elektrotechnice v integrovaných obvodech, ve výrobě televizních obrazovek, ke spojování kovů-skla-keramiky, k výrobě varného nádobí a varných desek a k výrobě družicové optiky. Sklokeramiku nelze zaměňovat například s varným borosilikátovým sklem Pyrex.

6.2. PĚNOVÉ SKLO

Výroba pěnového skla je patentována v roce 1936 ve Francii. Vlastní výroba se datuje od 40. let 20. století, kdy se začalo používat jako náhrada korku při stavbě lodí. V tehdejší Československu bylo pěnové sklo vyráběno od roku 1958 do konce osmdesátých let.

6.2.1. Výroba pěnového skla

Výchozí surovinou je nízkotavitelné aluminio-silikátové sklo (recyklované sklo). Po vychlazení se sklo rozemele na velmi jemný prášek. Vzniklá surovina skleněného prachu se při dalším mletí smíchá s více jemným uhlíkovým prachem. Výsledná směs se v tenkých vrstvách rozprostírá do ocelových forem. Formy jsou následně zahřáté v tunelové peci na cca 1000°C. Zde dojde k opětovnému roztavení skleněného prachu. Přítomný uhlíkový prach reaguje se vzduchem za vzniku oxidu uhličitého CO₂. Vznik tohoto plynu vytvoří v tavenině skla drobné bublinky. Výsledná hmota zvětší svůj objem z tenké vrstvy až na dvacetinásobek původního objemu a vyplní tak celou formu. Takto vypěněný blok taveniny skla je pozvolna ochlazován z 1000°C na 20°C. Tlak plynu CO₂, který zůstal uzavřen po ochlazení ve sklovině, rovněž poklesne na 1/3 atmosférického tlaku. Po vyjmutí vychlazených bloků pěnového skla dochází k obroušení a k odstranění povrchové vrstvy (kůrky). V kontrole kvality je sledovaná homogenita struktury a další parametry výrobků.

6.2.2. Materiálové vlastnosti pěnového skla

Výrobky z pěnového skla jsou v materiálu:

- vodotěsné v celém svém objemu
- nenasákavé pro uzavřenou strukturu pórů, tj. nemění se jejich tepelně izolační parametry
- plynotěsné, parotěsné a nepropustné radonu, koeficient difúzního odporu μ je obdobný jako u tabulového skla
- nehořlavé
- jako tepelné izolanty mají nejvyšší pevnost v tlaku (0,7-1,6 MPa), jsou zároveň dostatečně tuhé a prakticky nestlačitelné,
- funkci tepelného izolantu pěnové sklo zastává v podobě přesných řezaných tvárnic nebo v podobě zásypu z frakce lehčeného umělého kameniva / sypaniny,
- tvarově stálé, tepelná roztažnost je srovnatelná s betonem a ocelí, proto je možné aplikovat celoplošné lepení konstrukčním materiálům bez speciálních dilatačních komponent
- biologicky a chemicky odolné a stálé jako běžné sklo
- křehké a málo odolné proti drcení povrchovými lokálními silami
- málo odolné proti povrchové námraze, kdy dochází k mrazové erozi jeho buněk. Tomuto je nutno zabránit například povrchovými opatřeními, jako je nátěr povrchu horkým asfaltem.

Vybrané parametry pěnového skla	
Objemová hmotnost (kg/m ³) tolerance 10%	100 - 175
Součinitel tepelné vodivosti (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) při 0°C, tolerance 5%	0,038 - 0,049
Součinitel tepelné vodivosti (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) při +10°C, tolerance 5%	0,040 - 0,050
Pevnost v tlaku (MPa)	0,35 - 1,6
Pevnost v ohybu (MPa)	0,3 - 0,6
Modul pružnosti v ohybu (MPa)	600 - 1500
Součinitel délkové teplotní roztažnosti (K ⁻¹)	8,3·10 ⁻⁶ - 9,0·10 ⁻⁶
Měrná tepelná kapacita (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,84
Faktor difúzního odporu μ (-)	∞
Rozsah teplot pro konstrukční použití (°C)	- 260 až + 430

6.3. VAKUOVÉ IZOLACE

V základním popisu nepředstavuje tepelná vakuová izolace nový materiál, ale jde přímo o konečný výrobek zabudovaný do stavební konstrukce.

Tepelná izolační schopnost neboli tepelná nevodivost je způsobena soustavou reflexních folií, mezi kterými je zajištěno vakuum. Vakuum v desce omezí přenos tepla vedením (kondukcí) z jedné strany desky izolace na druhou. Přenos tepla radiací je potom dále omezen právě reflexními foliemi na povrchu izolační desky. Hliníkem pokovená plastová folie tvoří neprodyšnou těsnou ochrannou obálku vnitřního jádra izolační desky s vakuem. Jádro je vyrobeno z vysoce porézního oxidu křemičitého, který svou tuhostí zároveň čelí okolnímu atmosférickému přetlaku.

S ohledem na princip tepelné izolace se zabudovaným vakuem nezávisí tepelný odpor desky na její tloušťce, deska vakuové izolace o tloušťce 20 mm má součinitel tepelné vodivosti v tomto směru o

hodnotě $0,004 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tato hodnota může narůst u zabudované izolace časem na $0,008 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Desky vakuové izolace se osazují přesně na míru do souvrství fasád, podlah i plochých střech. Desky lze aplikovat i do ztracených bednění jako trvalá izolace monolitických ŽB stěn. Desky lze rovněž osazovat jako izolační výplň do dveří a plných výplní oken.

6.4. SLINOVANÉ SKLOKRISTALICKÉ PRVKY

Užitkovými vlastnostmi je tento materiál vhodný pro širokou výrobu a tvorbu dekorativních či užitkových předmětů, obkladů stěn, opláštění budov, provětrávaných fasád se zateplením, nábytku a nebo dláždění a realizaci podlah. Svými užitkovými vlastnostmi ve spojitosti se světelnou propustností je materiál vhodný pro výrobu a instalaci světelných panelů, podsvětlených dekorativních ploch v technických, obytných, občanských, administrativních a nebo komerčních interiérech.

6.4.1. Výrobní proces sklokrystalických prvků

Těžištěm výrobního procesu je sintrace, tj. vysokoteplotní přeměna sypké vsádky drceného skla v pevnou, odolnou desku nebo jiný výrobek. Při této technologii se nabízí možnost zužitkování recyklovaného odpadního skla⁽³³⁾ nebo odpadní produkce samotných sklokrystalických výrobků. Z pohledu na materiálový cyklus skla a energetickou náročnost výroby se jedná o ekologicky příznivě působící výrobek.

Vsádka může zahrnovat monochromatická nebo zbarvená zrna, která se výrobou v tavenině slynou a na objemu tělesa vytváří saténově lesklý povrch. Povrch má potom přirozenou strukturu převážně šedé a mírně zelenavé barvy. Při pozorování zblízka lze rozeznat jednotlivá zapečená skleněná zrna.

6.4.2. Materiálové vlastnosti sklokrystalických prvků

Svými parametry je tento materiál:

- vysoce odolný vůči vnějším vlivům mechanického poškození a vlivům chemického rozrušování⁽³⁴⁾. To má důsledek v dlouhé životnosti a stálobarevnosti zabudovaných výrobků. Materiál je rovněž proto vhodný jako plnivo (ostřivo) do exponovaných syntetických průmyslových podlah⁽³⁵⁾.
- obdobné vlastnosti mechanické a chemické odolnosti platí i pro povrchovou vrstvu⁽³⁶⁾, která plně nahradí a předčí běžné obkladové materiály. Zejména tak může zastoupit a dokonce imitovat přírodní kámen nebo standardní keramické materiály.
- materiál se vyznačuje průměrnou nasákavostí (mezi 0,1–0,4%), tj. 0,3 %. To umožňuje snadnou údržbu čistoty povrchu, snadné odstranění sprejerských „graffiti“ nežádoucích nástřiků. Povrch je odolný vůči pohltivosti „načichnutí“ pachy. Materiál je rovněž mrazuvzdorný (odolnost zkouškami 100 cyklů) a tedy vhodný pro exteriérové instalace.
- hygienicky nezávadný.

Materiál je opracovatelný diamantovými brusnými, řeznými a vrtnými nástroji.

Vybrané parametry sklo krystalických prvků	
Objemová hmotnost (kg/m ³)	1 700 – 2 300
Pevnost v tlaku (MPa)	25 - 65
Pevnost v tahu za ohybu (MPa)	4 – 15 – 20
Obrusnost (mm) [Obrusnost pro keramiku]	0,72 – 1,02 [2,0]
Nasákavost (%)	0,1 - 12

³³ odpadní ploché sklo, odpad z výroby automobilových skel, odpad automobilových skel z vrakovišť

³⁴ odolnost vůči agresivním chemikáliím, tj. působení kyselin, louhů a organických i anorganických rozpouštědel

³⁵ Povrchy podlahových konstrukcí na bázi sintrovaného skla (2008) - výsledek RIV/00216305:26110/08:PU77336 výzkumného záměru MSM0021630511 - Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí (2005-2011, MSM), předkladatel - Vysoké učení technické v Brně / Fakulta stavební, dodavatel MSM - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT).

³⁶ zvláště výhodné pro prvky, u kterých má povrchová vrstva funkci obkladu nebo jiný význam designérského působení

6.5. ALKALIVZDORNÁ SKLENĚNÁ VLÁKNA DO BETONŮ A MALT

Patent na využití vláken ve funkci rozptýlené výztuže pochází z roku 1874. Od 90. let 20. století dochází k uplatnění skleněných vláken v monolitickém a prefabrikovaném betonu. V tomto případě jsou skelná vlákna využita ve funkci rozptýlené výztuže⁽³⁷⁾ betonových dílců. Vzhledem k podmínkám svého působení musí být vlákna odolná alkalickému prostředí betonu nebo prostředí jiných hmot na bázi cementu. Jsou proto vyrobeny ze speciální skloviny například s vysokým obsahem oxidu zirkoničitého (ZrO₂), který spolu s povrchovými úpravami vláken (tzv. lubrikace) zajišťuje tuto odolnost. Povrchová úprava zlepšuje vlastně smáčivost povrchu vlákna a tím jeho snadné rovnoměrné rozmíchání a pohyb v čerstvé betonové, maltové, omítkové nebo stěrkové směsi. Lubrikační vrstva povrchu vláken má rovněž pozitivní vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu. Vlastní materiál vláken pro funkci výztuže je vysoko-modulový a vysoko-pevnostní. Tvarem a hmotností jsou vlákna vyrobeny tak, aby při zhutňování betonu vibracemi se neseperovala na povrchu vyplavením nebo u dna usazením.

Vlákna zabraňují vzniku smršťovacích trhlin vyvolaných napětím doprovázející zrání betonu, malt nebo podlahových samonivelačních stěrtek. Zároveň dojde ke zvýšení houževnatosti a rázové pevnosti kompozitu a tím také ke zvýšení mrazuvzdornosti, odolnosti proti solím a rozmrazovacím látkám. Vlákna se mohou aplikovat rozmícháním do směsí, kde jsou potom skutečně rozptýlená, nebo je lze pokládat v plošných aplikacích ve formě rohoží. Skleněná výztuž nepotřebuje krycí vrstvu jako výztuž ocelová a nedochází zde rovněž k výskytu rezavých map na povrchu od probíhající koroze jako u ocelové výztuže.

Vybrané parametry alkalivzdorných skleněných vláken	
Pevnost v tahu monovláken	3500 - 3550 MPa
Pevnost v tahu pramenů	1700 - 1720 MPa
Modul pružnosti	72 - 74 GPa
Objemová hmotnost	2,68 g/cm ³
Průtažnost	2 - 2,4%
Průměr vlákna	14 μm
Vhodný poměr mezi průměrem a délkou	928 : 1
Bod měknutí	830 - 860 °C

Vlákna jsou vyrobeny tak, že roztavená sklovina o teplotě až 1 560 °C protéká přes platinoiridiové perforované destičky. Vzniklá monovlákna rychle chladnou a je na ně ihned nanášena povrchová lubrikace, která je spojuje do pramenů a je rozhodující pro další použití vláken.

Pokročilou aplikací skleněných vláken je výroba dekoračních interiérových nebo exteriérových dílců, kde přesných tvarů (balustrády, prefabrikované římsy, žebrované zvukopohltivé panely, fasádní panely) a pohledového povrchu (povrch dekorován obtisky, strukturami) pro účely designu je dosaženo použitím jemného kameniva do cementové hmoty.

Výztužné působení vláken v kompozitu, tvarová stabilita materiálu umožňuje výrobu staticky exponovaných dílců (zábradlí, schodiště, lavičky, městský mobiliář, atd.)

6.6. OSVĚTLOVACÍ OPTICKÁ VLÁKNA

Prakticky využitelný vývoj této techniky osvětlování souvisí ve svých počátcích i s rozvojem optických vláken pro elektronickou komunikaci. Pokusy rozvádět denní přirozené nebo umělé světlo prostřednictvím tubusů s vysoce reflexním vnitřním povrchem jsou známy již z konce 19. století. Nevýhodou těchto řešení jsou prostorové konstrukční nároky rozvodného systému.

V 60. letech 20. stol. nastal vývoj a technologický rozvoj telekomunikačních celoskleněných optických kabelů, který zároveň umožnil využití optických kabelů jako světlovodů v osvětlovací technice. Později byla zvládnuta i technologie výroby a užití celoplastových transparentních optických kabelů, které našly uplatnění v elektronice i v osvětlovací technice.

Osvětlovací systém/soustava s rozvodem umělého světla optickými vlákny se skládá se světelného zdroje, kterým je například halogenová žárovka nebo halogenidová výbojka s parabolickým reflektorem jako koncentrátorem světla. Světlo je soustředěno na tzv. optický port, což je kovové prstencové zakončení opracovaného leštěného a zataveného svazku světlovodných vláken, do

³⁷ obdobné využití mají ocel v drátkobetonech a plastová polypropylenová vlákna rovněž rozptýlená přimícháním do betonů

kterého vstupuje světlo z umělého zdroje. Celoskleněná světlovaná vlákna jsou vedena kvůli křehkosti a ochraně ve svazcích, celoplastová vlákna mohou být vedena samostatně.

Světlo z vláken vystupuje opět z příčného řezu cílovým optickým portem, nebo v případě celoplastových vláken světlo může vystupovat z pláště svazku tzv. „stranovým zářením“. Pokud je požadavek na výstupní kužel světla širší než 60° , musí být výstupní optický port opatřen rozptylnou optickou tvarovkou. Celoskleněná vlákna pro osvětlovací systémy byla vyrobena již v roce 1978, od roku 2000 je užívají vlákna ze syntetického oxidu křemičitého (SiO_2) nebo olovnato-křemičitá skla. Celoplastová vlákna dosahují menšího útlumu a lepších optických parametrů než vlákna skleněná.

Následující přehled uvádí výhody nebo vhodné nasazení osvětlovacích soustav s rozvodem umělého světla optickými vlákny:

- bezpečnost provozu pro aplikace ve vlhkém nebo výbušném prostředí. Světlovody nepřenášejí elektrickou energii a zdroj světla a tedy i tepla může být situován mimo nebezpečné prostředí.
- vhodné pro muzejní nebo galerijní dlouhodobé osvětlení, kde není žádoucí expozice osvětlených předmětů UV nebo IR zářením.
- vhodné pro citlivé medicínské nástroje, světlovod na sebe „nechytá“ elektromagnetické interference nebo indukce od silové elektřiny a tedy nešíří šum ani není rušen.
- životnost skleněných vláken delší než 30 let. (Celoplastová vlákna mají životnost do 20-ti let).
- odolnost a chemická netečnost, vhodné i pro aplikace v chemicky agresivním prostředí do teploty až 200°C . (Celoplastová vlákna odolají krátkodobě maximálně do 80°C).
- tvarová a prostorová flexibilita pro stísněné prostory k osvětlení. Ve vláknech je vedeno světlo ve vysokém světelném toku, čímž optický svazek vláken nahradí prostorově náročný světelný tubus.
- při instalaci je nutné dodržet minimální výrobcem doporučené zakřivení oblouku svazku vláken.
- minimální údržba světlovodů, možnost soustředit zdroj světla do jednoho zařízení.

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL**7. DEFINICE PROBLEMATIKY - MATERIÁLOVÝ VÝZKUM A POHLED DO BUDOUCNOSTI****7.1. KOVOVÉ SKLO**

Při porovnání se známými a běžnými krystalickými kovy je kovové sklo stále málo probádaným materiálem s neznámými a odlišnými vlastnosti. Krystalický kov má atomy uspořádány do pravidelné struktury mřížky, která ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti.

7.1.1. Struktura

Kovové sklo naopak nemá atomy uspořádány do žádné mřížky. Roztavený kov je rychle ochlazen a jeho atomy se nestihnou přeskupit do určité pravidelné struktury krystalické mřížky. Zde je patrná velká podobnost s popisem struktury u „pravého“ skla jako podchlazené tekutiny, homogenního amorfního tuhého materiálu. I zde ale platí, stejně jako u „pravého“ skla, že v tomto amorfním materiálu přesto existuje určité pravidelné uspořádání atomů na krátkou vzdálenost. Atomy v struktuře kovového skla jsou uspořádány do shluků po sedmi až patnácti atomech okolo centrálního atomu a tyto shluky jsou navzájem spojeny s dalšími sousedními shluky atomů. Při mechanické deformaci vznikají v kovovém skle oblasti materiálu s nižší hustotou atomů, což je důležité pro mechanismus plastické deformace.

7.1.2. Experimentální výroba

V roce 2004 se podařilo připravit a vyrobit těleso z kovového skla o rozměrech několika centimetrů. Dosažitelnost a optimalizace rychlého ochlazení se řeší vhodnými přísadami k základnímu kovu (železo, hliník, ytrium). Užívá se i malých množství dalších přísad (bor, uhlík, chrom, kobalt, molybden, mangan).

Experimentální výroba kovového skla na bázi oxidu hlinitého se dosahuje prudkým ochlazením taveniny rychlostí 1000 K za sekundu (jiné prameny uvádějí 1.000.000 K/min). Tavenina obsahuje rovněž přísady oxidu lanthanitého, gadolinitého, erbitého, yttritného, neodymitého nebo europitého. Potřebný materiál se získal foukáním taveniny z kyslíko-vodíkového plamene přímo do vody.

Výroba kovového skla na bázi zirkonia probíhá obdobnou technologií, kterou se vyrábějí průmyslové umělé diamanty. Princip výroby tohoto kovového skla, tj. princip vzniku jeho amorfní struktury, spočívá v zabránění krystalizace taveniny vhodným chemickým složením slitiny, která se upravuje za zvýšené teploty nepřevyšující její bod tání.

7.1.3. Vlastnosti

- Kovové sklo je například přibližně třikrát pevnější než běžné konstrukční kovy.
- Amorfní slitina hliníku je dvakrát pevnější než vysoko-pevnostní titanová slitina.
- Železné sklo není magnetické, v určitých případech je dokonale průhledné.
- Kulička z kovového skla skáče po pevném podkladu třikrát déle než kulička z jiných materiálů. Elastické deformace se odehrávají s minimálními energetickými ztrátami.
- Mechanizmy deformace jsou zatím neznámé.
- Materiál je křehký a při ohřevu se stává stejně tvárným jako běžné křemičité sklo.
- Kovové sklo oxidu hlinitého se vyznačuje velmi vysokým indexem lomu.

7.2. FOSFOREČNANOVÉ, CHALKOGENIDOVÉ A HALOGENIDOVÉ SKLO

Substitucí oxidu křemičitého oxidem fosforečným v amorfní struktuře vznikne materiál se zajímavými medicínskými aplikacemi. Fosforečnanové sklo, systém $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaF}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$, má menší pevnost než sklo křemičité. Chemickým složením není ale fosforečnanové sklo inertní jako sklo křemičité, a proto je tento materiál reaktivní například pro biochemické procesy v lidském těle. Umělé struktury z fosforečnanového skla mohou tvořit podpůrné skelety pro obnovu a léčení tkání (svaly, klouby, zuby).

Fosforečnanové sklo lze vyrobit tavením nebo s porézní strukturou za „studena“ z koloidní suspenze sol-gelů. Fosforečnanové sklo lze vyrábět i ve formě vápenato-fosfátové-sklokeramiky.

Naopak pro náhradu oční čočky v lidském oku se používá speciální sklo nedráždicí imunitní systém člověka, a to v systému $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-La}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3\text{-CaO-SrO-MnO-BaO-Na}_2\text{O-CuO-Fe}_2\text{O}_3$.

Chalkogenidová skla obsahují chalkogeny (S, Se, Te) a jejich sloučeniny (As_2S_3 , As_2Se_3 , SiSe_2 , GeSe_2 , MoS_3). Jejich speciálními vlastnostmi je citlivost na infračervené záření, které způsobuje změny v povrchové vodivosti takového materiálu.

Halogenidová skla obsahují halogeny (fluoridové, chloridové, bromidové, jodidové).

Například v optickém systému nočního vidění a v optických kabelech se užívají skla v systému $\text{Zr}_{55}\text{Ba}_{35}\text{La}_6\text{Al}_4$ a $\text{Zr}_{55}\text{Ba}_{18}\text{La}_6\text{Al}_4\text{Na}_{17}$. Fluoritová skla jsou nízkotavitelná.

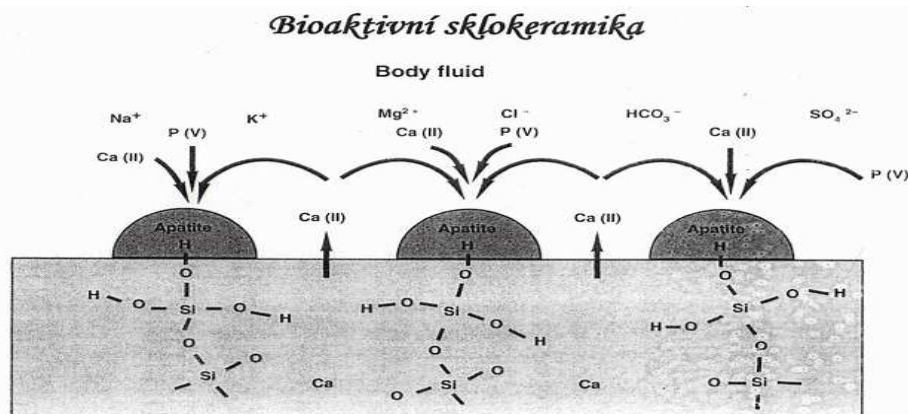


Figure 2-28 Schematic representation of the mechanism of apatite formation on the surface of CaO-SiO_2 -based glass-ceramics in the human body (Kokubo 1993).

Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT v Praze

7.3. KŘEMENNÁ VATA A VÝROBA ZE SOL-GELŮ

Obdobným způsobem za „studena“ lze vyrobit porézní až vláknovou strukturu oxidu křemičitého. Materiál vzniká kyselou hydrolyzou organo-křemičitého sol-gelu, který obsahuje částice hydratovaného oxidu křemičitého.

Organo-křemičitá látka (např. tetraethoxid křemičitý) se jako zdroj SiO_2 rozpustí v nepolárním rozpouštědlu, do kterého se potom přidá určité množství polárního rozpouštědla (voda a vodné roztoky, roztoky kyselin aj.). Vzniklý viskózní koloidní roztok se vyznačuje vysokým stupněm promísení až na úrovni molekul. Z koloidního gelu lze tažením připravovat vlákna nebo tenké vrstvy a povlaky, které na vzduchu odpařením molekul vody rychle vytvoří následně pevný gel, který se následným tepelným vysušením změní v porézní až vláknovou strukturu s velmi nízkou objemovou hmotností až 3 mg/cm^3 .

Výrobou za „studena“ se popisována skutečnost, že následným tepelným vysušením pevného gelu za teplot do $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ ($600\ ^\circ\text{C} - 700\ ^\circ\text{C}$), kvůli odstranění zbytků organických rozpouštědel, je dosahováno materiálů s vlastnostmi skla, které by se jinak musely vyrábět z tavenin za teplot nad $1\ 000\ ^\circ\text{C}$. Technologickým problémem výroby ze sol-gelu je dosahování tlustostěnných výrobků.

Kromě čistě křemičitých sklovin lze takto vyrábět i skloviny s příměsí oxidů kovů (oxid hlinitý - Al_2O_3 , oxid zirkoničitý - ZrO_2 , oxid titaničitý - TiO_2).

7.4. NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY

V letech 1998 až 2000 proběhly v České republice unikátní restaurátorské práce na záchraně a obnově mozaiky Posledního soudu z královské Zlaté brány, jižního vstupu do katedrály Sv. Víta na Pražské Hradě⁽³⁸⁾. Postup restaurátorských prací byl navržen, financován a veden za mezinárodní spolupráce kalifornského Getty Conservation Institute z Los Angeles (USA).

Mimo jiné zde neuvedené restaurátorské postupy byly jednotlivé kostičky očištěny a jemně otryskány rozemletým prachem z měkčího skla, než bylo samotné sklo mozaiky. Tím bylo možné povrch zbavit nečistot aniž by tryskání narušilo povrch skleněné mozaiky. Následně byl povrch kostiček opatřen konzervační vrstvou z „umělého skla“⁽³⁹⁾.

Právě tento nanotechnologický polymer-materiál „umělého skla“ kombinuje ve své molekulové struktuře řetězce organických uhlovodíků s anorganickými úseky silikonů ($-\text{Si}-\text{Si}-$) a oxidu křemičitého ($-\text{SiO}-$). Polymery obsahují rovněž molekuly oxidů kovů (Ti, Al, Zr, aj.).

³⁸ Historicky ojedinělé a téměř zachovalé umělecké dílo pochází z let 1370–1371, kdy bylo na podnět Karla IV. zhotoveno dnes neznámými italskými umělci. Mozaika se skládá z více jak jednoho milionu kusů skleněných kostiček a kamínků ve více než třiceti barevných odstínech.

³⁹ Lumiflon - příbuzný složením Teflonu a Ormocer - Organically Modified Ceramic

Na základě vhodné kombinace výše uvedených komponent lze vyrobit materiál s předem požadovanými vlastnostmi, jako jsou:

- zpracovatelnost
- houževnatost
- možnost vytvrzení teplem
- tvrdost povrchu, otěruvzdornost a odolnost proti průrazu
- optické vlastnosti, barevnost, index lomu, transparentnost
- stálost za tepla
- pružnost
- adhezivní vlastnosti, hydrofobní vlastnosti, aj.

Aplikování takového materiálu v podobě povlaku, potisku, sítotisku, nátěru nebo nástřiku na povrch skla nebo i na povrch jiných materiálů (plasty, transparentní plasty, textil, dřevo aj.) nabízí zajímavé možnosti využití takto ošetřeného výrobku (například tzv.: smart glass). Povrchy z nanotechnologických materiálů mohou dle chemického složení vykazovat například:

- fotochemickou aktivitu se samočisticím efektem
- fotoelektrickou aktivitu a zastávat tak funkci fotovoltaického článku
- schopnost objemové expanze povrchové vrstvy za působení vysokých teplot. To se v případě transparentních pevných nebo vodu obsahujících gelových nanokompozitů nabízí využití jako požárního ochranného nátěru skla.
- změnu barevnosti vlivem vnějšího působení. Lze takto vyrobit elektrochromí skla a zpětná zrcátka pro automobilový průmysl, kde prostřednictvím vnějšího elektrického pole lze ovládat intenzitu zbarvení a zatemnění nanopovrchu.
- selektivní transparentnost a odrazivost, tj. skla s nanopovrchem jsou propustná pro viditelné spektrum světla, ale jsou odrazivá a tedy nepropustná pro infračervené záření.
- elektrickou vodivost, což lze s výhodou využít u samorozmrazovacích skel
- elektroluminiscenci

Výše uvedené vlastnosti lze výhodně kombinovat i ve vícevrstevném povrchu, čímž lze například dosáhnout toho, že plastový transparentní výrobek bude mít stejné užité vlastnosti jako skleněný výrobek (nádobí, autoskla, stavební skla) a bude zároveň lehčí a tvarovatelnější s většími možnostmi pro design.

Nanokompozitní povlaky dosahují tloušťky řádově do 100 nm. Kromě výše uvedených technik můžou být nanovrstvy také aplikovány:

- studeným plazmatem za teplot do 50 °C,
- horkým plazmatem za teplot do 5 000 – 10 000 °C,
- laserovou ablací (mikroleptáním), kdy laserové pulsy rozštěpují povrchové chemické vazby nebo spékají povrchové struktury,
- expozicí UV zářením, rentgenovým a gama zářením, kdy dochází k povrchové fotooxidaci nebo excitaci reaktantů na upravovaném povrchu,
- vakuovou expozicí elektronovým svazkem nebo svazkem iontů, kdy dochází přímo k chemické modifikaci povrchu nebo k jeho tepelnému opracování,
- vakuovým pokovováním,
- elektrostatickým naprašováním.

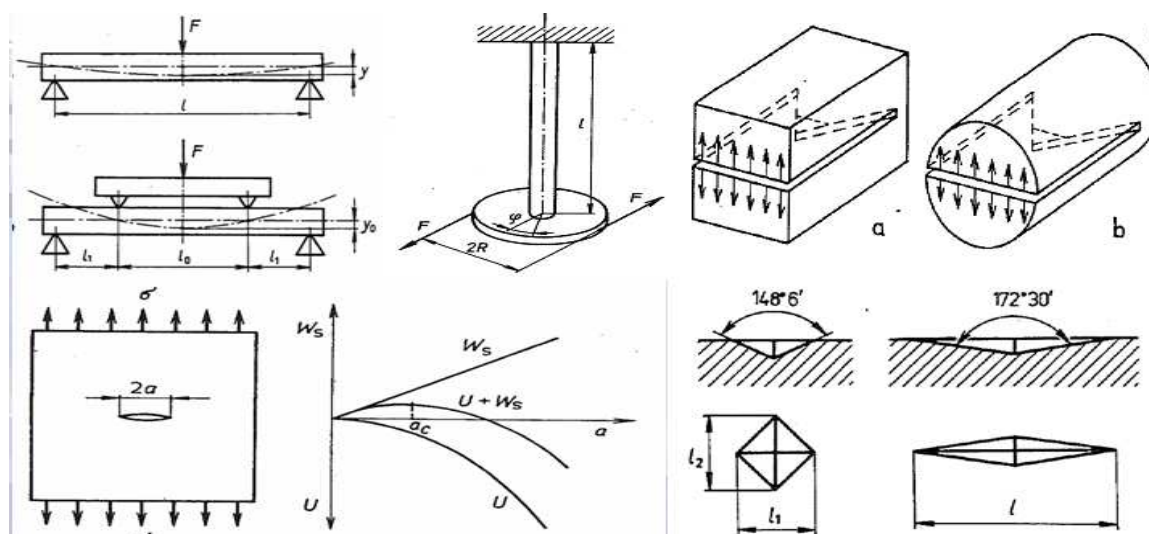
SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

8. DEFINICE PROBLEMATIKY - PODROBNÁ MECHANIKA SKLA

Tato část navazuje na popis fyzikálně chemických vlastností skla (viz. předchozí kapitola: **MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA SKLA**) s detailnějším rozбором materiálového chování sklovin při mechanickém namáhání. S ohledem na specifické vlastnosti materiálu, zejména jeho křehkost, je nutné u skla předem opustit obvyklý model chování z hlediska pružnosti a pevnosti, jako je to možné u houževnatých konstrukčních materiálu, jako je ocel, dřevo event. železobeton.

K materiálovému popisu chování křehkého skla a jemu příbuzné keramiky slouží nástroje a modely oboru lomové mechaniky. Na rozdíl od oboru klasické pružnosti a pevnosti lomová mechanika zahrnuje do chování modelu materiálu i jeho lokální defekty a materiálově strukturní anomálie, které ve výsledku i v reálu snižují například celkovou **pevnost, spolehlivost, životnost a provozní bezpečnost** takového výrobku.

Nedílnou součástí popisu materiálu z hlediska lomové mechaniky jsou i výstupy z laboratorních zkoušek na reálných vzorcích a zkoušek na hotových výrobcích.



Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT v Praze

8.1. PEVNOST SKLA

Pevnost skleněného výrobku je funkcí:

- teploty oblasti,
- času a velikosti zatížení, event. zatěžovacích cyklů,
- geometrie výrobku,
- druhu prostředí.

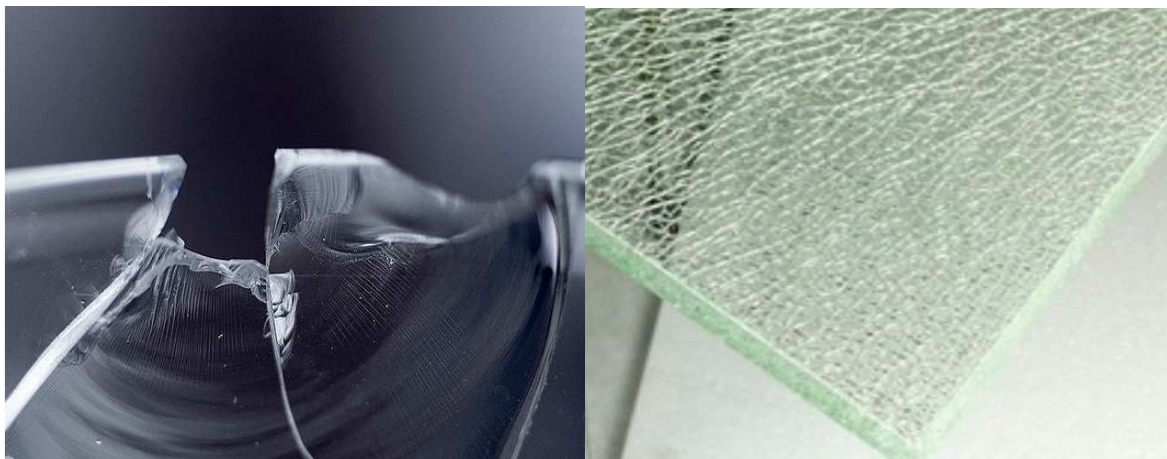
8.1.1. Deformace

Jak již bylo uvedeno, celková pevnost skla je ovlivněna jeho křehkostí, která je způsobena nepříznivou kombinací vysoké hodnoty modulu pružnosti E a malé pevnosti v tahu. Obecně platí, že poddajné materiály reagují na zatížení deformací a tuhé materiály reagují nárůstem vnitřního napětí. Již malé lokální deformace u skla vyvolají vysoké hodnoty vnitřního pnutí, které se blíží nebo překračují pevnost v tahu. Právě kolem:

- lokálních defektů,
- povrchových vrypů, rýh, zejména čerstvých trhlin,
- vnitřních puklin, prasklin,
- bublinek,
- materiálově strukturních anomálií,
- neroztavených krystalových zrn,
- neřízeně nahodile rekrytalizovaných zrn,
- nehomogenit ve sklovině (atd.)

dochází k výraznému nárůstu lokálních vnitřních napětí nad mezí pevnosti a tedy k poruše skla - **lomu**. K výraznému nárůstu lokálních vnitřních napětí kolem materiálových defektů dochází právě

kvůli křehkosti skla, která nedovoluje v potřebné míře relaxaci vnitřních sil elastickými nebo plastickými deformacemi ve sklovině.



8.1.2. Modul pružnosti

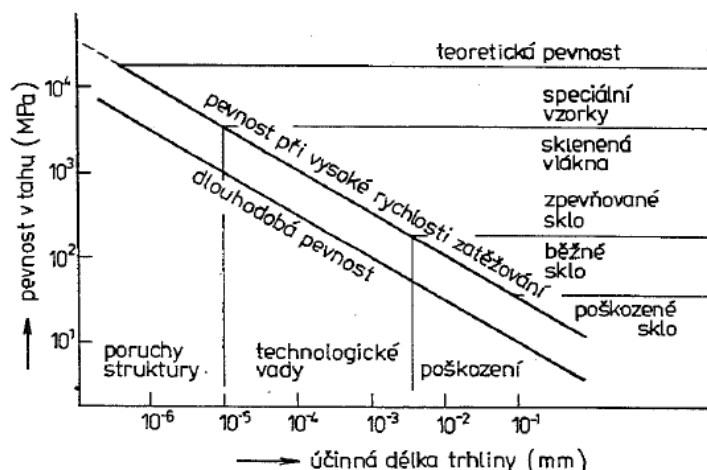
Modul pružnosti v tahu E a mez pevnosti v tahu roste s počtem vazeb sítě $(X)\text{-Si-O-Si-(X)}$. Alkalické oxidy a jiné modifikátory způsobují zeslabení této sítě, se kterou klesá i modul pružnosti E . Jinými chemickými úpravami lze modul pružnosti E rovněž zvyšovat.

Moduly pružnosti v tahu E a ve smyku G mírně klesají v závislosti na rostoucí teplotě, s výjimkou křemenného skla, kdy s rostoucí teplotou hodnoty E a G rovněž mírně rostou. U křemenného skla rovněž roste hodnota E s rostoucím vnějším zatížením, což lze vysvětlit vznikem dalších zesilujících vazeb $(X)\text{-Si-O-Si-(X)}$ při vzájemném se přiblížení atomů ve sklovině, které je vyvolané deformacemi od vnějších sil.

8.1.3. Pravděpodobnost porušení

Pevnost v tlaku skla je 10 – 15ti násobek jeho pevnosti v tahu. Proto porucha překročením meze pevnosti v tahu je více pravděpodobnější, nejčastěji lomem z povrchového vrypu. Vlivem nahodilých lokálních defektů je rozptyl hodnot v pevnosti skla u stejného sériového výrobku v rozmezí 10 – 30% (i více).

Pevnost a tedy i životnost a spolehlivost klesají s rostoucím výskytem poškození výrobku. Proto pevnost klesá i s rostoucím objemem výrobku, protože s rostoucím objemem roste i počet a pravděpodobnost výskytu nežádoucích anomálií.



Obr. 16. Vliv rozměru vad na pevnost skla v tahu (podle [93])

Zdroj: Pevnost a lom skla a keramiky, Jaroslav Menčík, Nakladatelství techn. lit., 1990

Protože porucha nastává při zatížení, klesá pevnost výrobku i s rostoucí plochou působícího vnějšího zatížení nebo s rostoucím počtem vnějších působících lokálních sil. Protože tímto roste opět pravděpodobnost příležitosti poruchy skla vlivem vnějšího působení sil na vnitřní anomálie.

Obdobně při narůstajících rozměrech výrobku roste pravděpodobnost výskytu vad a větších vad, čímž rovněž průměrná pevnost klesá. Jestliže pravděpodobnost poruchy tělesa o objemu V_1 (m^3) zatíženého rovnoměrným napětím σ je rovno P_1 , potom pravděpodobnost lomu stejně zatíženého tělesa o objemu V_2 (m^3) je rovna P_2 , pro které platí:

$$P_2 = 1 - ((1-P_1)^{V_2/V_1})$$

Pravděpodobnostní pohled na výskyt poruchy nahrává používání skla v podobě skleněné rozptýlené výztuže do železobetonových konstrukcí. Rozměry vláken jsou malé s malým povrchem.

8.1.4. Závislost na zatížení v čase

Je-li zatížení konstantní, lom může trvat sekundu i rok. Čas probíhajícího lomu v materiálu nebo ve výrobku roste s klesajícím zatížením, než dojde k úplné destrukci. Při rychlém nárůstu zatížení v krátkém čase se dosáhne v materiálu jeho určité meze únosnosti, která navíc již neroste při dále se zkracující době působení stále více rostoucího vnějšího zatížení (tj. rázu trvajících pod 3 -10 sekund). U skla je mez únavy v rozmezí 20 – 30 % pevnosti krátkodobé rázové.

Existuje rovněž i taková úroveň zatížení, při které může působit toto zatížení neomezeně dlouhou dobu, aniž by došlo k únavě materiálu a k následnému lomu. Tedy klesá-li zatížení, klesá a zpomaluje se tvorba trhlinek a od určitého zatížení už trhlinky nově nerostou a stávající se více nerozevírají.

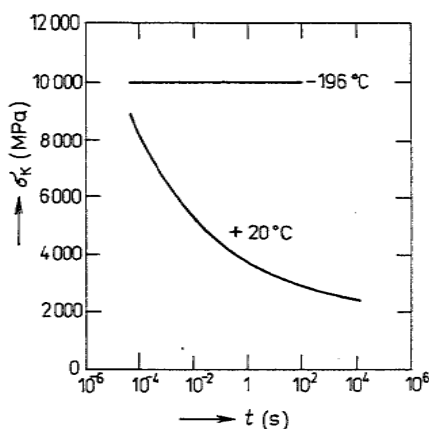
Mechanismus porušení skla únavou materiálu při konstantním zatížení, při časově rozdílném zatížení nebo při cyklickém zatížení je stejný. Porucha nastane při nevratném rozvoji, postupném otevírání se a zvětšování trhlinek. Rychlost rozvoje trhlinek je rovněž závislá na teplotě a vnějším chemickém působení.

8.1.5. Závislost na vnějším prostředí

Pevnost v tahu skleněného výrobku tedy může dosahovat:

- 20 - 100 MPa pro běžnou sériovou produkci tohoto výrobku při běžné životnosti.
- 100 - 300 MPa v okamžiku zhotovení výrobku, kdy je ve hmotě obsaženo nejméně anomálií a vad. Hodnoty pevnosti potom klesnou na výše uvedených 20 - 100 MPa.
- 300 - 500 MPa trvale po speciální tepelné ochraně zpevňováním.
- 3 500 MPa pro vlákna o průměru několika mikrometrů i v běžné výrobě, která jsou ze stejné skloviny jako referenční výrobek.
- 3 500 MPa až výjimečně 14 000 - 16 000 MPa (experimentálně) pro běžné ploché sklo nebo tyčinky (ze stejné referenční skloviny) po leptání v kyselině fluorovodíkové, kdy se naleptáním odstraní povrchová vrstvička se zárodky vrypů, škrábanců a jiných potenciálních poruch. Pevnost takto ošetřeného výrobku potom klesá při kontaktu s jinými předměty.

Pevnost skla významně roste při klesající teplotě. Mez únosnosti v lomu skla ponořeného do kapalného dusíku (N_2) za teplot -196 °C nebyla vůbec experimentálně naměřena. Pevnost v lomu je minimální na vzduchu za teplot $100 - 200$ °C.



Obr. 7. Závislost meze kluzu σ_k sodnokřemičitého skla na době zatížení t a teplotě (podle [50])

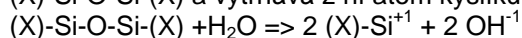
Zdroj: Pevnost a lom skla a keramiky, Jaroslav Menčík, Nakladatelství techn. lit., 1990

Chemická koroze na klidném vzorku bez zatížení způsobí zaoblení trhlinek a relaxaci vnitřního napětí. Tím ve výsledku dojde ke zpevnění vzorku.

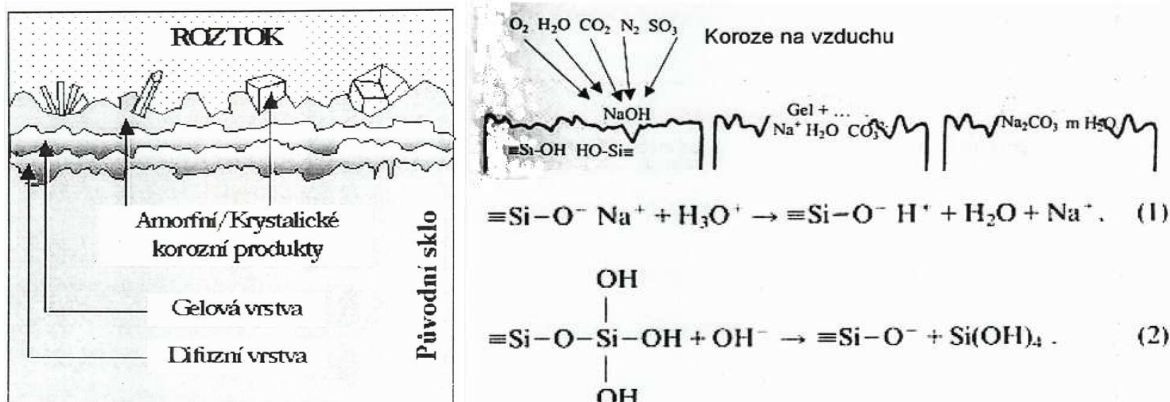
8.1.6. Působení vody

Například voda v jakémkoliv skupenství (vzdušná vlhkost nebo kapalina) únavu materiálu podporuje a zesiluje. I ve vakuu se u skla uplatňuje negativně zbytková vázaná vlhkost v jeho hmotě a povrchu. Voda podporuje chemickou korozi skla v napjatých trhlinkách tím, že rozrušuje napjaté vazby sítě

(X)-Si-O-Si-(X) a vytrhává z ní atom kyslíku v hydrolytickém rozkladu:



Vedlejší silikátové produkty z této koroze usazené na povrchu skla rovněž podporují a zesilují celkovou chemickou degeneraci skla, která se může projevit v matování povrchu nebo v jeho nevratné zakalení „oslepnutí“.



Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT v Praze

Proto výsledná pevnost výrobku (měřena za pokojové teploty) je 20% vyšší než pevnost výrobku umístěného na vlhkém vzduchu a nebo ve vodě. Samotné chemické složení skloviny má zanedbatelný vliv na nepříznivé působení vody.

Koroze vody roste na intenzitě v teplotách 150 – 200 °C. S vyšší teplotou koroze vody ztrácí na významu, protože se z povrchu skla vytrácí.

Rovněž s teplotou pod -100 °C koroze vody na únavu materiálu ztrácí na významu, protože pod touto teplotou ustávají reakce.

Dále nemá vliv voda působící kratší dobu (měřeno za pokojové teploty), než je 3 -10 sekund, protože chemická korozivní reakce pod tuto dobu neproběhne.

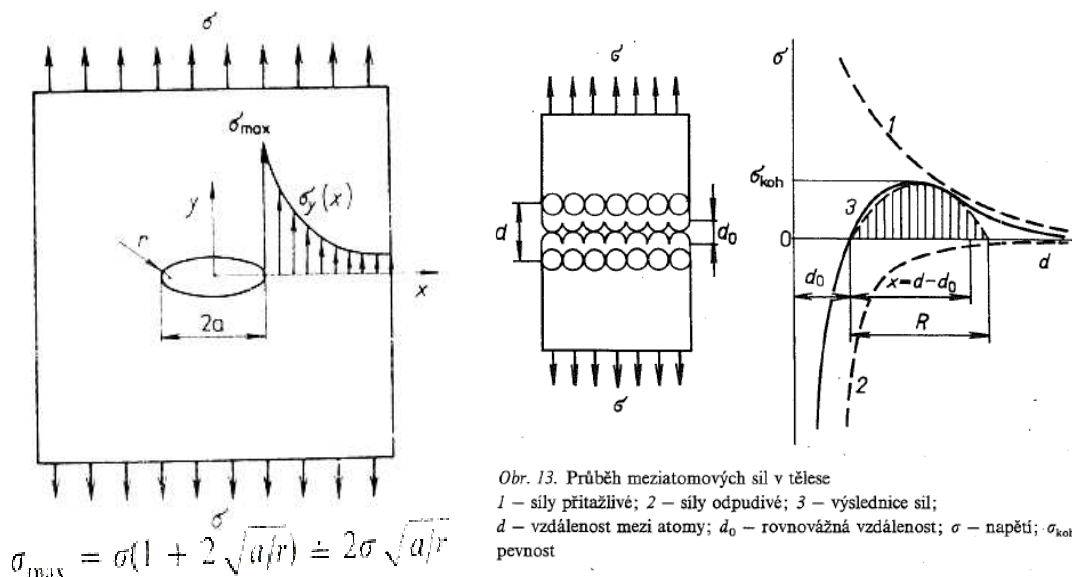
K eliminaci chemické koroze působením vody se při skladování tabulového skla prokládají jednotlivé desky papírovou vložkou, která umožní výpar event.kondenzované vody.

8.2. CITLIVOST SKLA

8.2.1. Koncentrované napětí

Konstrukčně je sklo citlivé na namáhání od **koncentrovaného napětí**. Proto bodové uchycení skla je nutno řešit lokálním pružným kontaktem nebo pružně plastickým kontaktem. Celková citlivost skleněného výrobku je rovněž závislá na výsledném tvaru a geometrii.

Trhlinka ve skle může vznikat rozdílnými mechanismy (např. až po odlehčení a po plastické deformaci). Rovněž podle tvaru původní trhlinky a směru zatížení se šíří trhlinka nová (trajektorie lomu). Porucha skla od koncentrovaného napětí nastane řádově do 10-ti sekund jeho působení.



Zdroj: Pevnost a lom skla a keramiky, Jaroslav Menčík, Nakladatelství techn. lit., 1990

8.2.2. Mechanický ráz

Konstrukčně je sklo dále citlivé na namáhání od **mechanických rázů**. Kvůli malé možnosti relaxace napětí a jeho transformace do elastických a plastických deformací se všechna energie rázu mění na vnitřní napjatost. Kvůli nízké energetické náročnosti na rozvoj lomu, kvůli menší pevnosti v tahu je vysoká pravděpodobnost, že těleso bude zničeno. K plastickým deformacím a vývinu tepla s následným měknutím materiálu dochází pouze lokálně v místě rázu. Opět celková citlivost skleněného výrobku je rovněž závislá na výsledném tvaru a geometrii.

Rázem se rozumí silový impuls s délkou působení 2 - 5, max. 10 sekund. Rázová pevnost skla je 1,2 – 2,0 násobek pevnosti skla s pomalu rostoucím zatížením. Jak bylo uvedeno dříve, rázová pevnost skla neroste pro rázy kratší 3 -10 sekund.

8.2.3. Teplotní pole

Konstrukčně je sklo citlivé i na namáhání od nehomogenního **teplotního pole**. I zde se negativně uplatňuje křehkost skla navíc s jeho špatnou teplotní vodivostí, která způsobuje špatnou distribuci tepla v materiálu a vyrovnání nastalých teplotních rozdílů.

Z hlediska mechanizmu šíření trhlin je **ochlazování** skla a následně povrchové smršťování více vhodné pro rozevirání povrchových vrypů a tedy nebezpečné pro rozvoj lomu. Vrypy jsou rozevirány vnitřními tahovými silami, které nastanou ve smrštěném ochlazeném povrchu.

Při modelování teplotního namáhání je nutno zahrnout do výpočtu součinitel prostupu tepla, měrnou tepelnou kapacitu (a tedy naakumulované teplo), tvar tělesa a prostředí. Některé materiály snesou rozdíly teplot při vysokých nebo nízkých teplotách okolního prostředí.

8.2.4. Teplotní roztažnost

Závislost součinitele délkové teplotní roztažnosti skla (tj. relativního prodloužení) na teplotě popisuje tzv. *dilatometrická křivka* (z pravidla v rozmezí teplot 20 – 300 °C). Dilatometrická křivka se liší pro sklo obyčejné a sklo tvrzené, i když jsou oba materiály stejného chemického složení. Proto má na konečnou roztažnost skleněného výrobku vliv i **tepelná minulost** při zpracování skloviny.

Většina materiálů, zejména krystalických, má kladný součinitel délkové teplotní roztažnosti s rostoucí teplotou, tj. s rostoucí teplotou se zvětšují i rozměry tělesa. Výjimku tvoří křemenné sklo, u kterého lze zaznamenat smrštění s narůstající teplotou. Platí, že alkalické oxidy zvyšují roztažnost skla, oxid křemičitý naopak roztažnost skla snižuje.

Pro tlustostěnné výrobky je nebezpečný rozdíl teplot ve sklovině kolem 30 °C, tenkostěnné výrobky mají tuto hranici vyšší kolem 40 °C.

8.3. LINEÁRNÍ LOMOVÁ MECHANIKA PRUŽNÉHO TĚLESA

8.3.1. Šíření trhlin

Vnitřní napětí a deformace v pružném tělese se šíří konečnou charakteristickou rychlostí, která je rovna rychlosti šíření zvuku v daném materiálu tělesa. Zvuk se v tělese rovněž šíří jako elastická deformační na napěťová vlna. Například maximální lomová rychlost charakteristická:

- pro sodnovápenatokřemičité sklo je $1\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tj. $5\,400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.
- pro křemenné sklo je $2\,200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tj. $7\,920\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Pokud například projektil prostřelí sklo vyšší rychlostí než je rychlost šíření zvuku v tomto skle, potom se ve skle kolem průstřelu nevytvoří charakteristický „pavouk“ prasklin ale tzv. **kuželový lom**. Prostřelená deska (nebo těleso) se tedy vlivem setrvačnosti vlastní hmoty „v klidu“ nestačí pod rychlým zatížením stěly prohnout a event. prasknout ohybem.

Těleso při šíření své trhliny uvolňuje z vnitřní napjatosti materiálu naakumulovanou potenciální energii. Uvolněná energie se spotřebuje na vytvoření většího povrchu stávající trhliny a nadbytek uvolněné energie se spotřebuje na nové další šíření trhliny. Šíření trhliny pokračuje prací z plastických deformací, které uvolňují další povrchovou energii a uvádějí materiál a jeho hmotu do hmotnostního zrychlení. Nastane tedy případ řetězové reakce, kdy šíření trhliny pokračuje samovolně i bez dalšího zvyšování vnějšího zatížení. Pokud se šířením trhliny neuvolní dostatek energie, potom dojde k zastavení lomu a zvětšování trhliny, ale celková pevnost prvku je oslabena.

Veličiny a parametry popisující rozvoj lomu (např.: lomová houževnatost skla) se určují experimentálně s ohledem na různé kombinace zatěžovacích stavů, orientaci event. původních trhlin, působícího zatížení a způsobu rozevirání trhlin. U skla (i keramiky) je vyzorovaná tendence natáčení šířící se trhliny do směru kolmého k maximálnímu tahovému napětí, protože sklo je v tahu nejslabší a v tahu se poruší nejdříve.

Lomová houževnatost - $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$	
skla	0,5-1,0
sodnovápenatokřemičité skla	0,75
legované chromniklové oceli	75

Při šíření trhliny přes překážky (nehomogenity, rozhraní různých fází sklovin, póry, vměstky, nečistoty, krystalická zrna) nemá lom následně hladký povrch a plocha lomu je větší, čímž spotřebovává více uvolněné energie. Pokud trhlina při svém rozvoji kříží jinou trhlinu, představuje to pro ní rovněž překážku. Pokud je ale uvolněné energie dostatek, vede lom přímo i těmito překážkami a zatavená zrna jsou trhlinou rozlomena. Proto sklokeramika se svými řízeně vykrystalizovanými zrny s velikostí 1 – 2 μm je až 2x pevnější než sklo o stejné lomové houževnatosti.

Další zvyšování lomové houževnatosti lze dosáhnout u kompozitních materiálů. Jejich principem k zvýšení houževnatosti obsaženého křehkého materiálu představuje přemostění event. trhliny dlouhými pevnými vlákny. V důsledku výrazně vyšší pevnosti vláken a modulu pružnosti vláken (v porovnání s křehkou maticí) se zatížení přenesou z matrice na tato vlákna, která zbrzdí rozevření i další šíření trhliny. K lomu vláken se zvyšujícím se napětím nakonec dojde, ale za vyšších hodnot zatížení. Další energie se spotřebuje při vytahování vláken z matrice. U kompozitů tvořených skelnou maticí a dlouhými vlákny SiC o průměru okolo 10 μm se zvýší houževnatost více než 40x. Takový materiál má ještě vyšší houževnatost než nástrojové a ložiskové oceli.

8.3.2. Destruktivní zkoušky pevnosti

Zkoušky pevnosti představují zdroj informací o chování skla při zatížení s ohledem na konkrétní výrobní postup a chemické složení sklovin. Zkoušky pevnosti se provádějí:

- na hotových výrobcích,
- při výrobcích složitějšího tvaru a finančně nákladných zkoušek se používají zkušební tělesa podobného tvaru,
- na předepsaných zkušebních vzorcích s daným tvarem a rozměrem.

Cílem zkoušek je rovněž experimentální stanovení:

- konkrétních slabých konstrukčních míst,
- vad z výroby a defektů z výroby, vč. jejich rozložení a velikosti,
- parametrů užívaných v lomové mechanice, tj. lomové houževnatosti a s ní souvisejícího odporu materiálu proti šíření trhliny,
- odolnosti materiálu vůči únavě
- odolnosti vůči napěťové korozi
- odolnosti teplotním šokům

U zkoušek je aplikováno tzv. **kondicionování**, tj. ponechání zkušebních těles delší určitý čas na stejném místě a ve stejném prostředí (teplota, vlhkost, chemie prostředí, atd.), ve kterém se bude provádět zkouška.

Rovněž je zkušebními postupy nutno eliminovat tzv. **parazitní napětí**, která by mohla vzniknout nevhodným upnutím do zkušebního stroje.

Ze zkoušek je doloženo například, že:

- mez lomové pevnosti v tahu je menší než mez lomové pevnosti v ohybu
- vzorky s kruhovým průřezem mají vyšší pevnost než vzorky s hranatým průřezem, protože hrany jsou náchylnější k poškození

Výsledky zkoušek jsou zpracovávány **matematickými metodami**, které zhodnotí působení náhodných vlivů, kolísání charakteristik, a které stanoví pravděpodobnost hodnoty a rozmezí jejího kolísání, tj. nejpravděpodobnější hodnoty s rozložením dle Gaussova a Weibullova rozdělení (distribuční funkce).

Ze souboru naměřených hodnot ze zkoušek vzorků se pro navrhování používají parametry s určitou pravděpodobností výskytu v rozmezí $1:10^{-2}$ až $1:10^{-6}$.

Stanovení pevnosti v tahu, jako podílu tahové síly potřebné k přetržení vzorku k průřezu plochy tělesa v místě lomu, se provádí hlavně u vláken ne u tenkých štíhlých těles. Používají se zkušební vzorky se ztenčenou střední částí. U masivních těles se provádí zkouška ohybem. Vzorky se před zkouškou upravují plamenem a na konce se tmelí vhodné přípravky pro upnutí. Postup je výhodný s ohledem na fakt, že lom u defektu začíná nejdříve, a proto lze získat dobrý obraz o rozložení defektů. Nevýhodou postupu je citlivost právě na parazitní napětí, smyk a ohyb od mimostředního a nebo šikmého upnutí do zkušebního stroje.

Stanovením pevnosti ves smyku ($\tau = M_k/W_k$) se zjišťuje maximální smykové napětí působící v okamžiku lomu ve vzorku zatíženém čistým smykem. Zkouška se provádí krutem od kroutícího momentu na tyčinkách nebo trubicích kruhového průřezu. Používají se zkušební vzorky se ztenčenou střední částí.

M_k = kroutící moment v okamžiku lomu

W_k = modul průřezu v krutu = $\pi \cdot D^{3/16}$ nebo

$W_k = \pi \cdot (D^4 - d^4)/(16 \cdot D)$, kde D = vnější průměr a d = vnitřní průměr

Maximální smykové napětí τ je nerovnoměrně rozloženo po celém průřezu, kolem osy je rovno 0, po obvodě je maximální.

τ (v místě kritické vady, tj. v ohnisku lomu) = $M_k/J_k \cdot r$, kde

J_k = moment setrvačnosti průřezu v krutu a r = vzdálenost ohniska lomu od osy.

Při zkoušce pevnosti ve smyku je nutno kontrolovat:

- symetrii zatížení,
- eliminaci tíhy zkušebního stroje,
- eliminaci špiček napětí,
- tmelení vzorku do kovových objímek nebo na metalické patky.

Pro **víceosou napjatost** z teorie pružnosti a pevnosti vyplývá z Mohrovy kružnice u tělesa porušeného čistým smykem, že v řezech pootočených ke smykovému napětí o 45° působí napětí tahové o téže velikosti, tj. k porušení dojde dříve tahem v šikmé lomové ploše. Proto se zkouška smykem příliš nepoužívá, smyk se zde vyskytuje spolu s tahem nebo tlakem. Proto ověřování pevnosti konkrétních výrobků nebo dílů probíhá při víceosé napjatosti. Tah, tlak a smyk působí současně ve dvou nebo třech směrech (s přibližně stejnou velikostí) a lom může vyjít z jakékoliv vady, proto průměrná pevnost vychází experimentálně nižší.

Lze rovněž provádět i finančně nákladnější zkoušky na vzorku tvaru trubice ve speciální tlakové komoře, kde je na vzorek vyvozen hydrostatický tlak tekutinou například na vnější nebo vnitřní povrch. Tyto zkoušky stanovují odolnost vůči přetlaku pro duté (nádoby, láhve, potrubí) i pro plochá tělesa (průzory, tabule).

U víceosé napjatosti se provádí tlakové zkoušky vzorků hranolů pro 2-3 osou napjatost, kde je vzorek stlačován dvojicemi nebo trojicemi zájemně kolmých párů čelistí.

U přetěžovacích zkoušek se pozoruje i vliv odlehčování po odstranění zatížení, kdy rovněž může dojít ke zvětšování trhlinek.

Inertní pevnost se stanovuje v inertním prostředí, kde je pevnost materiálu měřena bez vlivu okolního prostředí na růst nebo vznik trhlinek. Inertní prostředí může být zajištěno:

- kapalným dusíkem N_2 za teploty -196 °C nebo atmosférou ze 100% N_2 ,
- vakuem,
- silikonovým olejem (bez H_2O),
- 100% vysušeným běžným vzduchem.

Rázová pevnost se stanovuje zkouškou pevnosti v ohybu rázem od kyvadlového kladiva. Rázem dojde k velmi rychlému zatěžování vzorku, kdy trhlinky nemají čas růst. Ráz trvá $10^{-2} - 10^{-4}$ sekundy s rychlostí kladiva do $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tj. $10,8\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Vlivem interference elastických napěťových vln může dojít ke skreslení výsledku, proto je doporučena rychlost kladiva $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tj. $3,6\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Snížení rychlosti kladiva se docílí snížením jeho hmotnosti, které v důsledku prodlužuje i dobu trvání rázu.

8.3.3. Parametry lomové mechaniky

Na rozdíl od výše popsaných se pro tyto zkoušky používají vzorky s uměle vytvořenou trhlinou. Rozměry umělých trhlin jsou makroskopické nebo mikroskopické (v řádu desetin milimetrů). Vrypky jsou prováděny vyleštěným povrchovým vpichem tvrdoměru. Délka trhliny je měřena optickým nebo elektronovým mikroskopem. Výsledky zkoušek na makroskopických nebo mikroskopických trhlínách jsou srovnatelné.

8.3.4. Teplotní ráz

Zkoušky odolnosti vůči teplotnímu rázu (teplotnímu šoku, tj. náhlé změně teploty) stanovují teplotní rozdíl, který je ještě daný předmět nebo výrobek schopen vydržet bez porušení. Teplotní rozdíl se vyvolává rychlou změnou teploty, kdy dojde k rozdílným teplotám v materiálu mezi částí s původní teplotou a částí následně prudce ochlazenou nebo ohřátou.

Z tohoto důvodu rovněž platí, že tenkostěnné výrobky mají vyšší odolnost vůči teplotním rázům než tlustostěnné prvky.

Rovněž platí již jednou výše uvedené, že s ohledem na menší pevnost skla v tahu než v tlaku, je mnohem nebezpečnější prudké ochlazování povrchu skla.

Teplotní odolnost je komplexní funkcí:

- délkové teplotní roztažnosti (nejvýznamnější parametr, ovlivnitelný chemickým složením skla),
- součinitele prostupu tepla,
- tepelnou vodivostí,
- měrnou tepelnou kapacitou,
- mírou naakumulovaného tepla,
- tvaru tělesa,
- chemizmu prostředí,
- modulu pružnosti,
- lomové houževnatosti
- pevnosti
- zbytkových napětí ve výrobku

Zkušebními tělesy jsou tyčinky, destičky nebo celé výrobky. Zkoušky probíhají tak, že se celá sada (v min. počtu 10ks) zkušebních těles vystaví teplotnímu šoku, následně se vyhodnotí podíl poškozených těles a výskyt trhlinek. Tato tělesa po teplotní zkoušce se potom vystaví pevnostní zkoušce. Cyklus se následně opakuje s teplotním šokem za vyšších teplot. Počet cyklů se zvyšující se teplotou se opakuje do zničení celé sady zkušebních těles.

Lze rovněž aplikovat nové sady pro jednotlivé cykly s rozdílnými teplotami. Výsledky jsou potom nezkrácené, ale zkouška je finančně nákladnější. Výsledky jsou na závěr zpracovány statistickou matematikou.

Nejvyšší odolnost proti tepelným šokům mají křemenná a borokřemičitá skla. Ostatní skla vydrží tepelný ráz o rozdílu teplot do 40 °C.

8.3.5. Mechanický ráz

Zkoušky odolnosti vůči mechanickému rázu simulují kolize a údery na těleso, které mohou nastat během jeho životnosti v provozu. Samotné rázy se vyvolávají pádem cizího tělesa z výšky (koule, kyvadlové kladiivo, kožený pytlík naplněný broky). Například pro skleněné dveře je předepsaná zkouška simulující náraz lidského těla.

8.3.6. Nedestruktivní zkoušky pevnosti

K nedestruktivním metodám se řadí následující postupy:

Optická kontrola –

prováděná vizuálně okem nebo pod mikroskopem. Ke zviditelnění trhlin se užívají penetrační barviva nebo fluorescenční látky. Lomová plocha trhlin se obarví na základě výměny iontů na jejich povrchu. Takto získané informace vypovídají pouze o situaci na povrchu tělesa.

Ultrazvuková defektoskopie -

pracuje na principu odrazu signálu (vč. měření jeho zeslabení nebo zesílení) od překážky (vady, dutiny, nehomogenity) v materiálu. Metoda je schopna zaznamenat a rozlišit vady ve velikosti 0,1 – 1,0 mm. Ultrazvukový signál má kmitočet $f = 5$ MHz a výše.

Rentgenové prozařování –

nebo-li rentgenová mikroradiografie. Pracuje s průměrem stopy paprsku v ohnisku do 0,1 mm.

Akustická emise –

metoda je založena na snímání vlastních mechanických kmitů, vlastních elastických vln ze zkoumaného materiálu při vzniku nevratných změn za probíhajícího mechanického a tepelného namáhání.

U kovů vzniká vlastní akustická emise při plastické deformaci krystalických zrn, u keramiky vzniká emise za růstu trhliny a praskání jednotlivých zrn v celém objemu materiálu. U skla jako homogenního materiálu vznikají série impulsů hlavně z různých vad pouze na povrchu. U skla totiž nedochází k emisím z celého objemu jako u keramiky.

Při mikroskopickém prasknutí se generuje ve skle celá série impulsů s určitou periodou a na kmitočtech f v rozmezí 4 – 10 Hz s různým útlumem. Závislosti četnosti impulsů na vnějším zatížení se stanovují experimentálně. Mechanické vlnění se zaznamenává piezoelektrickým snímačem, přičemž uvolňovaná energie vlnění vyvolá napětí v řádu 10^{-6} V. K akustické emisi dochází dříve před vlastním porušením vzorku.

Akustické snímače mohou být na vzorcích nebo i na výrobcích přímo nasazených v provozu osazeny trvale, čímž mohou trvale sledovat a varovat předem před poruchou (např. u silnoproudých elektrických izolátorů).

Akustické snímače zaznamenávají rovněž tzv. parazitní emise, což jsou šumy vnikající při vzájemném tření dílů, dilataci a při vzniku trhlin, které však nejsou pro výrobek nebezpečné.

8.3.7. Zkoušky opotřebení

Zkoušky se používají pro následující typy výrobků:

- potrubí na dopravu abrazivních médií,
- řezné pláty obráběcích nástrojů,
- průvlaky pro tažení drátů,
- vodiče textilních vláken,
- lopatky plynových turbín,
- protézy kloubových kyčlí,
- láhve na kontinuálních dopravnících plnicích linek, atd.

Zkouškami se měří postupný úbytek materiálu na povrchu v jednotkách ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) nebo (%). Povrchové opotřebení materiálu způsobuje:

- změnu tvaru povrchu a změnu kvality povrchu,
- změnu celkového tvaru a rozměru,
- zhoršení funkce,

- konečně poruchu nebo poškození a ukončení životnosti výrobku.

Rozlišuje se opotřebení materiálu:

adhezní -

při vzájemném klouzání povrchů těles po sobě, za neustálého navazování a přerušování mikroskopických spojů doprovázeného vytrháváním částic z povrchů těles a jejich přenosem,

abrazivní -

při oddělování částic z povrchů těles důsledkem vybrušování přítomnými tvrdými zrny, které pochází ze samotných těles nebo jsou vnějšího původu,

erozní -

při rozrušování povrchu nárazy tvrdých částic unášených proudem tekutiny (plynu, kapaliny, suspenze).

Dále rozlišujeme opotřebení chemické a kombinované.

8.3.8. Analýza a specifika lomu

Probíhá na destruovaných zkušebních vzorcích nebo na poškozených výrobcích z reálného provozu. Předmětem zkoumání jsou tzv. **lomové obrazce**, které představují trajektorie („pavouka“) vzniklých prasklin. Zkoumá se i celkové poškození výrobku.

Lomové obrazce většinou představují rozvětvené křivky s jediným společným počátkem destrukce, tj. v **ohnisku lomu**, který se rovněž většinou nachází na povrchu poškozeného skla. Podpovrchová ohniska lomu mohou vzniknout u materiálůvých nehomogenit, které jsou příčinou lomu (zrna jiné fáze, bubliny atd.). V ohnisku lomu dojde tedy k prvnímu překročení meze pevnosti ve skle (zpravidla tahem) a ke vzniku praskliny. Celková geometrie a tvar tělesa má rovněž vliv na ložisko lomu, protože k jeho vzniku a umístění dochází zpravidla v oslabeném místě tělesa.

Specifika lomu:

- Lomové obrazce vzniklé teplotním šokem společně ohnisko nemají, k prasknutí dojde totiž na více místech v ochlazeném povrchu materiálu.
- Rovněž lomové obrazce vzniklé nárazem rozměrného předmětu nemají jediné ohnisko, ale ohnisek více dle průniku těles při nárazu.
- Typické sklo má lasturový lom, který je způsoben lokálně koncentrovaným napětím a zatížením, kombinací tlaku a smyku a rychlým průběhem lomu. Tvar vzniklé lomové plochy je výrazně zvlněný a připomíná schránku lastury. Typický je lasturový lom na hraně skleněného výrobku.
- Vrstvené sklo má rozdílný charakter lomu přední a zadní tabule.
- Tvrzené sklo má své vlastní vnitřní pnutí a pokud nastane lom, uvolní se akumulovaná energie v celém objemu (tj. i energie z vnitřního pnutí), a proto sklo praskne v celém objemu.

V oblasti kořene stávající trhliny nebo jiného defektu dochází k rozvoji nových trhlín vždy kolmo ke směru maximálního tahového napětí. Změna trajektorie trhliny je projevem změny napjatosti a rozložení sil v tělese. Větvení trhlíny je projevem nadbytku uvolněné potenciální energie z probíhajícího lomu, za této situace je dosažena lomová rychlost maximální pro daný materiál skloviny. Vnější tlakové síly zpravidla růst trhlíny zpomalují. Vnější tahové síly naopak růst a šíření trhlín zrychlují.

Při nízkých hodnotách vnitřní napjatosti je růst trhlíny pomalý, lom je na hranách a v ploše hladký, čímž vzniká tzv. **zrcátko**. Naopak vysoké hodnoty vnitřní napjatosti způsobují rychlý růst trhlíny s hrubým povrchem lomové plochy, lom se event. větví v ostrém úhlu (tj. proti směru postupu hlavní trhlíny) do sekundárních trhlín. S rostoucími hodnotami vnitřní napjatosti roste i počet nastalých sekundárních větví lomu. Sekundární lomové větve se zpravidla vytvářejí blízko ohniska lomu.

U sklovin s vysokou pevností materiálu dochází k lomu až za vysokých hodnot vnitřní napjatosti, což v okamžiku lomu způsobuje větší počet sekundárních trhlín a vysokou lomovou rychlost.

8.3.9. Fotoelastický jev

U skla lze vnitřní pnutí v materiálu detekovat polarizačním přístrojem (polarimetrem). Vnitřní pnutí materiálu se projeví tzv. optickým **dvojlomem** (objeven roku 1816 Davidem Brewsterem). Tento jev nastane, když se v měřeném a zatíženém vzorku procházející světelný paprsek rozdvojí na dva paprsky s rozdílnými rychlostmi a směry šíření, které jsou dané rozdílnými indexy lomu v materiálu. Závislost indexu lomu na působícím vnějším zatížení je způsobena **fotoelastickým jevem**. Nezatížený opticky izotropní materiál se vlivem působení vnějších sil a vyvolanou deformací stane opticky anizotropní. Takové vlastnosti má právě sklo (i PMMA – polymethylmetakrylát, plexisklo). Optický dvojlom (také anizotropie, irizace) je proto charakteristický pro **tvřená skla**.

8.4. ZVYŠOVÁNÍ PEVNOSTI SKLA, ZVYŠOVÁNÍ ODOLNOSTI PROTI PORUŠENÍ

Hlavní strategií při zvyšování celkové pevnosti skleněných výrobků je zajištění a zlepšení jejich odolnosti vůči vnějšímu porušení. Zvyšování celkové pevnosti skleněných výrobků pouhým zvyšováním statické únosnosti materiálu skloviny neřeší totiž pokles této únosnosti vlivem eroze skla od působícího vnějšího prostředí. Možnosti zvyšování celkové pevnosti skleněných výrobků vycházejí ze znalosti lomové mechaniky.

Úpravy ve zvyšování celkové pevnosti skleněných výrobků musí zajistit tyto požadavky:

- odolnost proti statickému zatížení (pevnost),
- odolnost proti rázovému zatížení,
- odolnost proti teplotnímu zatížení,
- odolnost proti nárazu, střetu, ořezu, úderu,
- zvyšování bezpečnosti při lomu materiálu, tj. eliminace křehkosti a zvýšení houževnatosti

Odolnost proti rozrušení skleněného výrobku lze zvýšit:

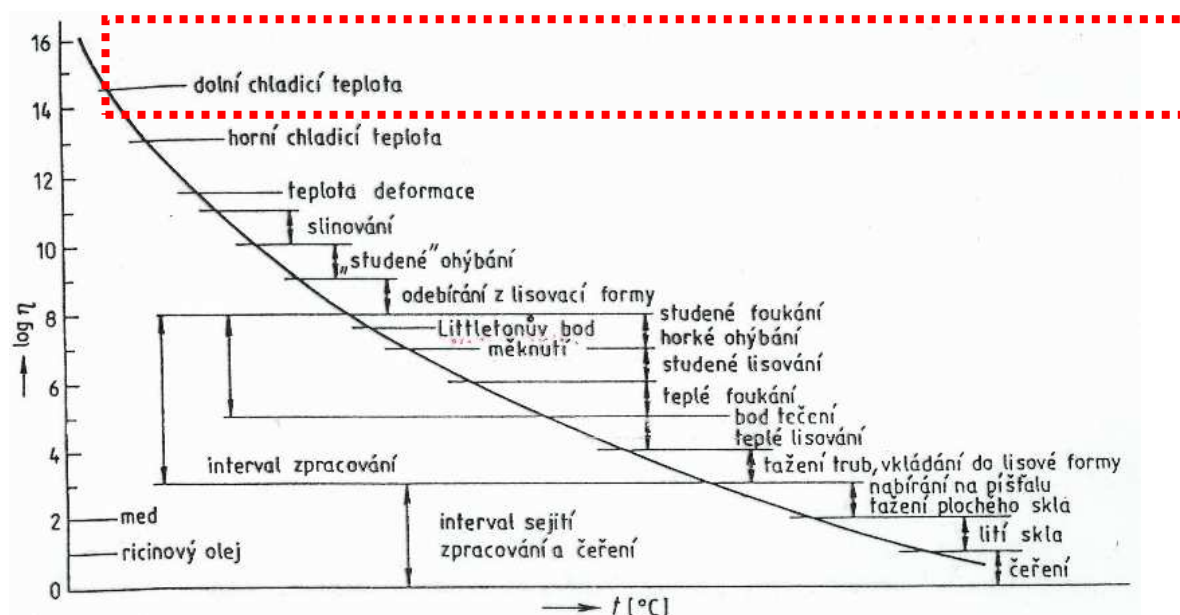
- zmenšením velikosti a pravděpodobnosti výskytu nebezpečných vad,
- zmírněním nebezpečnosti tvaru defektu -
 - například leptáním původně nebezpečného ostrého kořene trhliny dojde k jeho zaoblení,
 - vytvořením povrchového tlakového předpětí kalením se omezí rozevírání povrchových trhlín,
- odstraněním nebo zmenšením povrchové vady,
- zmírněním vnitřních pnutí od výroby,
- zvýšením lomové houževnatosti (bezpečnostní fólie, drátosklo, sklokeramika),
- snižováním modulu pružnosti, tj. zvyšování poddajnosti materiálu bez vysokého nárůstu vnitřních sil (tj. zvýšení schopnosti skloviny relaxovat vnitřní napětí),
- optimalizací tvaru výrobku, který zvýší celkovou poddajnost tělesa,
- volbou vhodného ukotvení výrobku do navazujících konstrukcí,
- aplikací poddajného houževnatého ochranného obalu, který -
 - zabrání ořezu skla,
 - zamezí vzniku nových povrchových vad z provozu,
 - rozloží event. napěťové špičky od lokálního rázu / nárazu na překážku,
- snížením teplotní roztažnosti skloviny, čímž se omezí vzájemné pnutí hmot skloviny s rozdílnou teplotou,
- zvýšením tepelné vodivosti skloviny, která omezí provozní stavy rozdílných teplot jednotlivých částí jednoho skleněného výrobku a umožní ve skle tyto teplotní rozdíly vyrovnat.

8.4.1. Ochrana před vznikem povrchových vad

Určitá část vad se vytvoří již během tvarování, lisování a při prudkém ochlazení skloviny. Tomu lze předejít preventivními technologickými úpravami výroby, bezprašností a čistotou výrobního prostředí. Na ohřáté tvarovací nástroje a stěny se aplikují povrchová ochranná mazadla a laky, která umožní netrhavé klouzání s povrchem skloviny. Rovněž se monitoruje a zabezpečuje pomalejší řízené ochlazení výrobků. Manipulační části strojů se osazují materiály s menší tepelnou vodivostí tak, aby neodváděli teplo ze skloviny v místě společného dotyku, čímž by ve skle došlo k lokálnímu relativnímu ochlazení.

Řízené ochlazování, řízené tepelné zpracování -

Tímto procesem se při chlazení zajišťuje určitá v čase proměnlivá teplota, která ve sklářském výrobku při jeho tuhnutí není nebezpečná z hlediska působícího vnitřního napětí a event. vyvolání trhliny. Prasklina může vzniknout během procesu chlazení nebo i samovolně už ve vyhladnutém výrobku (a to i za 6 měsíců po vyhotovení).



Obr. 5. Vymezení hlavních technologických procesů na viskozitní křivce skla [106]

Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT

Tavenina skla se za vysokých teplot chová jako kapalina s určitou viskozitou a hustotou, které narůstají s poklesem teploty taveniny. Za teploty, tzv. **horní chladicí teploty**, s viskozitou **1 013,0 dPa.s** kapalina taveniny začíná tuhnout, tj. plynule přechází v tuhou látku s vnitřní tlakovou, tahovou a smykovou napjatostí. Úplný přechod v tuhou látku je dokončen s dalším poklesem teploty na tzv. **dolní chladicí teplotu** s viskozitou **1 014,5 dPa.s**, za které jsou zastaveny viskózní toky v materiálu.

Sklovina o teplotě nad horní chladicí teplotou se chová jako kapalina, sklovina o teplotě pod dolní chladicí teplotou se chová jako tuhé těleso. Ve sklovině s teplotou v intervalu obou chladicích teplot, v tzv. **chladicím intervalu**, se vnitřní pnutí v materiálu vyrovnávají, tj. relaxují, částečně viskózními toky a částečně rovněž celkovou deformací.

V důsledku teplotní délkové roztažnosti vznikají vnitřní pnutí v materiálu jeho nerovnoměrným ochlazování, tj. povrchové vrstvy mají jinou teplotu, než vnitřní hmota skloviny ve výrobku. Tomuto jevu se nedá technologicky předejít. Při úplném neřízeném ochlazení na tuhé těleso nedojde k absolutnímu vyrovnání vnitřních pnutí a materiál si je v sobě zakonzervuje jako trvalé napětí. Pokud je výrobek **řízeně** udržován na **dolní** resp. **horní** chladicí teplotě, dojde k relaxaci vnitřních napjatostí ve sklovině na bezpečnou úroveň **do 4 h** resp. **do 15 min**.

Na povrch skla lze aplikovat **ochranné vrstvy**, které se sklovinou **vytvářejí strukturní vazby**:

Silikonové vrstvy -

jsou vhodné pro rychlé, levné provedení a masovou výrobu, ale jsou tenké, málo otěruvzdorné a snadno porušitelné. Kluzné, hydrofobní vrstvy se nanášejí parami polysiloxanů, methyl chlorid silanu nebo se nanáší silikonový olej na horký povrch skla o teplotě 300 – 600 °C. Vrstvy lze aplikovat i na studený povrch, ale k polymerizaci dojde až po zpětném ohřevu skla na uváděné teploty. Jestliže je aplikace provedena hned po výrobě, dojde k fixování pevnosti skla na hodnotu 200 MPa.

Lubrikační látky -

jsou klouzavé smýkavé obaly, které omezují povrchové tření a zamezují vnášení smykových napětí do povrchu skla. Aplikují se na horké sklo za teploty 100 °C napařováním a rozprašováním mastných kyselin, mýdel, vosků a polyethylenu.

Oxidy kovů -

vytvářejí oxidační vrstvy, které zvyšují povrchovou chemickou odolnost a tvrdost skla. Aplikují se na horký povrch skla za teplot 500 – 600 °C napařováním a postřikem organických nebo anorganických sloučenin kovů Sn, Ti, Al, Zn, Co nebo jejich roztoků SnCl_4 , TiCl_4 , $(\text{CH}_3)_2\text{SnCl}_2 + (\text{CH}_3)_3\text{SnCl}_3$. Na povrchu skla dojde k vysokoteplotní hydrolyze a pyrolýze za vzniku ochranné vrstvy v tloušťce 10 – 15 nm. Pokud dojde k aplikaci silnější vrstvy, na povrchu skla se potom vytvoří barevné duhy (irizování).

Kombinované vrstvy -

například lze s výhodou aplikovat oxidové vrstvy s následným pokrytím lubrikačními vrstvami, které prodlužují životnost a funkčnost spodních oxidových vrstev. Naopak oxidové vrstvy zlepšují přilnavost pro vnější kluzné vrstvy.

Na povrch skla lze také aplikovat **ochranné vrstvy**, které se sklovinou **nevytvářejí strukturální vazby**. Takové vrstvy se vytvářejí nástřikem, povlakováním nebo nalepováním syntetických pryskyřic, PVC, PE, nebo PUR vrstev. Takové aplikace:

- zajišťují redistribuci bodového zatížení do větší plošky,
- zajišťují absorpci energie nárazu vytvořením visko-elastické deformační zóny,
- zamezují rozptýlu vzniklých třepů, které zůstávají přilepeny na vnější povrchové fólii (bezpečnostní sklo),
- omezují šíření povrchové trhliny do skla, tj. trhlinky v ochranné obálce nepokračují do skla ale pokračují po povrchu.

Některé povlaky mohou negativně barevně, strukturálně a vizuálně změnit charakteristický dekorační vzhled skla.

8.4.2. Úprava povrchu odstraněním a zmenšením vad

Do této skupiny technologických úprav náleží:

Leštění žářem –

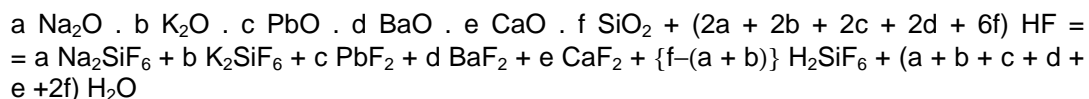
při tomto procesu měkne povrch skla, relaxují povrchová napětí a v měkkém povrchu se zalijí stávající vady. Teplem rovněž dojde k předání aktivační energie pro navázání ztracených atomových vazeb ve sklovině.

Za vysoké teploty na povrchu těkají alkalické kovy, které jsou slabě ve skle vázané. Tím se v povrchovém složení zvýší procentuální zastoupení SiO_2 , které zvýší chemickou a mechanickou odolnost povrchu. Na povrchu vzniklé „křemenné“ sklo s menší teplotní roztažností po ochladnutí vyvolá tlakové předpětí, jelikož nepozměněná vnitřní alkalickokřemičitá sklovina se po ochlazení smrští.

Povrchové tlakové předpětí fixuje ihned po výrobě pevnost ve výši 200 MPa. Nové škrábance a povrchové vrypy tuto pevnost opět snižují. Leštění žářem trvá v rozmezí 0,1 – 10,0 sec. Žár nesmí proniknout hlouběji pod upravovaný povrch, jinak by se těleso tepelně deformovalo. Žářem se má prohřát pouze do tenká povrchová vrstva.

Odleptání povrchové vrstvy, chemické leštění skla –

odmaštěné sklo se ponoří do 10 - 40% roztoku kyseliny HF v destilované vodě s podílem H_2SO_4 , HNO_3 , H_3PO_4 za teploty 20 - 40 °C. Lázeň se neustále promíchává, aby se neusazovaly na povrchu skla sedimenty z leptání (fluoridy, fluorokřemičitany, soli kyseliny fluorokřemičité). Leštěné sklo tak lze umístit do lázně na rotující bubny. Proces trvá dle pH lázně v rozmezí 1,0 – 10,0 sec až několik minut. Rychlost odleptání povrchu skla je řádově 5 – 10 $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Rovnici leptání lze zapsat následovně:



Leptáním povrchové vrstvy se rozleptávají a zacelují povrchové vady. Aby se proces leptání, tj. chemického leštění v lázni nezastavil, je nutné kontinuálně odebírat vzniklé odpadní produkty-výluhy. V opačném případě by se ustanovila chemická rovnováha a leptání skloviny by se v lázni pozastavilo. Zaoblením vrypů poklesne koncentrace napětí v kořeni těchto vrypů při následném zatížení. Roste technická pevnost skleněného výrobku, leptáním se fixuje pevnost skla ve výši **1 000 - 3 500 MPa**. Tloušťka leptané vrstvy je v rozmezí 0,01 - 0,10 mm. Leptání eliminuje nebezpečí pocházející pouze od trhlin, tj. vměstky a jiné nehomogenity se leptáním neodstraní. Od určitého okamžiku další

leptající lázeň pevnost skla nenavýší.

Na opláchnutý a suchý povrch skla se aplikují oxidové nebo silikonové ochranné vrstvy, jinak by leptáním dosažená pevnost degradovala zpět po dotyku s dalšími tělesy.

Vytvoření tlakového předpětí v povrchové vrstvě -

jedná se o neefektivnější způsob vedoucí k trvalému a značnému zvýšení pevnosti skla. Povrchové trhliny jsou tlakovým předpětím trvale stlačeny. Pro růst trhliny je potřeba vyčerpání a překonání tlakové pnutí, aby se trhlina mohla vynucenými deformacemi a vnějším zatížením znovu rozevřít. Roste technická pevnost, touto cestou se snižuje vliv vad stávajících i nově vzniklých v povrchové vrstvě.

Předpokladem je, že tloušťka tlačené povrchové vrstvy je vyšší než hloubka nebezpečné vady tak, aby trhlina byla celá v tlačené zóně.

Protože do povrchové vrstvy materiálu je vneseno tlakové předpětí, uvnitř materiálu skloviny je naopak (v důsledku rovnováhy vnitřních sil) tahové předpětí. Proto vady umístěné uvnitř materiálu jsou více nebezpečné než u běžného netvrzeného skla.

8.4.3. Dosažení předpětí v povrchové vrstvě, tvrzení

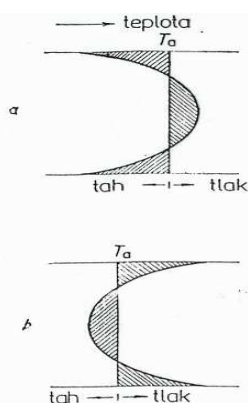
Do této skupiny technologických úprav náleží:

- tepelné tvrzení, tepelné kalení (nejčastější způsob)
- výměna iontů v povrchové vrstvě (chemické zpevňování)
- krystalizace povrchové vrstvy
- kombinace s materiály s jinou roztažností
- kompozitní materiály

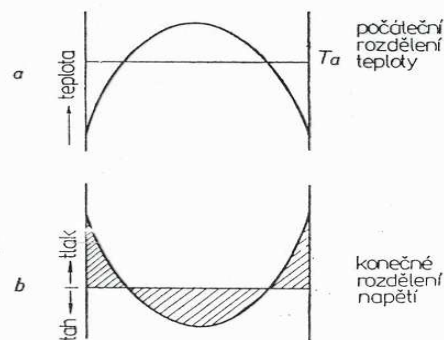
Tepelné tvrzení -

Při tomto procesu se sklo ohřeje až na teplotu měknutí a potom se následně rychle ochladí. Chlazení probíhá tryskami chladícího vzduchu, výkonnější chlazení probíhá tryskami kapaliny, postřikem nebo ponořením do lázně chladící kapaliny. Jinou možností chlazení je dotyk „studené“ manipulační plochy, tj. lisovací nebo tvarovací formy, ohýbací čelisti aj. Mocnost vytvrzené vrstvy na povrchu skla se měří polarizačním přístrojem

Na prudce ochlazeném povrchu se sklovina smrští a ztuhne. Postupně se tak stane se všemi hlubšími vrstvami od povrchu tělesa. Částice se ochlazením postupně navzájem polohově fixují. Vnitřní vrstvy se mají tendenci ochlazením smrštit, ale v tom jim brání již dříve ochlazené a smrštěné vrstvy blíže u povrchu. Jelikož ale ochlazení vnitřních vrstev nakonec nastane, přes tuhost tělesa nedojde k úplnému smrštění (deformaci) ale ke změně vnitřních sil (pnutí, napětí). Na základě rovnováhy sil v tělese jsou výsledně vnější vrstvy tlačeny a vnitřní vrstvy taženy.



Obr. 153. Rozdělení teploty a napětí v řezu deskou, jež je oboustranně ochlazována (a) nebo ohřívána (b)



Obr. 154. Původní rozdělení teploty (a) a konečné rozdělení napětí po vyrovnání teplot (b) v rychle ochlazené desce skla z teploty $T > T_g$

Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT

Tvrzené sklo se dodává pro okna a průzory dopravních prostředků, pro skla dveřních výplní, pro fasádní výplně budov, okénka pro plynové a elektrické spotřebiče, varné nádoby, čočky, elektrické izolátory, aj.

Platí, že:

- s rostoucí intenzitou a rychlostí ochlazování se zvyšují hlavně tlaková napětí na povrchu, tahová vnitřní napětí rostou pomaleji, rovněž se nepatrně zmenšuje tloušťka tlakové vrstvy.

- s rostoucím součinitelem délkové teplotní roztažnosti materiálu (materiál se teplotou více roztahuje a smršťuje) rostou i výsledná vnitřní napětí, pro křemenné sklo s nízkým součinitelem délkové teplotní roztažnosti nemá tepelné tvrzení význam.

- s rostoucím modulem pružnosti i výsledná vnitřní napětí.

- s rostoucí tloušťkou materiálu roste dvojnásobně tlakové předpětí při stejné intenzitě chlazení, protože s rostoucí tloušťkou materiálu se snáze docílí rozdílných teplot vrstev materiálu od povrchu a dále se chlazením vnitřní vrstvy tolik neochladí jako u tenkostěnného materiálu.

- u tenkostěnných materiálů (pod 3mm a méně) je zapotřebí zvýšit intenzitu a rychlost ochlazování.

- tvrzením roste i odolnost skla proti rychlým teplotním změnám.

- výrobek po vytvrzení **nelze** dále **opracovávat** vrtáním ani řezáním.

Proto například při realizaci vnitřních výztužných skleněných žeber fasády na projektu Nile House, River City Prague, Praha 8 – Karlín se všechny montované prvky z lepeného kaleného skla musely předem vyrobít s požadovanými otvory pro úchyty v určité rozměrové toleranci na přesnost.

Pro porušení skla platí:

- lom tělesa probíhá rychle,

- rychlost šíření lomu trhliny dosahuje maximálních hodnot pro daný materiál v rozmezí $1\,500 - 2\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

- protože je tlakové předpětí rozloženo rovnoměrně po celé ploše tělesa, rozpad nastane u celého tělesa na mnoho malých střepů bez ostrých hran (snížení nebezpečnosti skla),

- počet střepů se zvyšuje (a rozměry jednotlivých vzniklých úlomků se zmenšují) v závislosti na rostoucím tlakovém předpětí.

- některá technická literatura uvádí, že k samovolné destrukci tepelně tvrzeného skla může dojít i po 2 letech vlivem krystalizace sulfidu niklu (NiS) ve skle, jehož zrna krystalizací současně zvětšují svůj objem.

Dosahované pevnosti tepelným tvrzením závisejí:

- na tvaru ochlazovaného tělesa, u složitých tvarů se dosahuje tvrzením nižších pevností a vyšší poruchovosti výroby,

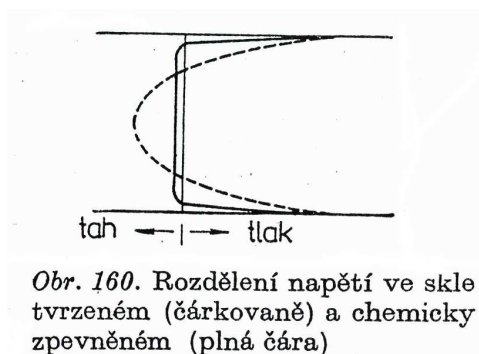
- na velikosti a tloušťce stěn ochlazovaného tělesa,

- na druhu ochlazované skloviny,

- na způsobu ochlazování. Například u plochého okenního skla se chlazením vzduchem dosahuje pevnosti **300 - 400 MPa** v ohybu, při běžné výrobě se dosahuje pevnosti 200 – 250 MPa.

Výměna iontů v povrchové vrstvě, chemické zpevnování -

K procesu chemické výměny iontů mezi povrchem skla a okolního prostředí dochází na základě rozdílné koncentrace prvků ve skle a v okolním prostředí. Prostředím je většinou kapalná lázeň, do které je těleso ponořeno po určitou dobu při určité zvýšené teplotě. Výměnou iontů v povrchové vrstvě skla dojde ke změně materiálových a chemických vlastností reagující povrchové vrstvy skla.



Obr. 160. Rozdělení napětí ve skle tvrzeném (čárkovaně) a chemicky zpevněném (plná čára)

Zdroj: ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., VŠCHT

Tloušťka pozměněné vrstvičky závisí:

- na času expozice v lázni,
- na rychlosti výměny iontů difúzí.

Například za konstantní teploty a stálého chemického složení lázně tloušťka pozměněné vrstvy roste s druhou odmocninou času expozice tělesa v lázni, tj. na 2-násobení tloušťky vrstvy je zapotřebí 4x více času. Zvyšování času expozice zvyšuje finanční náročnost operace, minimální dosažované tloušťky jsou 50 μm s dosažovanými časy expozice v řádech 10 h.

Na rozdíl od tepelně tvrzeného skla lze bez rizika zpevňovat tělesa složitých tvarů a tenkostěnná tělesa.

Obecně platí, že vlivem malých dosažených hloubek zpevněného materiálu je zde zvýšená citlivost na hlubší poškrábání povrchu, kdy dojde ke ztrátě efektu zpevnění (trhlina není celá v tlačené zóně).

Výměna iontů NAD dolní chladicí teplotou

Ionty Na^+ a K^+ se v povrchové vrstvě nahradí jinými ionty, tím v povrchové vrstvě vznikne sklo s nižší teplotní roztažností, než je sklo základní původní uvnitř tělesa. Výměna nad dolní chladicí teplotou probíhá za zvýšené teploty, kdy dochází k relaxaci materiálu viskózním tečením. Sklo je bez povrchového napětí. Po ochlazení se vnější změněná vrstva smrští méně (sklovina s menší teplotní délkovou roztažností) než vrstva vnitřní, povrchové vrstvy pozměněného skla jsou tlačené a uvnitř materiálu jsou vrstvy původního skla tažené. Dosažená pevnost je v rozmezí hodnot **200 – 1 000 MPa**.

Ionty Na^+ a K^+ za přítomnosti H^+ , plynného SO_2 a vodní páry se substituují ionty Li^+ a Cu^{2+} .

Nevýhody této technologie:

- finančně nákladné Cu a Li soli,
- malé dosažené zpevnění v materiálu. Ke zpevnění a výměně iontů dochází v malé hloubce od povrchu skla, tj. zpevněná vrstvička je tenká.
- mohou nastat nežádoucí deformace při viskózním tečení povrchu skla,
- mohou nastat nežádoucí krystalizace při ochlazování ohřátého materiálu.

Výměna iontů POD dolní chladicí teplotou

Substituující ionty K^+ , Li^+ a Ag^+ jsou rozměrnější než ionty Na^+ a, čímž je zapříčiněn nárůst objemu pozměněné povrchové vrstvičky skla. Úplnému nárůstu objemu ale brání původní nepozměněné vrstvy uvnitř materiálu. Proto opět u povrchu jsou vrstvy pozměněného skla tlačené a uvnitř materiálu jsou vrstvy původního skla tažené.

Velikost vybraných kationtů – nm v substituci - $\text{Na}^+ \rightarrow \text{K}^+ \rightarrow \text{Ag}^+$, $\text{Na}^+ \rightarrow \text{Li}^+$, $\text{Na}^+ \rightarrow \text{K}^+$	
Na^+	0,098
Li^+	0,113
K^+	0,133

Ag ⁺	0,133
-----------------	-------

Výměna probíhá pod dolní chladicí teplotou obvykle v rozmezí teplot **250 – 500 °C**, tj. nedochází k relaxaci vnitřních napětí v materiálu a nedochází k viskóznímu tečení, což má následující výhody:

- nemohou nastat deformace při viskózním tečení,
- nemohou nastat nežádoucí krystalizace při ochlazování ohřátého materiálu.
- další konstrukční výhodou představuje skutečnost, že na rozdíl od tepelně tvrzeného skla je povrchová vrstva tenčí v rozmezí 0,001 – 0,01 mm, tzn. povrchové tlakové předpětí rychle klesá směrem do hloubky upravené skloviny, dosažená pevnost je v rozmezí hodnot **600 – 2 000 MPa**. Na základě rovnováhy sil v tělese je tah konstantní a nízký napříč průřezem v tažené zóně (až 100 – 1 000x menší než povrchový tlak). Právě nízké tahové napětí má za následek, že při lomu materiálu nemusí nutně dojít k rozrušení tělesa v celém objemu skla a **lze** jej dále **opravovávat** vrtáním a řezáním. Charakter lomu je stejný jako u běžného skla.

Prostředím je většinou kapalná lázeň roztavených solí (např. dusičnan draselný, KNO₃), ale substituci lze provádět i v plynném prostředí, v tuhém prostředí (pasty alkalických solí) nebo ve vodních suspenzích.

Výměna je vhodná pro sodnovápenatokřemičitá a sodnohlinítokřemičitá skla. U skel sodnohlinítokřemičitých probíhá difúzní substituce nejrychleji už od několika minut expozice výrobku v lázni. Substitucí sodných iontů za ionty lithné vznikají speciální lithnohlinítokřemičité skloviny. S ohledem na velikost kationtu Pb je výměna obtížná u borítokřemičitých skel s vysokým obsahem olova.

Krystalizace povrchové vrstvy -

je vhodná pro určitá skla s vysokým obsahem oxidu lithného nebo hořečnatého, u nichž krystalky mají nižší teplotní roztažnost než původní sklo. Následně se vnější změněná vrstva smrští méně (s menší teplotní délkovou roztažností) než vrstva vnitřní. U povrchu jsou vrstvy pozměněného skla tlačené a uvnitř materiálu jsou vrstvy původního skla tažené.

Proces zušlechtní probíhá při vysokých teplotách blízkých bodu měknutí daného skla. Časová náročnost je v řádu 1 - 30 h.

Dosažená tloušťka upravené povrchové vrstvy je v rozmezí 0,01 – 0,1 mm. Dosažená pevnost je v rozmezí hodnot **200 - 600 MPa**. Upravená vrstva může být dle způsobu zpracování i neprůhledná.

Kombinace s materiály o jiné teplotní roztažnosti -

Principem povrchového zpevnění je aplikace vrstvy skla (v tloušťce několika mm) s nižší teplotní roztažností než původní sklo, a to následovně:

- sklo se nanáší roztavené na povrch ještě žhavého výrobku,
- na studený vychladlý výrobek se nanese vrstva vodní suspenze vhodného skla, smaltu,
- vrstva aplikované skla se roztaví a spojí se s podkladem, vrstva může projít i následnou krystalizací,
- na povrch výrobku se aplikuje sklo o podobné teplotní roztažnosti jako podklad, ale s jiným tepelným průběhem zpracování.

Dosahované pevnosti jsou v řádu **100 MPa**.

Řízená krystalizace -

Principem této technologické úpravy je vytvoření sklo-krystalické hmoty v celém objemu skla (viz. předchozí kapitola: **Sklokeramika, sklokrystalické hmoty**).

Sklo-krystalický materiál má z hlediska popisu chování v lomové mechanice vyšší lomovou houževnatost než u původní sklo. Hranice krystalků na povrchu jejich zrn tvoří přirozenou zábranu pro šíření trhliny, zvyšují napětí potřebné pro šíření trhliny a způsobují, že celková lomová plocha (lomová práce) je vyšší než amorfního skla. Vlastnosti materiálu konstantní až do vysokých teplot.

Kompozitní materiály, sklo s drátěnou vložkou –

Ploché sklo se vyrábí tak, že ještě do natékající žhavé skloviny se mezi válce vkládá ocelové pletivo.

Funkcí vloženého pletiva je při poruše prvku udržet vzniklé střeby pohromadě. Ocelová

vložka tedy neslouží ke zvýšení pevnosti skla. Ocelové drátěné pletivo musí být tažné, musí se přizpůsobit smrštění při vychladnutí a musí unést deformaci bez přetržení vláken. Pevnost skla je stejná nebo nižší než u obyčejného skla.

Kompozitní materiály, vrstvené sklo –

Vrstvy tabulí plochého skla se společně navzájem slepí. Vrstva lepidla jako tažná vložka drží případné střepy skla pohromadě. Je-li vrstva lepidla houževnatá, je schopná absorbovat deformace a energii rázu při vnějším úderu. Vrstva lepidla představuje bariéru pro event. šíření trhliny, čímž zajišťuje zvýšení technické pevnosti a bezpečnosti provozu výrobku. Rovněž kombinace více vrstev skla různého složení a tloušťky slouží pro výrobu neprůstřelných skel.

Vrstvu lepidla v tloušťce 0,38 - 0,76 mm tvoří transparentní, tažný, ke sklu adhezivní PVB – polyvinylbutyral. Jeho folie se vloží mezi jednotlivé vrstvy skla a celek se předlisuje za teplot do 90 °C. Dále následuje lisování v autoklávech za teploty 90 °C, tlaku 0,5 - 0,6 MPa po dobu 2h.

Slepené vrstvy tabulí lze opracovávat a řezat i do složitých tvarů jako jeden celek skla.

Obecně lze konstatovat, že výsledná pevnost tabulí obyčejného nezpevněného skla spojených PVB fólií není vyšší než pevnost skla o stejné konečné tloušťce (blíže v následující kapitole **ZÁSADY KONSTRUOVÁNÍ Z KŘEHKÝCH MATERIÁLŮ**).

8.5. PRINCIP OPRACOVÁNÍ SKLA

V principu při mechanickém opracování skla se postupuje vhodným modelováním záměrně vyvolané trhliny tak, že lom je veden v zamýšlené hranici oddělující budoucí tělesa. Tělesa se oddělí jednou hlavní lomovou plochou nebo k oddělení dojde soustavou malých souvislých lomových plošek. Uměle vyvolaná trhlina se vytvoří:

- **mechanicky** – vtačováním / smýkáním / odvalováním tělíska (identoru) o tvaru hrotu / klínu / zrna / kotouče nebo nože. Efekt vytváření povrchových rýh se liší dle intenzity působící síly, času a opracovaného materiálu.
- **energeticky** - ohřevem povrchu nebo postupem energetického paprsku po ploše.

V případech, kde výsledný povrch má mít jednoduchý tvar (rovný nebo mírně zakřivený), se sklo opracovává lámáním, sekáním a opukáváním. Nutností je přesná znalost parametrů lomové mechaniky opracovávaného skla, aby se uměle vyvolaná trhlina chovala korektně. Výhodami jsou rychlý a jednoduchý způsob opracování, přesnost vedení uměle vyvolaného lomu je několik desetin mm, způsob opracování není energeticky náročný.

Při opracování skla může dojít ke změně orientace uměle vyvolané trhliny vlivem střídání teplot od tavení a opětovného tuhnutí, tj. vlivem povrchového smršťování po tuhnutí, které může vyvolat na povrchu tah a vznik tahových trhlinek. Výsledná ploška lomu není proto hladká a rovná.

Rychlost dělení profilů:

- o tloušťce 22 mm se pohybuje v rozmezí několika jednotek $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,
- o tloušťce 1 – 2 mm se pohybuje v rozmezí několika desítek až stovek $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,
- je vyšší u materiálů s nižší teplotní vodivostí, ve kterém se rozdíl teplot v profilu srovnává pomaleji a je tedy spíše zachován pro vyvolání změny napětí v materiálu.

Existuje maximální možná horní hranice tloušťky materiálu, při které lze materiál uvedeným způsobem opracovávat. Při překročení této hodnoty už nedochází k vyvolávání změny napětí od rozdílu teplot, materiál je schopný při této navýšené tloušťce uvedené jevy relaxovat.

Materiály s nízkou teplotní délkovou roztažností, jako jsou křemenné sklo a sklo krystalické desky, nelze tímto způsobem opracovávat. Rozdíl teplot nevyvolá patřičné změny napětí v tělese, protože jeho materiál se tolik délkově nerozepíná nebo nesmršťuje.

8.5.1. Opracování ohřevem povrchu

Povrch tělesa se při řízeném vyvolání a vedení trhliny:

- ohřeje, teplo se dále předává vedením do materiálu, rozdíl teplot rozpoložených v tělese vyvolá vnitřní napětí,
- ohřeje prudce, teplo se nedostatečně rychle dále distribuuje tělesem tepelnou vodivostí, teplota zahřívajícího povrchu dále roste, materiál u povrchu se taví,
- ohřeje velmi prudce, teplo se nedostatečně rychle dále distribuuje tělesem tepelnou vodivostí, teplota zahřívajícího povrchu prudce dále roste, materiál u povrchu odpařuje.

8.5.2. Vrtání

Vrtání otvorů skla je provázáno tavením po obvodu a odpařováním v centru otvoru. Proces dále postupuje do hloubky opracovávaného materiálu.

8.5.3. Lámání s nařiznutím

Nejprve se vytvoří rýha pomocí laserového paprsku, kolečkem nebo diamantem. Vyrýváním uměle vyvolané hlavní trhliny vznikají velká vnitřní napětí, která vyvolávají vznik a růst bočních nechtěných trhlin a oprýskávání povrchu kolem hlavní trhliny. Tento jev je důsledkem uvolňování volné energie, která je k dispozici v dostatečné míře. Pokud je naopak energie nedostatek, volná energie naopak poklesne a vyčerpá se v důsledku vnitřního tření materiálu. Tření materiálu lze potlačit například mazáním rýhy petrolejem při vlastním rytí.

K předepsanému lámání výrobku dochází ihned po vyrytí uměle vyvolané trhlinky. Důvodem je snaha zamezit neúčelné relaxaci vyvolaného napětí u kořene umělé trhlinky od vložené energie tak, aby se právě vložená energie využila pro vytvoření předepsaného lomu.

8.5.4. Sekání

Jde o způsob opracování výrobku, při kterém se odděluje jeho krátká část v porovnání k tloušťce výrobku. Průmyslový sekáček fungující a klínovým efektem pracuje v cyklech, které se mohou pohybovat řádově v hodnotách 100 seků za minutu. Materiálem pro sekáčky jsou karbidy wolframu, karbidy titanu a nebo i kalená ocel.

8.5.5. Opukávání

Zde se jedná o způsob opracování materiálu, kdy trhlina je požadovaně vedená teplotním polem, které vyvolá vnitřní napětí v materiálu. Trhlina potom může následně proniknout napříč celým tělesem. Trhlinu lze také kontrolovaným způsobem postupně rozšiřovat posunováním teplotního pole. Startovací počáteční trhlinu je ale před manipulací v teplotním poli nutno nejprve vytvořit zase pomocí laserového paprsku, kolečkem nebo diamantem.

Při opukávání se nejprve ohřeje celé těleso a poté se rychle ochladí pouze místo s trhlinou. Ochlazení vyvolá v materiálu smrštění a tah kolem trhliny, čímž ji rozšíří. Ochlazování se provádí studeným vzduchem, chladnou kapalinou nebo dotekem studeného tělesa.

Při jiném postupu opukávání se nejprve rychle nahřeje povrch tělesa, při čemž se v jeho povrchových vrstvách teplotní roztažností vyvolá tlak. Důsledkem zákona akce a reakce se v jeho vnitřních studenějších vrstvách vyvolají naopak tahová napětí, která trhlunku rozšíří.

Při dalším postupu se může trhlinka rozšiřovat i tahem v důsledku ohybu deformovaného tělesa vlivem teplotní roztažnosti.

8.5.6. Kontrolované rozšiřování trhlinky

Postup tohoto procesu je obdobný jako u popisovaného způsobu opukávání tělesa s tím rozdílem, že se kolem děleného tělesa pohybuje se zdrojem tepla, kterým může být plamen nebo laserový paprsek. Pro všechny materiály je nutné dodržet specifický poměr mezi rychlostí posunu zdroje tepla a jeho intenzitou. V nežádoucím případě dochází k nechtěnému zakřivení a směřování rozšiřované dělicí trhlinky. Kritické okamžiky dělení nastávají na počátku a na konci lomu tělesem. Je nutné i uvažovat vliv případné nesymetrie dělených hmot, které mohou rovněž způsobit odchýlení ve vedení trhlinky. Případná vložená vnitřní napětí v tělese mohou také způsobit odchylky ve vedení lomu.

V případě tlustostěnných profilů se kolem děleného tělesa pohybuje se zdrojem tepla symetricky nad i pod jeho povrchem. Dělení tak probíhá čtyřikrát rychleji oproti dělení tlustostěnných profilů pouze z jedné strany povrchu. Obdobně jako u popisovaného způsobu opukávání lze dělení urychlit tím, že se kolem děleného tělesa pohybuje se jak zdrojem tepla tak i zdrojem chladu. Zvýšený rozdíl teplot tak vyvolá vyšší změnu napětí v materiálu.

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

9. DEFINICE PROBLEMATIKY - SOLÁRNÍ ENERGETICKÉ KONSTUKCE

Tato kapitola navazuje na úvodní články o identifikaci problémů, které se věnují sklu z hlediska využití jeho potenciálu v energetických koncepcích budov (tzn. u novostaveb i rekonstrukcí).

9.1. ENERGETICKÁ NÁVRATNOST

U navržených solárních opatření pro novostavby nebo rekonstrukce se uvažuje tzv. energetická návratnost. Určité zařízení nebo solární opatření v projektu má energetickou návratnost X let, když právě za těchto X let toto zařízení vyrobí tolik energie během svého provozu a užívání stavbou, kolik jí bylo zapotřebí na výrobu tohoto zařízení.

Malá solární zařízení a systémy mají uvažovanou energetickou návratnost 3 roky. U zařízení pracujících v sezoně se uvádí energetická návratnost 10 let. Pro srovnání podle ⁽⁴⁰⁾ otopná zařízení na fosilní paliva za svou životnost nikdy nevyrobí tolik energie, kolik jí bylo zapotřebí na jejich výrobu.

V případě, že se různá solární opatření na jednom projektu svým působením zdvojují a překrývají, je výsledný naddimenzovaný systém navržený nevhodně, protože vzniklé energetické zisky nelze akumulovat, uskladnit nebo jinak využít.

9.2. ZÁKLADNÍ POJMY

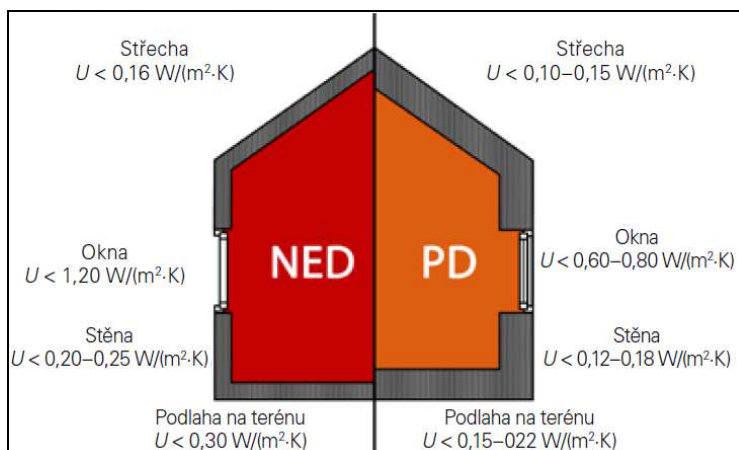
9.2.1. Využití solárního tepla a denního světla

Pro tepelně izolační zasklení na přímé využití solárního tepla a denního světla jsou důležité tyto parametry:

- propustnost denního světla (τ),
- celková propustnost slunečního záření, tedy celková propustnost energie (g),
- tepelně-izolační schopnost, tedy součinitel prostupu tepla (U_w) pro celou k-ci okna vč.rámu a zasklení.

Parametry energeticky optimalizovaných oken v bytové výstavbě jsou:

- pro **nízkoenergetcké** stavby = $\tau > 70\%$, $g > 0,52$, $U_w < 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^{-1}$,
- pro stavby **pasivních** domů = $\tau > 70\%$, $g > 0,52$, $U_w < 0,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^{-1}$,
- rám zaujímá 30-40% plochy okenního otvoru,
- doporučení minimalizovat plošný podíl meziokenních příček, například zvolením jednokřídlých oken,
- plocha oken na jižní straně fasády objektu by neměla přesahovat 25% jimi osvětlené podlahové plochy.



Kritéria součinitele prostupu tepla pro nízkoenergetické stavby (NED) a pasivní domy (PD) dle ČSN 73 0540-2:2011 (Podmínky pro energeticky úsporné domy v České republice, Doc. Ing. Josef Chybík, CSc., časopis Stavebnictví, 9/2012)

⁴⁰ Solární energie: Využití při obnově budov, Andreas Haller, Othmar Humm, Karsten Voss. -- 1. vyd. -- Praha : Grada, 2001.

Prosklení konstrukce střechy přináší tu výhodu, že transparentní plocha zachycuje světlo s velkým světelným jasem. Pokud je navíc transparentní plocha střechy orientovaná na sever (⁴¹), řeší se tím v konstrukci i ochrana před nežádoucími pasivními zisky a tedy tepelné zátěží interiéru.

Pro prostory, které jsou vyhřívány solárně přímo dopadem slunečního záření, je v interiéru vhodné užívat materiálů s tepelně akumulací schopností. Tepelně akumulací konstrukce rovněž předchází problému s přehříváním prostor.

Vhodné materiály pro tepelně akumulací konstrukce jsou:

- cihly
- VCM cihly
- beton
- keramická dlažba
- kamenná dlažba
- obecně: materiály s tmavým povrchem
- obecně: materiály s velkou měrnou hmotností >1.400,00 kg/m³
- obecně: zděné konstrukce s tloušťkou zdiva >16cm

Nevhodné materiály pro tepelně akumulací konstrukce jsou:

- obecně: materiály s nízkou prostupností tepla – tepelné izolanty
- podhledy, předstěny, obklady a konstrukce s tepelně izolující vzduchovou dutinou
- obecně: materiály se světlým povrchem

Doporučené objemy akumulací hmoty vhodných materiálů pro solárně akumulací kolektory a plochy solárně exponované jsou:

- pro kámen: 0,8-1,5 m³ na 1m² plochy kolektoru
- pro beton: 0,5-1,0 m³ na 1m² plochy kolektoru

9.2.2. Ochrana před nadměrným slunečním zářením

Požadavky kladené na ochranu před tepelnou zátěží od nežádoucích pasivních tepelných zisků a požadavky kladené na ochranu před osluněním jsou:

- nejvyšší možná propustnost pro denní světlo (τ)
- účinná protisluneční ochrana propustí do interiéru maximálně 15% zářivé energie (tj. $g < 0,15$).

Z tohoto důvodu je nejúčinnější vnější ochrana, která je umístěna a předsazená na straně exteriéru před vlastním zasklením.

- rovnoměrné rozložení světla bez kontrastů, stínů nebo světelných pruhů
- nepřerušovaný vizuální kontakt s okolním prostředím
- možnost integrovat do clony např. fotovoltaické články

Výhody aplikace ochrany před nadměrným slunečním zářením:

- snížení spotřeby elektrické energie na umělé osvětlení
- snížení vnitřní tepelné zátěže od umělého osvětlení
- snížení spotřeby elektrické energie na chlazení

Konstrukční možnosti zařízení ochrany před nadměrným slunečním zářením:

- pevná protisluneční ochrana:
není flexibilní pro proměnlivé vnější podmínky,
při zatažené obloze omezuje difúzní světlo
- sdužené shrnovací žaluzie:
vhodná pro místnosti s velkou světlou výškou,
nastavitelné stínění clony nezávisle v horní a dolní části,
horní část slouží pro regulaci světla dopadajícího do hloubky,
spodní část slouží k regulaci světla v blízkosti prostoru okna,
spodní část může omezovat volný výhled
- usměrňovače světla:
konstrukční řešení je v podobě skleněné nebo ocelové lamely / markýzy / balkónové desky
umístěné a předsazené v úrovni horizontálního dělení vysokých oken,
tedy rovněž vhodné pro místnosti s velkou světlou výškou,
horní strana slouží jako odrazivá plocha pro usměrnění světla dále do hloubky místnosti,

⁴¹ například Shedové střechy orientované na sever

spodní strana slouží ke stínění a regulaci světla v blízkosti prostoru okna,
spodní strana v tomto případě neomezuje volný výhled

9.3. TABULKA PŘEHLEDU VLVŮ SOLÁRNÍCH OPATŘENÍ NA VLASTNOSTI BUDOVY

Vliv solárních opatření na vlastnosti budovy									
Konstrukce a vybavení	Kolektory TUV	Zasklení balkonů (zimní zahrada, atrium)	Transparentní tepelné izolace na obvodových konstrukcích	Vzduchové kolektory	Fotovoltaické články	Prosklení střechy	Energetický úsporná okna	Dvojitě fasády (20-60 cm)	
Nepřístupné plochy	(+) např. v parapetech balkonů, markýzách	(+) ev. akumulační hmota, trnavé povrchy (+) návaznosti na tepelnou izolaci fasády a balkonů	(+) nutná akumulační hmota, např. v parapetech balkonů	(+) ev. akumulační hmota, např. v parapetech balkonů	(+) např. v parapetech balkonů, markýzách		(+) ev. akumulační hmota, trnavé povrchy	(+) ev. akumulační hmota, trnavé povrchy	
Prosklené plochy		(+) zasklení jednoduché nebo tepelněizolační skla	(+)	(+)	(+) integrace do skla a protislunečné lamel		(+)	(+)	
Střecha	(+)		(+)	(+) teplo-vzdušné	(+)	(+) ev. požární odvětrání	(+)	(+)	
Vytápění	(+) nízkoteplotní		(+)	(+) předehřev vzduchu ze „sklenkových“ pasivních tepelných zisků	(+) ev. chlazení F.V. článků	(+) předehřev vzduchu z teplého vzduchového pytle pod skleněnou střešou	(+)	(+) předehřev vzduchu ze „sklenkových“ pasivních tepelných zisků	
Větrání									
TUV	(+) zásobníky		(+) například v letních měsících						
elektrina					(+)		(+)	(+)	
Klimatizace									
Architektura	(+)	(+) zvýšená zvuková izolace (nepřůzvučnost 45dB a více), ev. trvanlivost zasklené fasády (+) stínící clony pro letní provoz	(+) zvýšená zvuková izolace (nepřůzvučnost 45dB a více), ev. trvanlivost zasklené fasády (+) stínící clony pro letní provoz	(+) zasklené, perforované plech	(+)	(+) stínící clony, difuzory světla	(+) reflexní plochy a nátery pro směrování světla do interiéru (+) stínící clony, (+) pokles spotřeby energie na umělé osvětlení	(+) reflexní plochy pro směrování světla do interiéru, trvanlivost zasklené fasády, zvýšená zvuková izolace (+) stínící clony	
Energetická bilance	(+) pokles spotřeby energie na vytápění a TUV	(+) zvýšená tepelná izolace a ev. zničení tepelných mostů balkonových desek (+) ev. pasivní tepelné zisky, sklenkový efekt	(+) cílené pasivní tepelné zisky	(+) pasivní tepelné zisky, zvýšená tepelná izolace	(+) částečná nezávislost na síti elektrické energie	(+) pokles spotřeby energie na umělé osvětlení (+) ev. pasivní tepelné zisky	(+) ev. zničení tepelných mostů problematicky opravitelných fasád (+) ev. pasivní tepelné zisky, sklenkový efekt (-) ev. tepelné ztráty velkých oken	(+) zvýšená tepelná izolace a ev. zničení tepelných mostů problematicky opravitelných fasád (+) ev. pasivní tepelné zisky, sklenkový efekt	
Zvětšení užívané plochy		(+) v běžném roce prodloužení doby a způsobu využití jako obytného ev. společného prostoru	(+) vhodné pro velkoplošné pracovní prostory			(+) užívání a komfort společných prostor			
Světelná pohoda (vizuální komfort)	(+) protisluneční clona na markýzách	(+) protisluneční clona	(+) neprůhledné průsvitné konstrukce, tj. vhodné na parapety, překlady a záměrně neprůhledné stěny s možností prostupu světla (-) na J.V.Z orientaci nutná protisluneční ochrana proti oslnění		(+) protisluneční clona na markýzách	(+) nejlínější způsob, světelné šachty, světlíky, světlo.ody (-) ev. oslnění, tj. protisluneční ochrana	(+) (-) ev. oslnění, tj. protisluneční ochrana	(+) ev. protisluneční ochrana	
Tepelná pohoda		(+) vyrovnávací prostor pro zmírnění rozdílu teplot	(+) vyšší povrchové teploty ve vnitřních prostorech	(+) ev. vyšší povrchové teploty ve vnitřních prostorech			(+)	(+) vyrovnávací prostor pro zmírnění rozdílu teplot	

9.4. ZIMNÍ ZAHRADA

Skleněná střecha zimní zahrady se nedoporučuje pro náročnost zasklení bezpečnostním sklem a náročným úklidem a údržbou. Hrozí navíc nežádoucí riziko přehřátí. Je proto vhodné využít skleněnou střechu zimní zahrady pro solární kolektory nebo pro solární články s funkcí stínění zimní zahrady.

Konstrukční možnosti a doporučení:

- tepelná izolace podlahy na terénu
- povrch a materiál vnitřní podlahy a stěn umožňující akumulaci
- při použití kovové nosné konstrukce prosklení osadit profily s plastovými vložkami pro přerušení tepelného mostu
- zasklení tepelně izolační
- bezpečnostní skla s integrovanou ochranou proti oslnění
- použití protisluneční ochrany nejlépe na vnější straně prosklení zimní zahrady
- automaticky ovládané větrací otvory s regulací podle vnějších klimatických podmínek

Pro přirozené větrání aerací (komínovým efektem) je vhodná zimní zahrada s velkou výškou vnitřního prostoru a s menším odstupem, tedy s menší hloubkou od přiléhající stěny.

Plocha větracích otvorů by měla přibližně dosahovat velikosti 25% podlahové plochy zimní zahrady. Umístění vstupních přivětrávacích spodních otvorů nad podlahou a výdechových horních otvorů pod střešou se doporučuje prostorově diagonálně v objemu zimní zahrady, čímž se dosáhne pohybu větraného vzduchu napříč objemem obestavěného prostoru zimní zahrady.

9.5. ZASKLENÍ BALKONU

Konstrukční možnosti a doporučení pro solárně ohříváný vzduch pro VZT:

- předeřev vzduchu ve vzduchovém kolektoru umístěném v parapetu zaskleného balkonu (nebo zimní zahrady)
- předeřívání vzduchu ze vzduchového kolektoru projde prostorem zaskleného balkonu, kde je výše umístěným větracím průduchem/štěrbinou pod překladem okna ventilován do obytných prostor
- ventilace je podmíněna podtlakovým odvětráváním bytových prostor do systému VZT domu (ventilátory v koupelnách do instalačních šachet, VZT ventilátor umístěný na střeše objektu)
- teplota čerstvého vzduchu se zvýší o 5-15st.Celsia
- možná 15% úspora energie na vytápění
- naopak v důsledku stálého proudění vzduchu zaskleným balkonem poklesne teplota užívaného prostoru balkonu o 1-3st.Celsia (na takovém balkoně rovněž nelze kouřit)
- nutno posoudit vliv větracích průduchů/štěrbin na případné zvýšené nároky na zvukovou izolaci
- neopomenout možnost předeřevu vzduchu rekuperací tepla z odpadního vzduchu nebo ev. přečerpáním tepla z odpadního vzduchu tepelným čerpadlem

9.6. SOLÁRNĚ VYTÁPĚNÉ KONSTRUKCE S VYUŽITÍM TI

9.6.1. Transparentní prvky – transparentní izolace - TI

Vlastnosti TI prvků:

- neprůhledné ale průsvitné difuzory přímého světla
- pro užívané prostory lepší vizuální komfort denním osvětlením
- potlačení ostrých kontrastů, hlubokých stínů a s rovnoměrné rozložení světla

Konstrukční možnosti a doporučení:

- kompaktní sendvičová konstrukce je rámovaná prvkem s přerušeným tepelným mostem
- rám je zakrytý a utěsněný deskami litého skla
- výplň mezi deskami v rámu je z TI materiálu o tloušťce tepelně-izolačního jádra 5-15cm
- kompletní sendvičový prvek v rámu zatěsněn a plněn vzácným plynem,
- kompletní sendvičový prvek v rámu lze osadit do běžných rámu kompletačních konstrukcí
- pro tl.=49mm: $\tau > 70\%$, $g=0,6-0,8$, $U_w < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
- tepelná vodivost TI je 2-2,5x vyšší než u běžných izolačních hmot
- nutná ochrana proti oslnění při J,V,Z orientaci
- cenové náklady jsou až 4x než u běžných izolačních systémů

9.6.2. Solárně vytápěné konstrukce s využitím TI - obecně

Obvodová stěna nebo střecha zateplená TI s J, JV, JZ orientací, která je vyhřívána solárně přímo dopadem slunečního záření, slouží jako:

- tepelná izolace
- sluneční kolektor
- tepelný akumulátor
- otopné těleso do interiéru s povrchovou teplotou 22-30st.Celsia.

Z vnitřní strany takovýchto konstrukcí je nevhodné umisťovat například velkoplošné celostěnové nábytkové sestavy a.j., které by bránily přestupu tepla dále do interiéru. Lze užít rozvod kanálů pro ohřátý vzduch s nuceným oběhem pro distribuci tepla do ostatních částí konstrukce (podlahy, vnitřní stěny), které nemohou být přímo solárně ohřívány. I zde z vnitřní strany takovýchto konstrukcí je nevhodné umisťovat například velkoplošné celostěnové nábytkové sestavy a.j., které by rovněž bránily přestupu tepla dále do interiéru.

Konstrukční možnosti a doporučení:

- doporučeno 1-2 m2 plochy otopných stěn konstrukce s TI na 10 m2 vytápěné plochy místnosti
- ve slunečných dnech je tepelný příkon až 1,5 kWh/m2 plochy konstrukce s TI
- solární podíl z celkového tepla na vytápění je až 50%
- doba mezi akumulací a sáláním akumulovaného tepla je 4-8 hodin
- tl. TI 8-18 cm
- nosné prvky kompletačních konstrukcí (sloupky, kotvy, trámky) představují tepelné mosty
- nutnost instalace ochrany proti přehřívání v letních měsících

Systémy konstrukcí TI		TI prvky		
Konstrukce se sloupky a příčkami (dřevo, kov)	stavebnice na míru projektu, relativně finančně nákladný (koordinační flexibilita)	volné desky lepené přímo na podklad (vysoká účinnost)	Prefabrikované zasklené panely (životnost - ochrana izolace sklem)	Hermeticky uzavřené prvky, plněné plynem (funkční už při tl. 50 mm)
Zavěšené fasádní prvky (vertikální zavěšení, rámy s přerušeným tepelným mostem)	Nutná montážní koordinace továrních dílů (nižší flexibilita),	Prefabrikované zasklené panely , integrovaný absorbér na zadní straně továrního dílu	Prefabrikované zasklené panely ze strany vnější i zadní, absorbér natřený na akumulační stěně	
Kontaktní systém (bez nosné konstrukce)	Relativně levný a maximálně montážně flexibilní	Vnější skleněná omítka nanesená při výrobě, vyztužení skleněnou textilií, TI, celoplošné lepení a upevnění desky tmavou mařtou s funkcí absorbéru. Maximální souvislá plocha do 2 m2		



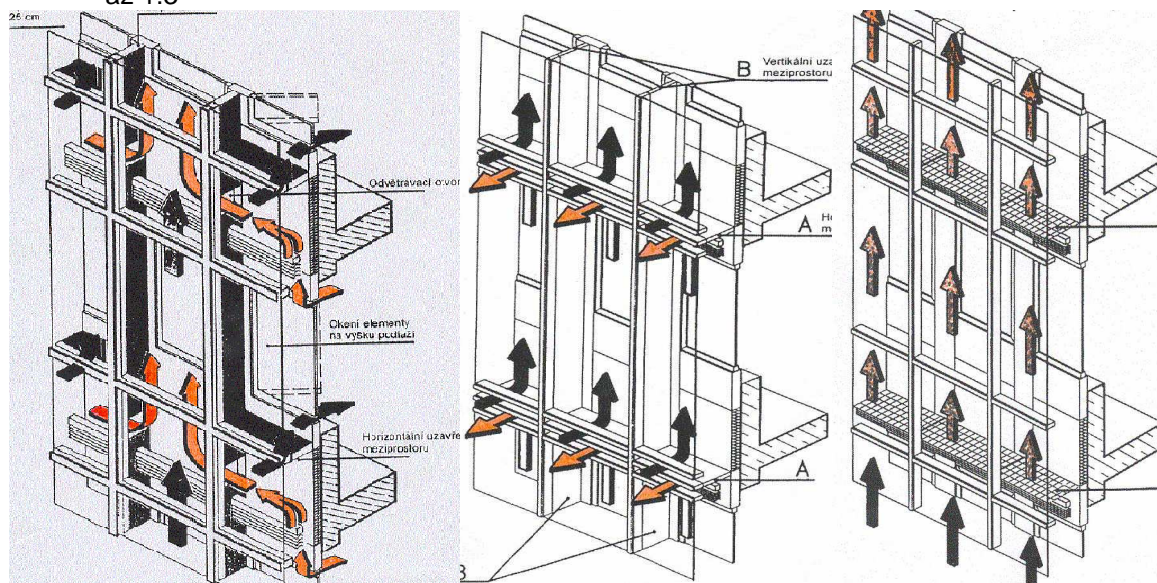
Zdroj: Dům s moduly TI na fasádě <http://www.essentia.cz>

9.7. SOLÁRNĚ VYTÁPĚNÉ KONSTRUKCE VZDUCHOVÝMI KOLEKTORY

9.7.1. Obvodový plášť se vzduchovým kolektorem

Energie slunečního záření se cíleně přeměňuje pro ohřev vzduchu. Systém vyžaduje nucený oběh vzduchu v otopném okruhu.

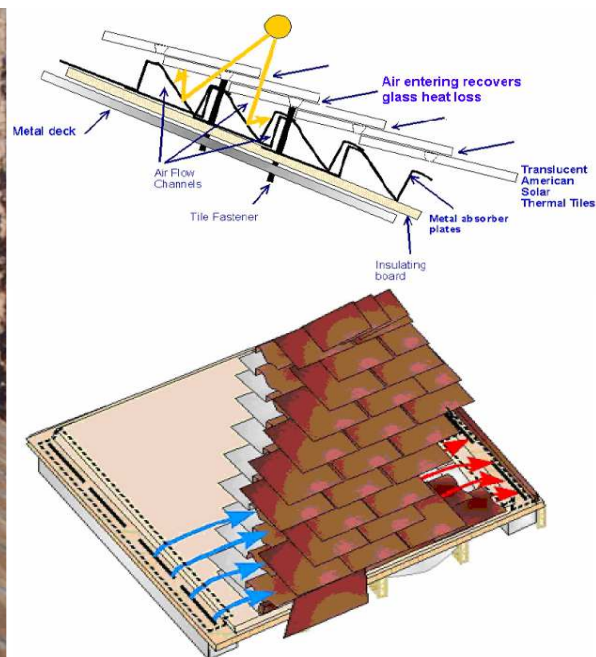
- solární podíl z celkového tepla na vytápění je až 50%
- při letní odstavce provozu teplota v kolektoru přesáhne 80st.Celsia
- tepelný zisk za otopné období 100-300 kWh/m² plochy kolektoru
- poměr solárních zisků ke spotřebě elektrické energie nuceného větrání je 20:1 (v nejhorším případě)
- doporučeno 1,5-2,5 m² plochy kolektoru na 10 m² vytápěné plochy místnosti
- poměr plochy solárního kolektoru k ploše otopných ploch ve vytápěných prostorech je 1:2 až 1:3



Příklad KOMÍNOVÉ / KAZETOVÉ sekční / CELOPLOŠNÉ dvojité fasády s proskleným vzduchovým kolektorem

Skladba konstrukce z exteriéru do interiéru:

- I. exteriér
- II. zasklení
- III. vzduchová dutina (pod zasklením „skleníkový efekt“) 5-10cm
- IV. neprůsvitná nebo prosklená konstrukce v obvodové stěně
 - a) varianta neprůsvitné konstrukce
 - 1) absorbér (tmavý nátěr, černý plech)
 - 2) tepelná izolace mezi absorbérem a obvodovou stěnou (nedochází k přehřívání interiéru za obvodovou stěnou)
 - 3) obvodová stěna
 - b) varianta prosklené konstrukce
 - 1) protisluneční clona (shrnovací lamelová žaluzie) umístěná mezi vzduchovou dutinou a oknem v obvodové stěně, kde má funkci absorbéru.
 - 2) okno s tepelněizolačním zasklením (nedochází k prostupu tepla a přehřívání prostor ze vzduchové dutiny do interiéru)
- V. interiéru



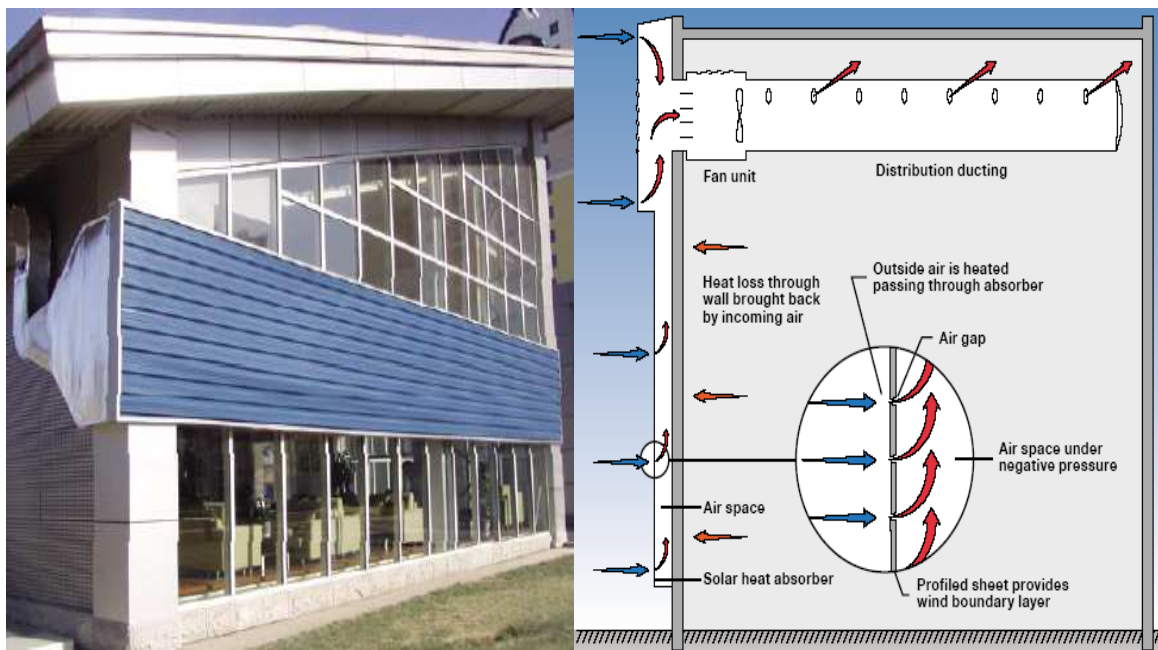
Zakrytý prosklený vzduchový střešní kolektor, zdroj: American Solar <http://www.americansolar.com/>

9.7.2. obvodový plášť s nezaskleným vzduchovým kolektorem

- teplota čerstvého vzduchu se zvýší o 10-25st.Celsia, možná 25% úspora energie na vytápění
- systém s vysokou účinností (60-70%) využití sluneční energie
- teplá vrstva vzduchu v odsávané dutině rovněž snižuje tepelné ztráty konstrukce
- vhodné pro fasády s orientací od jižního směru do 60st.
- vhodné pro průmyslové haly a vysoké souvislé úseky fasád bytových domů
- vhodné pro aplikace s velkou výměnou vzduchu
- nízké pořizovací náklady a nízké náklady na údržbu, dlouhá bezporuchovost a životnost kolem 30 let
- oproti zasklenému vzduchovému kolektoru se dosahuje nižších teplot a je tedy potřeba větší plochy kolektoru
- Orientačně je potřeba 0,03-0,07 m2 plochy kolektoru na 1m3 čerstvého vzduchu

Skladba obvodového pláště s nezaskleným vzduchovým kolektorem:

- I. exteriér (nasávaný vzduch)
- II. perforovaný tmavý plech (absorbér)
- III. vzduchová dutina podtlakově nuceně odvětrávaná, tl. 20cm
- IV. neprůsvitná konstrukce v obvodové stěně
- V. interiér



Zdroj: Conserval Engineering Inc. <http://www.solarwall.com/home>

9.8. SOLÁRNÍ SYSTÉMY S VODNÍM OBĚHEM PRO VYTÁPĚNÍ A TUV

Tovární výrobky a systémy jsou na stavbě pouze montované. Výrobky se strojírenskou průmyslovou přesností tedy garantují lépe své parametry. Jedná se o systémy rozšířené, odzkoušené a technicky vyzrálé. Konstrukčně existuje možnost instalace kolektorů jako fasádních a střešních panelů přímo do kompletačních konstrukcí obvodového pláště.

- solární podíl z celkového tepla na TUV je až 70%
- solární podíl z celkového tepla na TUV a vytápění je 25%;
tj. z toho samostatně solární podíl z tepla na vytápění je 10-20%
tj. z toho samostatně solární podíl z tepla na TUV je 50-80%
- **možnost energie akumulovat do zásobníku,**
- zásobníky s teplotním rozvrstvením a integrovaným plynovým nebo elektrickým vytápěním
- snaha o krátký kolektorový okruh mezi akumulátorem a kolektorem z důvodu omezení tepelných ztrát, rozvody a systém tepelně izolovat
- pozornost při návrhu tepelného výměníku v okruhu

Konstrukční možnosti solárních kolektorů:

- zasklený
- zasklený zásobníkový (opatřen TI)
- vakuový trubkový kolektor (finančně nákladný, dosahuje vyšších výkonů – tj. vyšších teplot)
- nezasklený absorbér

9.8.1. Tabulka relativních tepelných zisků solárního systému dle orientace k obloze

Tabulka relativních tepelných zisků solárního systému za období květen - září v průběhu roku, místo Curych.					
Orientace solárního zařízení					
(stupně) (světové strany)	0° Jih	30° JihoJihoVýchod, JihoJihoZápad	45° JihoVýchod, JihoZápad	60° VýchodoJihoVýchod, ZápadoJihoZápad	90° Východ, Západ
Sklon solárního zařízení (stupně)					
0° (vodorovně)	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %
30°	100 % (referenční)	107 %	105 %	101 %	90 %
45°	101 %	99 %	98 %	97 %	82 %
60°	84 %	84 %	83 %	82 %	71 %
90° (svisle)	33 %	38 %	42 %	45 %	41 %

Orientační hodnoty dimenzování systému pro rodinný dům:

- plocha kolektoru na TUV pro 1 rodinu v 1 rodinném domě je 4 m²
- zásobník vody je 300-400 litrů

Orientační hodnoty dimenzování systému pro bytový dům:

- plocha kolektoru na předehřev TUV v bytovém domě je 0,5–1,0 m² pro 1 osobu
- zásobník vody je 40-70 litrů na 1 m² kolektorové plochy.

9.8.2. Nezasklené solární systémy s vodním oběhem

Pro názornost je zde uveden odkaz a informace o nezaskleném solárním kolektoru s vodním oběhem ⁽⁴²⁾ pro méně náročné aplikace ohřevu vody:

- plošný absorbér je vyroben z černého plastu s UV filtrem
- voda je vedena v oválných kanálcích (d=58mm) nastavených s delší vyhřívanou stranou proti slunci
- menší náklady na údržbu a opravu
- například pro ohřev vody připadá na 1 m² plochy bazénu přibližně 0,5 m² plochy absorbéru
- systém v našich zeměpisných podmínkách prodlouží dobu možného využití bazénu.



Zdroj: EKOPLAST Stancl s.r.o. <http://www.ekoplast.cz>

9.9. FOTOVOLTAVICKÉ ČLÁNKY

I zde platí, že tovární výrobky a systémy jsou na stavbě pouze kompletované a montované. Výrobky se strojírenskou průmyslovou přesností tedy garantují lépe své parametry. Jedná se o systémy rozšířené, odzkoušené a technicky vyzrálé. Rovněž i zde konstrukčně existuje možnost instalace FV-panelů jako fasádních a střešních prvků přímo do kompletačních konstrukcí obvodového pláště. Navíc zde konstrukčně existuje možnost instalace FV-panelů do hydroizolačních fóliových souvrství střešního pláště ⁽⁴³⁾.

⁴² Solární absorbér - systém pro ohřev vody (http://www.ekoplast.cz/solarni_absorber.htm)

⁴³ FDT (CZ), s.r.o., FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co., Mannheim, SRN (<http://www.fdt.cz/?s=evalonsolar>)



EVALON-Solar, integrovaný hydroizolační a fotovoltaický systém pro ploché střechy, zdroj: FDT (CZ), s.r.o., <http://www.fdt.cz/>

S chlazením FV-panelů roste jejich účinnost. V určité kombinaci lze vzduch, který ochladil panely a tedy sám se ohřál, využít jako předehřátý vzduch ze vzduchového kolektoru.



Zdroj: arch. Rolf Dische Stancl s.r.o. <http://www.rolfdisch.de>

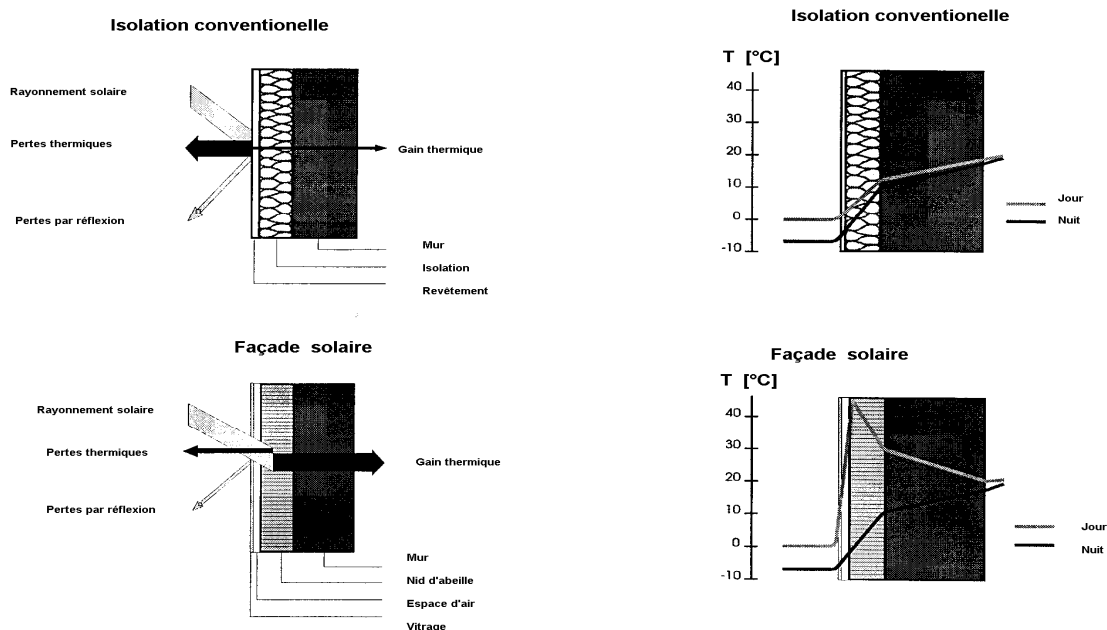
9.9.1. Tabulka relativních tepelných zisků solárního systému dle orientace k obloze

Tabulka relativních zisků FV – panelů v průběhu roku, místo Freiburg.					
Orientace FV – panelů					
(stupně) (světové strany)	0° Jih	30° JihoJihoVýchod, JihoJihoZápad	45° JihoVýchod, JihoZápad	60° VýchodoJihoVýchod, ZápadoJihoZápad	90° Východ, Západ
Sklon solárního zařízení (stupně)					
0° (vodorovně)	94 %	94 %	94 %	94 %	94 %
30°	100 % (referenční)	98 %	95 %	93 %	88 %
45°	98 %	96 %	92 %	90 %	84 %
60°	92 %	88 %	88 %	85 %	78 %
90° (svisle)	72 %	71 %	70 %	67 %	60 %

9.10. TEPELNÁ IZOLACE POMOCÍ SOLÁRNÍ ENERGIE

Solárně zahřátá vrstva teplého vzduchu v dutině snižuje tepelné ztráty konstrukce. Ohřátý vzduch na straně exteriéru u pláště konstrukce snižuje rozdíl teplot mezi stranami konstrukce interiéru a exteriéru. Tepelná ztráta (tepelný tok) je přímo úměrná rozdílů okrajových teplot.

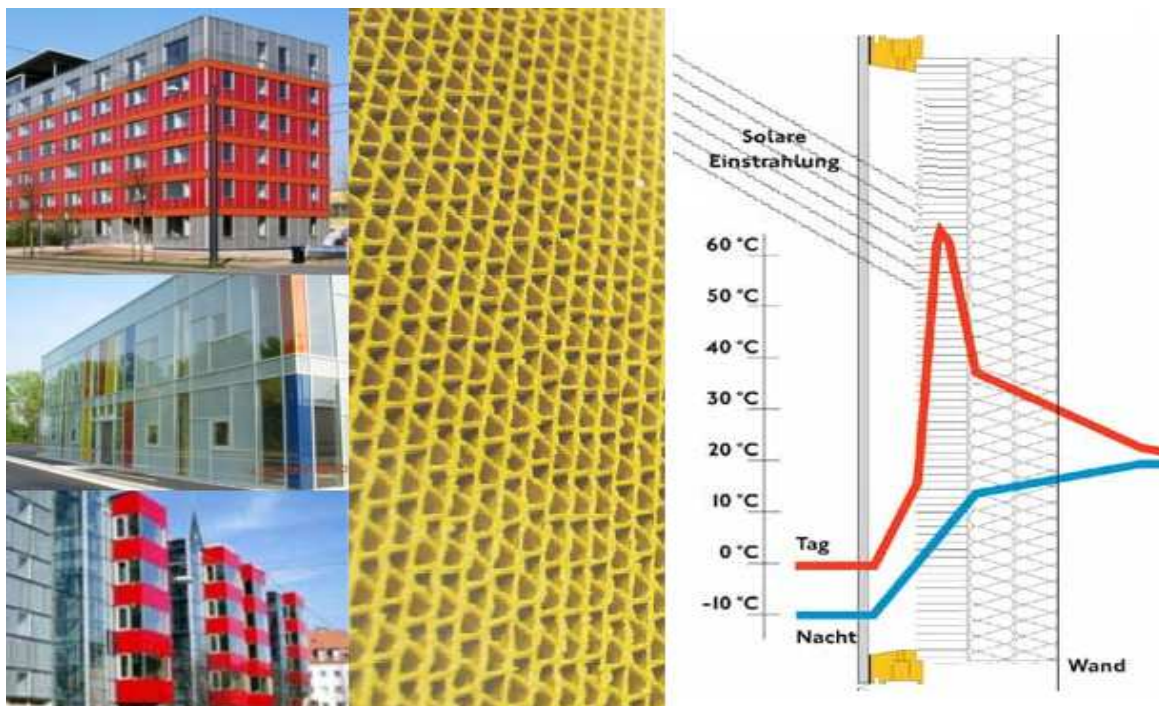
9.10.1. Zasklená tepelná izolace



Zdroj: PROMES NEWS <http://www.promes.ch>

Skladba obvodového pláště se zasklenou tepelnou izolací z exteriéru do interiéru:

- I. exteriér
- II. zasklení tl. 4, 6, 8mm
- III. neprovětrávaná vzduchová dutina („skleníkový efekt“) tl. 35mm
- IV. varianty tepelné izolace:
 - a) transparentní tepelná izolace (umožní zateplené obvodové stěně tepelně-akumulační funkci)
 - b) tepelná izolace z kartónových voštin tl. 80mm (materiál je absorbérem slunečního záření)
- V. obvodová stěna (v případě stěny bez tepelně-akumulační funkce se může jednat i o sendvičové konstrukce s vnitřní tepelnou izolací)
- VI. interiér



Zdroj: GAP-SOLAR GmbH <http://www.gap-solar.at>

Princip fungování fasády v případě celulózových voštin⁽⁴⁴⁾ je založen na skutečnosti, že nízké zimní slunce pronikne dovnitř do fasádních voštin, kde se vytvoří teplá zóna. Ve fasádě s jižní orientací může teplota dosáhnout až 80 °C. Voštiny působí jako tepelný akumulátor. Vhodné jsou do klimatických podmínek, kde dny se silným mrazem jsou převážně slunečné a dny se zataženou oblohou mají mírnější klima. Fasády fungují i při difúzním denním světle a lze je tedy umístit i na severní strany. V letním provozu se konstrukce nepřehřívá, protože slunce se do komůrek nedostane.

9.10.2. Zasklená dvojitá fasáda

Skladba obvodového pláště se zasklenou dvojitou fasádou z exteriéru do interiéru:

- I. exteriér
- II. zasklení⁽⁴⁵⁾
- III. vzduchová dutina tl. 10-60 cm („skleníkový efekt a tepelně vyrovnávací zóna“), v zimním provozu možný odběr předehřátého vzduchu
- IV. obvodová stěna se stávajícími zasklenými stavebními otvory
- V. interiér

Konstrukční možnosti:

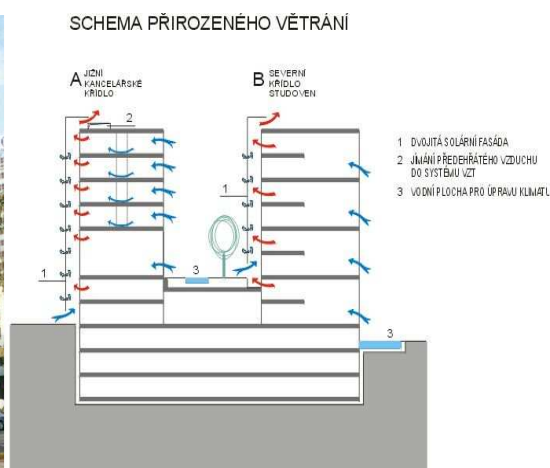
- poměr plochy celkového zasklení k otvíravé ploše pro odvětrání je 5:1
- jedná se o cenově nejnákladnější řešení
- v provětrávané dutině lze užít sdružené shrnovací žaluzie s nastavitelným stíněním clony nezávisle v horní a dolní části, kde:
 - horní část slouží pro regulaci světla dopadajícího do hloubky místnosti
 - spodní část, např. textilie, slouží k regulaci světla v blízkosti prostoru okna (v tomto případě je omezen volný výhled).

⁴⁴ Liga Ekologických Alternativ, Ekosídliště Solar City, Rakousko, Linec (<http://www.lea.ecn.cz/02linz.html>)

⁴⁵ například: www.pilkington.com



Moravská zemská knihovna, Ing. Tomáš Adámek, Ing. Petr Benedikt, Brno, 2001



9.10.3. Dvojitá fasáda se vzduchovým kolektorem

Střešní vzduchové kolektory vytvářejí teplý vzduch, který se nuceným oběhem rozvádí po obvodových konstrukcích.

Dutiny pro rozvod teplého vzduchu o tl. 6 cm jsou stavebně umístěny **mezi** vnějším zateplením obvodového pláště a vlastní obvodovou stěnou na straně interiéru. Obvodová stěna na straně interiéru může mít tedy funkci tepelného akumulátoru a otopného tělesa do interiéru. Optimální poměr plochy střešního kolektoru k ploše fasády je 1:5.

9.11. SHRUTÍ

Jak je v úvodu prezentováno (viz. předchozí kapitola: **Koncepce a ekologické principy ve výstavbě**) je nutné si uvědomit, že solární energetické konstrukce představují pouze jeden z mnoha možných přístupů k ekologickým principům ve stavební výrobě a užívání stavby.



Solární vaň a plochá lineární Fresnelova čočka, zdroj: www.google.cz

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

10. FORMULACE CÍLŮ - ZÁSADY KONSTRUOVÁNÍ Z KŘEHKÝCH MATERIÁLŮ

Základním požadavkem při navrhování technického výrobku je způsobilost a bezpečnost tohoto výrobku vydržet určité zatížení po určitý čas. Pro návrh je zapotřebí:

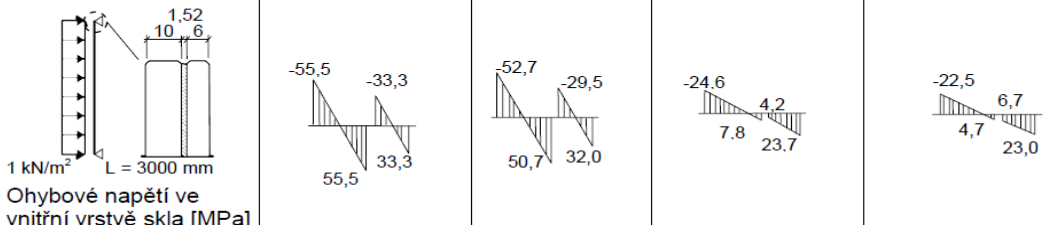
- přesně určit požadavky, fyzikální a pracovní podmínky na konstrukční součástky,
- přesně určit požadavky na životnost, bezpečnost a spolehlivost provozu,
- vybrat vhodný materiál, u kterého jsou známy jeho vlastnosti a chování v předpokládaném prostředí.

Jelikož sklo ve stavební historii nepředstavovalo tradiční konstrukční materiál pro nosné konstrukce, jako tomu je u kamene, dřeva, betonu nebo oceli, dosud **není pro projektanty vydaná návrhová norma pro konstrukční sklo**. Skleněné prvky se podrobují statickým posudkům až v souvislosti s vývojem současné architektonické tvorby. Dimenze skleněných prvků se navrhovaly a navrhují rovněž dle „zkušeností“, tj. dle empirických znalostí výrobců (z materiálových pevnostních zkoušek vzorků a přetěžovacích zkoušek celých výrobků).

V oblasti navrhování konstrukčního skla probíhá stále **výzkum** a posun ve vývoji znalostí a ověřování výpočetních postupů. Na příkladu otázky pevnosti tabulí skla spojených PVB folií:

- ve starší literatuře je uveden přístup, že pevnost slepených tabulí nepřekračuje pevnost jednoduché tabule skla o stejné konečné tloušťce,
- z novějších pramenů lze uvažovat ve výpočtech o tzv. smykovém koeficientu přestupu mezní spojovací vrstvy folie, čímž se v návrhu mezní vrstvě přiznává statické spolupůsobení. Postup vede ke stanovení ekvivalentní tloušťky vrstveného skla, což ve výsledku směřuje k hospodárnějšímu návrhu možné tloušťky skla (tolik nepředimenzované, ale tedy s posunem ze strany bezpečnosti a s menším rezerv blíže k možné poruše),
- jiné novější prameny přisuzují spolupůsobení mezní vrstvě pouze pro případy krátkodobých zatížení, pro trvalé a dlouhodobé zatížení je doporučení uvažovat namáhání tabulí skla samostatně:

Tab. 3 - Vliv modulu ve smyku PVB vrstvy na průhyb a napětí v ohybu ve středu rozpětí u vrstveného bezpečnostního skla s asymetrickou skladbou (10mm / 1,52mm PVB / 6mm)

Délka trvání zatížení [s]	Neznámá	Dlouhá	Krátká < 180 s	Velmi krátká < 10 s
Teplota [°C]	Neznámá	≈ 22	≈ 22	≈ 22
Poznámka	vždy na bezp. straně (bez smykové interakce)	tj. vlastní váha	tj. zatížení poryvem větru	tj. zatížení nárazem, téměř plná interakce smyku
Účinný modul ve smyku G pro PVB fólie [N/mm ²]	0	0,01	1	4
Průhyb ve středu rozpětí f _{max} [mm]	148,7	138,3	44,4	36,9
 <p>Ohybové napětí ve vnitřní vrstvě skla [MPa]</p>	<p>-55,5 -33,3</p> <p>55,5 33,3</p>	<p>-52,7 -29,5</p> <p>50,7 32,0</p>	<p>-24,6 4,2</p> <p>7,8 23,7</p>	<p>-22,5 6,7</p> <p>4,7 23,0</p>

Zdroj: INTRODUCTION ON USE OF GLASS IN MODERN BUILDINGS, W.Laufs, A.Luible, (EPFL), 2003

10.1. OBECNÁ DOPORUČENÍ

Při návrhu je nutné obecně respektovat následující skutečnosti:

- celková deformace výrobku je do lomu pružná, k plastickým deformacím nedochází, tuhost a křehkost tělesa vylučují plastické deformace, materiál by místo plastické deformace reagoval vznikem lomu,
- citlivost na koncentrovaná napětí (vyloučit bodová zatížení například v uložení, kotvení),
- citlivost na vruby:
 - pravděpodobnost výskytu větší vady roste s objemem tělesa,
 - v tělese je zpravidla přítomno velké množství různě velikých trhlin a defektů, jejich velikost a poloha není známá, rozměry poruch jsou v rozmezí 0,001 – 0,01 mm, nelze je snadno pozorovat,
- citlivost na rázová napětí:
 - rázové vlny ve velmi tuhé konstrukci (při zanedbatelných deformacích) vyvolávají vysoká napětí
 - pro účinky rázové vlny v konstrukci je důležitý úhel dopadu rázu
- nízká tepelná vodivost skla:
 - způsobující nízkou/špatnou redistribuci případně lokálně tepelně namáhaného místa,
 - zapříčiňující citlivost skla na teplotní změny v čase (teplotní šoky),
- citlivost k rozdílům teplot (rozdíl teplot ve spojitém skleněném tlustostěnném materiálu nad 30°C představuje už 50% pravděpodobnost porušení),
- křehkost skla, rozptýl hodnot pevnosti, nižší pevnost v tahu/ohybu/krutu, pokles pevnosti s dobou zatížení,
- způsob výroby a výrobní odchylky,
- vyloučit náhlé změny průřezu a změny tloušťky v designu výrobku:
 - vyloučit ostré rohy, ostré kouty a dutiny,
 - ostré tvary usnadňují přechod do vzniku trhliny při napětí,
 - tvary výrobku navrhovat v pozvolných změnách geometrie, zaoblené, plynulých tvarů tak, aby se vyloučila příležitost vzniku místa s koncentrací napětí, například válcová tyč je vhodnější než tyč čtverhranného průřezu,
 - průřezy tenkostěnných profilů symetrického a jednoduchého tvaru jsou vhodné a odolné pro aplikace, ve kterých jsou prvky vystaveny působení stacionárního a nestacionárního teplotního pole,
- vzájemné styčné plochy ve spojích skleněných výrobků navrhovat hladké, s přesnou geometrií, dostatečnými rozměry a zaoblenými okraji,
- drsné styčné plochy zatížené vnějšími silami nebo nečistoty mezi styčnými zatíženými plochami hrozí vznikem vrypu, tedy vniku poruchy, které může přejít do lomu.
- zajistit poddajnost celé konstrukce rozměrovými dilatacemi:
 - působením pružin ve spojích, aplikací polohové rektifikace uložení a ukotvení,
 - pro kompenzaci tvarových změn a deformací tepelně namáhaných dílů je nutné aplikovat v konstrukční sestavě prvky umožňující právě délkovou dilataci,
 - z výše uvedeného jasně vyplývá nutnost aplikace pružných podložek (plast, guma, teflon) mezi sklem a např.kovovými kotvami. U tlačných spojů lze použít podložek z hliníkových/ocelových slitin.

Například při navrhování a výrobě skleněných prvků je pro dosažení minimální chybovosti výhodné dosáhnout jednoduché výroby, která zanechává ve výrobku méně vad. Sestavy složitějších tvarů je proto vhodné vyrábět po jednotlivých dílech samostatně. Uvedený postup souvisí se skutečností, že s rostoucími rozměry tělesa se zvyšuje pravděpodobnost výskytu větších vad v tělese. Výskyt vady ve složitém monolitickém tělese vyřadí z provozního nasazení celé toto těleso. Výskyt vady v určitém prvku sestavy vyžaduje výměnu pouze vadného prvku a ne všech dílů z celé sestavy.

10.2. BEZPEČNOST PROVOZU

Na vyrobené předměty sériové produkce se aplikují **přetěžovací zkoušky**, nebo-li také úvodní vyřazovací zkoušky (angl.: proof test nebo heat soak test):

- všechny vzorky nebo výrobky se před prvním uvedením do provozu vystaví určitému zkušebnímu zatížení (**mechanickému** nebo **teplotnímu**), které je vyšší než zatížení provozní. Výrobky s nepřipustnými defekty se sami při zkoušce zničí. Tato praktická metoda se aplikovala ještě před rozvojem znalostí lomové mechaniky.
- bezpečnostní poměr mezi zkušebním a provozním napětím představuje rezervu pro únosnost, životnost a bezpečnost užívání výrobku.
- pokud používaný výrobek překročil v provozu svou vypočtenou životnost, lze jej podrobit nové přetěžovací zkoušce. Pokud vyhoví, může být opět nasazen do provozu.
- procedura přetěžovací zkoušky je ovlivněna volbou bezpečnostního poměru a dalších experimentálně stanovených hodnot. Procedura je stále sledována z hlediska průběžné kontroly statistického rozptylu vzorku.

Například při realizaci střešního zasklení na projektu Nile House, River City Prague, Praha 8 – Karlín se všechna kalená skla pro střešní konstrukci dvojskla (ve skladbě 12 mm vnější kalené sklo – 16 mm mezera – 12 vnitřní lepené sklo, tj. dvě 6 mm skla spojená PVB folií) vystavila ve speciální komoře teplotě 280 °C pro dobu 240 min.

Vnější kalené sklo zajišťuje odolnost proti vnějším klimatickým vlivům (kroupy, vítr, sníh, aj.). Vnitřní lepené sklo v případě poruchy a rozrušení neohrozí uživatele padajícími střepy.

Testu byla vystavena i staticky účinná vnitřní skleněná žebra fasády v tl. 25 mm, která přenášejí v konstrukci vodorovné síly a která jsou slepena ze dvou kalených 12mm tl. desek spojených 1,5 mm PVB folií.

10.3. VÝPOČTOVÉ POSTUPY

S ohledem na **specifické** mechanické a statické **chování** skla, s ohledem na mechanismus jeho porušení a z toho vyplývající **rozptyl hodnot** statické **únosnosti** lze ke statickému návrhu a výpočtu skleněných prvků přistupovat následovně:

- výpočtem **dovolených namáhání** ve skle, který je založený na principu bezpečnostních přetěžovacích zkoušek. Koeficient bezpečnosti, tj. poměr mezi charakteristickým napětím skla (zjištěným experimentálně destruktivní zkouškou pevnosti) a navrhovaným dovoleným namáháním skla, se pohybuje v rozmezí hodnot 2,5 – 3.



- podrobným výpočtem **pravděpodobnosti poruchy** dle metod lomové mechaniky, tj. stanovení pravděpodobnosti poruchy při známém zatížení, působícím prostředí, způsobu výroby a vypočtených vnitřních napjatostí.
- výpočtem **mezních stavů** únosnosti a použitelnosti pomocí ověřených empirických nebo orientačních tabulek a vzorců, event. podrobným výpočtem MKP.

Následně je uveden příklad vzorce z předběžné navrhované normy (DIN) prEN 13474-1, 2, 3. Glass in building - Design of glass panes pro výpočet **mezního stavu únosnosti** s použitím dílčích součinitelů zatížení a spolehlivosti podle Eurokódů (EN).

Za současného stavu, kdy není k dispozici pro projektanty vydaná platná návrhová norma pro konstrukční sklo (Eurokód pro nosné konstrukce ze skla), je právě tato předběžná norma výsledkem práce technické komise CEN/TC 250, přesněji – její jedné pracovní skupiny WG3 (pod vedením prof. G. Sedláčka, Německo).

Ve výpočtu je užito efektivního napětí, prezentující vážený průměr hlavních napětí na povrchu skla, a pevnosti tahu skla, a to s vlivem na velikost a kvalitu povrchu skla a dále s vlivem doby zatížení a klimatické (národní) podmínky:

$$\sigma_{eff} \leq f_{g,d},$$

$$f_{g,d} = \left(k_{mod} \frac{f_{g,k}}{\gamma_M k_a} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_V} \right) \gamma_N,$$

- σ_{eff} efektivní napětí,
- $f_{g,d}$ návrhová pevnost,
- k_{mod} vliv délky trvání namáhání,
- $f_{g,k}$ charakteristická hodnota pevnosti skla,
- γ_M dílčí součinitel spolehlivosti skla,
- k_a vliv velikosti povrchu skla,
- $f_{b,k}$ charakteristická hodnota pevnosti skla pro předepnuté sklo,
- γ_V dílčí součinitel pro předpětí,
- γ_N národní součinitel spolehlivosti.

Další tabulka představuje z literatury převzaté orientační vzorce pro výpočet maximálního tahového napětí ve skle s ohledem na rozdílný způsob podepření a zatížení:

Příklady odvozených vzorců pro orientační výpočet σ, tj. maximálního tahové napětí v tabuli plochého skla	
Zdroj: Pevnost plochého skla - 2. část, M.Víth, V.Novotný, Technika, technologie, vydání 17/2006	
zatěžovací stav:	Tabule podepřená na dvou koncích a zatížená jednou symetricky působící silou
vzorec:	$\sigma = 3 \times P \times l / 2 \times b \times t^2$
poznámka:	σ = maximální napětí / MPa / P = gravitační síla odpovídající hmotnosti břemena / N / l = vzdálenost mezi podpěrami / mm / b = šířka tabule / mm / t = tloušťka tabule / mm / Maximální tahové napětí vzniká pod břemenem na povrchu protilehlém tomuto břemeni, vlastní tíha skla zanedbána
zatěžovací stav:	Tabule zatížená na dvou koncích, zatížená dvěma symetricky působícími silami
vzorec:	$\sigma = 3 \times P \times a / b \times t^2$
poznámka:	a = vzdálenost mezi podpěrou a sousedním břemenem / mm / Maximální tahové napětí vzniká mezi břemeny na povrchu tabule protilehlém těmto břemenům a je konstantní v celé oblasti mezi břemeny, vlastní tíha skla zanedbána
zatěžovací stav:	Tabule podepřená na dvou koncích, zatížená vlastní hmotností
vzorec:	$\sigma = 3 \times Q \times L / 8 \times b \times t^2$
poznámka:	Q = gravitační síla odpovídající hmotnosti tabule / N / L = délka tabule / mm / Maximální tahové napětí vzniká na spodním povrchu uprostřed mezi podpěrami
zatěžovací stav:	Tabule podepřená na dvou koncích, zatížená jednak vlastní hmotností a jednak spojitě zatížená hmotností na ní položené tabule resp. sněhem apod.
vzorec:	$\sigma = 3 \times Q_1 \times L / 4 \times b \times t_1^2 + 3 \times Q_2 \times L / 8 \times b \times t_2^2$
poznámka:	Q ₁ = gravitační síla odpovídající hmotnosti horní tabule / N / Q ₂ = gravitační síla odpovídající hmotnosti dolní tabule / N / t ₁ = tloušťka horní tabule / mm / t ₂ = tloušťka dolní tabule / mm / L = délka tabulí / mm / Maximální tahové napětí vzniká uprostřed mezi podpěrami na spodním povrchu dolní tabule.

zatěžovací stav:	Tabule podepřená ve středu, zatížená vlastní hmotností, okraje nepodepřené
vzorec:	$\sigma = 3 \times Q \times L / 4 \times b \times t^2$
poznámka:	L = délka tabule / mm / Maximální tahové napětí vzniká na horním povrchu tabule nad podpěrou
zatěžovací stav:	Tabule zatížená ve středu, okraje nepodepřené, zatížená jednak vlastní hmotností, jednak spojitě zatížená hmotností na ní položené tabule resp. sněhu apod.
vzorec:	$\sigma = 3 \times Q_1 \times L / 2 \times b \times t_1^2 + 3 \times Q_2 \times L / 4 \times b \times t_2^2$
poznámka:	Q ₁ = gravitační síla odpovídající hmotnosti horní tabule /N/ Q ₂ = gravitační síla odpovídající hmotnosti dolní tabule /N/ t ₁ = tloušťka horní tabule / mm / t ₂ = tloušťka dolní tabule / mm / L = délka tabulí / mm / Maximální tahové napětí vzniká na horním povrchu dolní tabule nad podpěrou.
zatěžovací stav:	Tabule vetknutá na jednom konci, zatížená vlastní hmotností
vzorec:	$\sigma = 3 \times Q_3 \times L / 2 \times b \times t^2$
poznámka:	L = délka tabule od místa vetknutí / mm / Q ₃ = gravitační síla, odpovídající hmotnosti tabule od místa vetknutí /N/ Maximální tahové napětí vzniká na horním povrchu v místě vetknutí
zatěžovací stav:	Tabule vetknutá na jednom konci, zatížená jednak vlastní hmotností, jednak spojitě zatížená hmotností na ní položené tabule resp. sněhu apod.
vzorec:	$\sigma = 3 \times Q_1 \times L / b \times t_1^2 + 3 \times Q_3 \times L / 2 \times b \times t_2^2$
poznámka:	L = délka dolní tabule od místa vetknutí / mm / Maximální tahové napětí vzniká v místě vetknutí na horním povrchu dolní tabule.
zatěžovací stav:	Tabule vetknutá na jednom konci, zatížená jednak vlastní hmotností, jednak jednou symetricky působící silou P na volném konci
vzorec:	$\sigma = 6 \times P \times L / b \times t^2 + 3 \times Q_3 \times L / 2 \times b \times t^2$
poznámka:	P = gravitační síla odpovídající hmotnosti břemene /N/ Maximální tahové napětí vzniká v místě vetknutí na horním povrchu tabule.
zatěžovací stav:	Tabule podepřená na všech čtyřech okrajích, zatížená vlastní hmotností
vzorec:	$\sigma = \alpha \times Q \times \pi^2 \times b / 2 \times 16 \times t^2 \times L$
poznámka:	α = koeficient závisící na poměru délky tabule na její šířce (L / b) Maximální tahové napětí vzniká na dolním povrchu tabule v jejím těžišti.
zatěžovací stav:	Tabule podepřená na všech čtyřech okrajích, zatížená jednak vlastní hmotností, jednak spojitě zatížená např. hmotností na ní položené tabule resp. sněhu, vody apod.
vzorec:	$\sigma = \alpha \times \pi^2 \times b \times (Q_1 / t_1^2 + Q_2 / 2 \times t_2^2) / 16 \times L$
poznámka:	Q ₁ = gravitační síla odpovídající hmotnosti horní tabule / N / Q ₂ = gravitační síla odpovídající hmotnosti dolní tabule /N/ t ₁ = tloušťka horní tabule / mm / t ₂ = tloušťka dolní tabule / mm / L = délka tabulí / mm / Maximální tahové napětí vzniká na dolním povrchu dolní tabule v jejím těžišti
zatěžovací stav:	Tabule zakřivená vlivem vnějších sil
vzorec:	$\sigma = E \times t / 2 \times r$
poznámka:	σ = maximální napětí / MPa / E = Youngův modul pružnosti daného skla / MPa / t = tloušťka tabule / mm / r = poloměr zakřivení / mm / Působením vnějších sil může dojít k deformaci a zakřivení tabule, např. při přitahování tabule k mírně zakřivené konstrukci nebo při přitahování ohýbaného plochého skla ke konstrukci s poněkud odlišným zakřivením. Maximální tahové napětí vzniká na vypuklém povrchu tabule.
vzorec:	vztah mezi průhybem tabule, tětvou oblouku a poloměrem zakřivení: $h = r - (r^2 - a^2 / 4)^{1/2}$
poznámka:	h = průhyb tabule / mm / r = poloměr zakřivení tabule / mm / a = tětiva oblouku / mm /

Pro informaci k dalším výpočetním způsobům lze odkázat na dostupné informační prameny ⁽⁴⁶⁾.

Pro **mezní stavy použitelnosti** lze jako orientační hodnoty uvést následující přehled, který vychází z hodnot pro ocelové konstrukce:

Tab. 6 - Limitní průhyby podle [15]

Druh skla	Typ liniových podpor	Limitní průhyb	definice
Jednoduché sklo		$f \leq L/100$	L – rozpětí ve směru hlavního přenosu zatížení
Izolační skleněný dílec	čtyři strany	$f \leq L/100$ $f \leq d$	d – tloušťka skla ^{*)}
	dvě nebo tři strany	$f \leq L/100$ $f \leq d$ $f \leq 8 \text{ mm}$	L – délka volného okraje skla d – tloušťka skla ^{*)}
*) jmenovitá tloušťka skla pro dílce z vrstveného bezpečnostního skla je $d = \sqrt[3]{d_1^3 + d_2^3}$			

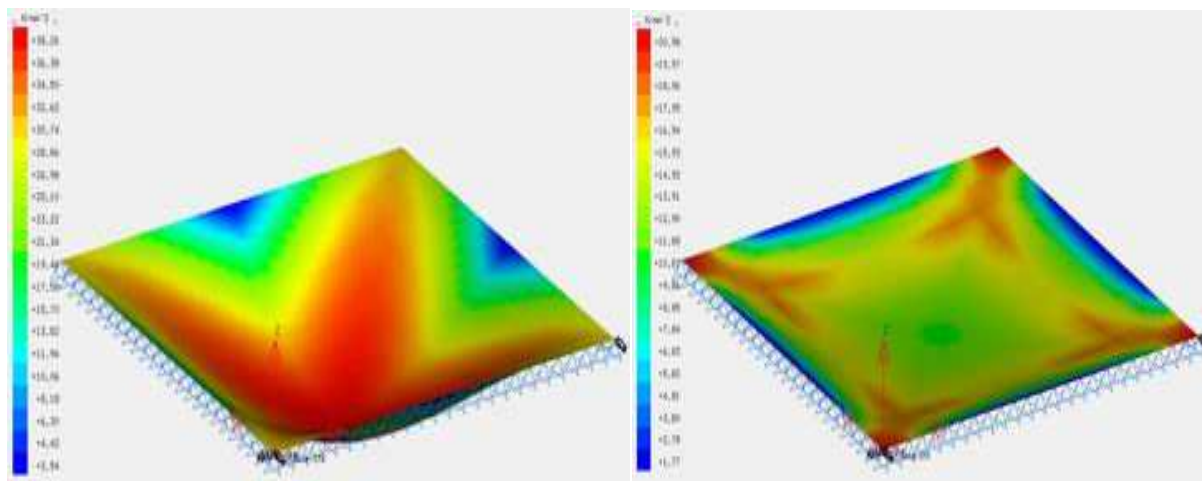
Zdroj: INTRODUCTION ON USE OF GLASS IN MODERN BUILDINGS, W.Laufs, A.Luible, (EPFL), 2003

Podle výpočetních metod pružnosti a pevnosti lze obecně napjatost a deformaci desek řešit podle následujících kritérií (tj. nezahrnujíc poznatky řešení dle lomové mechaniky):

- **Tlusté desky ($1/10 < h/l < 1/5$, h – tloušťka desky, l – rozpětí) -**
Průhyby desek jsou pro celkovou tuhost minimální, prodloužení v radiálním směru po deformaci je zanedbatelné, stejně jako membránová napjatost. Ohybová napětí nejsou řádově vyšší než smyková (viz tlusté pruty), je nutno uvažovat namáhání ohybem i smykem. Normály ke střednicové ploše se natáčejí a deformují. Mindlinova teorie vychází ze zjednodušeného předpokladu, že normály ke střednicové ploše zůstávají přímé, ale nikoli kolmé ke střednicové ploše. V technické praxi málo běžný případ.
- **Tenké desky s malými průhyby (středně tlusté, $1/50 \sim 100 < h/l < 1/10$, h – tloušťka desky, l – rozpětí) -**
U těchto desek jsou smyková napětí zanedbatelná ve srovnání s normálovými, a proto namáhání smykem se zanedbává. Průhyb desky je malý ($w < l/300$, $w < h/10$) tak, aby napjatost byla řešena jako geometricky lineární. Kirchhoffova teorie desek předpokládá zachování kolmosti a lineárnosti normál ke střednicové ploše. V důsledku malých deformací je prodloužení v radiálním směru po deformaci zanedbatelné, stejně jako membránová napjatost. Uvažují se pouze napětí ohybová (rozložená lineárně po tloušťce s nulou na střednicové ploše). V technické praxi nejjednodušší a nejčastější případ.
- **Tenké desky s velkými průhyby ($1/80 \sim 100 < h/l < 1/50$, h – tloušťka desky, l – rozpětí) -**
U těchto desek je jejich tuhost a tloušťka ještě nižší než v předchozím případě. Průhyb desky je v rozmezí $h/4 < w < 5h$, a proto je napjatost řešena jako geometricky nelineární. Membránovou napjatost nelze zanedbat.
- **Membrány ($h/l < 1/50 \sim 100$, h – tloušťka desky, l – rozpětí) -**
U těchto desek pro celkové rozměry vůči tloušťce lze jejich ohybovou tuhost zanedbat. Uvažují se pouze namáhání na tah. Průhyb desky/membrány je $w > 5h$.

Volba výpočetního modelu má samozřejmě dopad na stanovení návrhové tloušťky skla se snahou o její hospodárný návrh. To znamená, že tabule skla není „příliš“ naddimenzovaná na straně bezpečnosti, ale je tedy blíže s menší rezervou k možné poruše.

⁴⁶ Např. - Multifunkční zasklení 5 – Pevnost skla a jeho statický návrh, Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 17.7.2008, (<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-5-Pevnost-skla-a-jeho-staticky-navrh.html>)



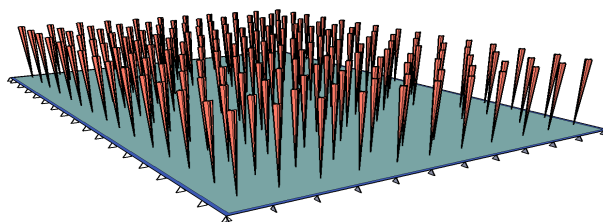
Porovnání vizualizací statického namáhání desky skla:
vlevo - namáhané ohybem, vpravo - membránově působící desky
<http://www.sazovsky.cz/novinky/spravny-navrh-tloustky-skla/>

Souvislost s neexistující normou pro nosné konstrukce ze skla je dobré vidět i v relaci právních vztahů, např. smlouvy o dílo mezi architektem/projektantem/dodavatelem a klientem a z toho vyplývajících rizik.

Například ve velkých projektech/dodávkách, kdy není k dispozici při podpisu smlouvy o dílo realizační dokumentace, ale pouze zadávací dokumentace (která nemusí splňovat legislativní podmínky dle Stavebního zákona ČR), může následné vypracování realizační dokumentace vyvolat změny v projektu v souvislosti s návrhem konstrukčních prvků ze skla/staticky exponovaných skleněných výplní. S ohledem právě na neexistující normu pro nosné konstrukce ze skla jsou tyto změny a vícenáklady hůře obhajitelné, protože projektant nemá oporu vydané (neexistující) normy a investor nemá k dispozici nástroj na kontrolu a posouzení hospodárnosti změny návrhu.

10.4. PŘÍKLAD JEDNODUCHÉHO VÝPOČTU

Výpočet ploch, tloušťek a pevností skleněných výplní
dle Centre scientifique et technique de la Construction (CSTC) – Belgie



y (ozměr skleněné výplně) = 3,9 m
 x (ozměr skleněné výplně) = 2,7 m
 objemová hmotnost= 2 500,0 kg/m³
 plošná hmotnost= 20,0 kg/m²
 tl.= 8,0 mm

h (návrhová tloušťka skleněné tabule) = 8,000 mm
 σ_{Po} (lomové napětí u tvrzeného skla) = 120,0 MPa = N/mm²
 a (nejkratší rozměr skleněné výplně) = 2 700 mm
 b (rozměr delší strany skleněné výplně) = 3 900 mm
 poměr **b/a** = 1,444
k (součinitel bezpečnosti proti zlomu u tvrzeného skla) = 4,0
 β (součinitel tvaru b/a dle způsobu uložení) = 0,6733 (dle tab.)

Fk (plošné zatížení charakter.) = 0,000200 N/mm² (pouze vl.tíha)
 součinitel bezp. stálého zatížení 1,1
Fg (plošné zatížení návrhové) = 0,000220 N/mm²

$$h = a \cdot \beta \sqrt{\frac{F \cdot k}{\sigma_{Po}}}$$

h výpočtová = **4,694 mm**
 tl.tabule skla vyhovuje, protože platí **h** výpočtová < **h** návrhová

průhyb skleněné výplně podepřené na čtyřech stranách:

α (součinitel tvaru b/a dle způsobu uložení) = 0,0770 (dle tab.)
E (modul pružnosti v tahu E u křemičitých skel) = 72,0 GPa
E (modul pružnosti v tahu E u křemičitých skel) = 72 000,0 N/mm²

$$y = \frac{\alpha \cdot (0,9)^2 \cdot F \cdot a^4}{E \cdot h^3}$$

y = **19,78 mm**
 průhyb tabule skla vyhovuje, protože platí **y** < **L/100**
L (směr hlavního přenosu napětí, tj. menší z rozměrů tabule) = 2 700,0 mm
L/100 = **27,0 mm**

10.5. SOUHRN DOPORUČENÍ

- Konstrukční sklo působící samostatně navrhovat výjimečně, tj. navrhovat výjimečně bez sekundární statické podružné k-ce z oceli, dřeva, aj..
- Navrhovat konstrukční sklo spolupůsobící s podružnou (ocelovou) konstrukcí (rámy, táhla, předpínané k-ce v podobě sloupků, skleněné příhradoviny, zakřivených lomených ploch).
- Uložení konstrukčního skla má vliv na celkovou pevnost složené konstrukce.
- **Automaticky aplikovat rezervní opatření při porušení skleněné konstrukce**, např. bezpečnostní lanka, vložky, fólie PVB proti úletu skleněných střepů. V literatuře se uvádí rovněž požadavek na zachování celistvosti porušené konstrukce po dobu 24h tak, aby byl zajištěn dostatek času na servisní zásah k provedení výměny a opravy poškozeného dílce.
- Segmentovat složený tvar s ohledem na možnost porušení a následného ne-šíření trhliny. U staticky exponovaného skla není možnost částečného porušení a částečné opravy, tj. při poruše daného segmentu je nutná výměna celého takto poškozeného segmentu z celkové k-ce.
- Obecně u plochého skla používat skladbu dvou tabulí kaleného skla navzájem spojeného PVB fólií.
- Sklo (jako železobeton) je staticky únosný materiál s relativně vysokou vlastní objemovou hmotností.

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

11. ANALÝZA / VYHODNOCENÍ - SMĚŘOVÁNÍ KONSTRUKČNÍHO SKLA, FUTURE KONCEPTY

Tato kapitola prezentuje možné směry vývoje aplikace skla ve stavebnictví a architektuře, které lze stanovit na základě souhrnu informací dle studijních pramenů. Následující členění není univerzální a oblasti členění se mohou významově překrývat. Smyslem je hlavně upozornit a zdůraznit na konkrétní skutečnost / možnost ve vývoji skla.

11.1. TRANSPARENTNÍ ENERGETICKÉ KONSTRUKCE, OPTICKÉ RASTRY

Problematika skleněných transparentních tepelně izolačních konstrukcí a energetických fasád je řešena v předchozí kapitole (viz: **Solární energetické konstrukce**), kde jsou prezentovány stávající možnosti konstrukčních aplikací skla v nízkoenergetické, resp. pasivní výstavbě.

Obecně v souvislosti s vývojem této skupiny staveb lze konstatovat, že v ČR je více realizací a zkušeností z výstavby individuálního bydlení (rodinné domy) ve srovnání s realizacemi vícepodlažních občanských a bytových staveb.

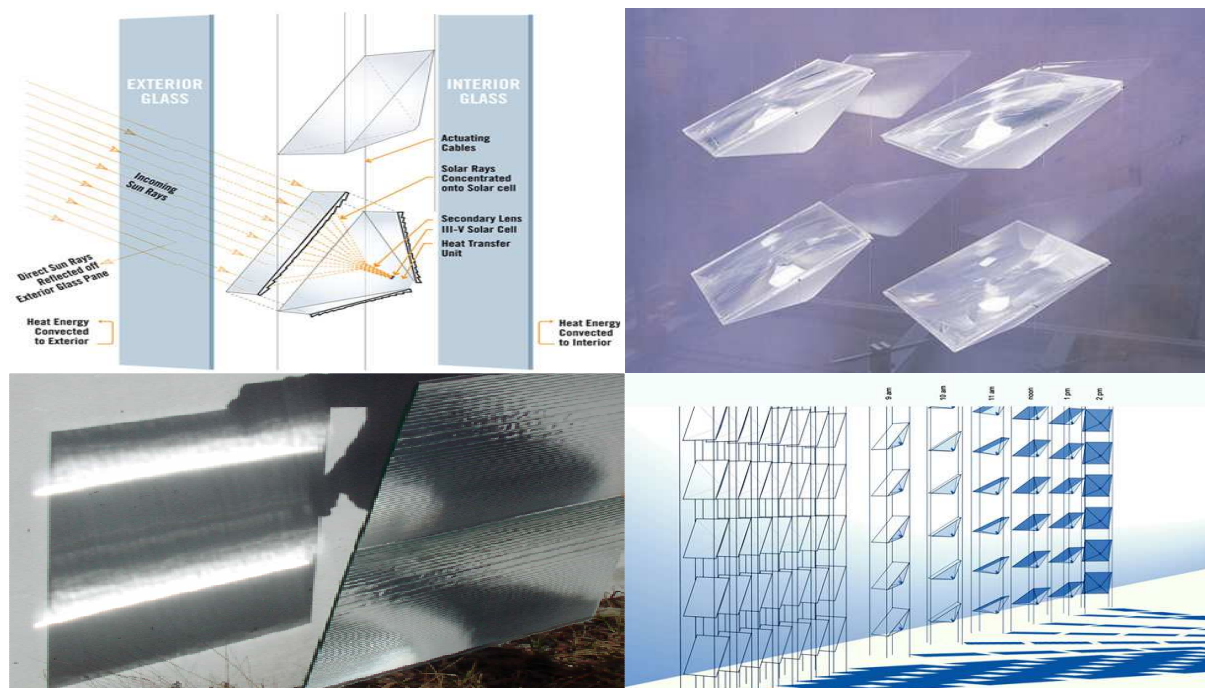
U této skupiny nízkoenergetických a pasivních staveb je právě nasazení skla ve vnějším plášti budovy limitováno, v podobě větších ploch zasklení zimních zahrad nebo francouzských oken atd., s ohledem na hospodárnou pasivní ochranu před letními pasivními zisky a tepelnými ztrátami.

Solární skleněné energeticky „aktivní - ziskové“ konstrukce (např. vzduchové kolektory, sluneční deskové nebo trubkové koncentrátory, zdvojené fasády) nepředstavují „nové neznámé“ koncepce, ale vyžadují aktivní regulační systémy a energii na provoz příslušných chladících / otopných / vzduchotechnických nebo stínících zařízení stavby.

Jako určitou podskupinu v „aktivních – ziskových“ konstrukcích lze zařadit právě optické rastry. Tyto prvky v podobě samostatných koncentrátorů nebo jako součást fasádního systému soustřeďují optickým lomem procházející světlo do konkrétního místa, kde je umístěn fotovoltaický článek nebo tepelný absorber. V případě fasád dále do interiéru neproniká přímé sluneční světlo (tj. funkce sluneční clony) a soustředěná energie na FV články nebo tepelné výměníky umožňuje dosahovat vyšších účinností energetických transformací.



Sklo v těchto sestavách opticky funguje v podobě ploché liniové pásové nebo segmentové Fresnelovy čočky, event. jako samostatné optické hranoly pro lom světla.



Jako jiný příklad samostatného sofistikovaného a integrovaného řešení solární energeticky „aktivní - ziskové“ konstrukce lze uvést stavebnicový fasádní modul, který v sobě slučuje:

- okenní prostup v otevírané části pláště,
- stínící jednotku ve formě žaluzie nebo průsvitného panelu, který se vysouvá z pouzdra neprůhledné části pláště do prostoru otevírané části pláště s okenním prostupem,
- FV panel integrovaný do prostoru otevírané části pláště s okenním prostupem, volitelně FV panel integrovaný do stínícího výsuvného průsvitného panelu,
- VZT a klimatizační lokální decentralizovaný modul s tepelně akumulací schopností (nočního vychlazení větraných prostor), který je integrovaný v parapetní části fasádního pláště a v neprůhledné části pláště. VZT a klimatizační jednotka má nasávání a výdech vzduchu přímo na fasádu do exteriéru a obsluhuje výměnu vzduchu příslušných interiérových prostor s určitou omezenou účinností do příslušné hloubky dispozice / traktu.



11.2. MATERIÁLOVÉ A KONSTRUKČNÍ APLIKACE

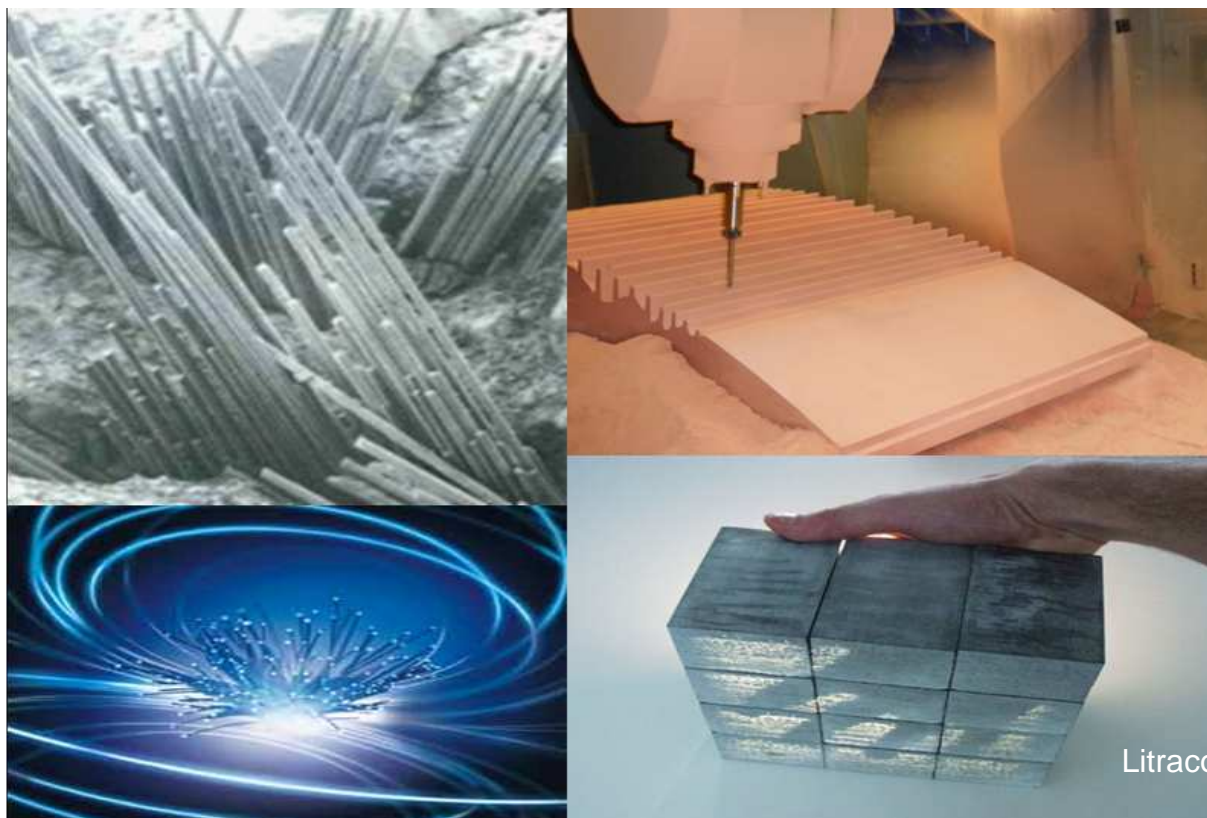
Problematika materiálových aplikací skla je rovněž řešena v předchozích kapitolách (viz: **Sklo jako odpad, Příbuzné aplikace**). Výrazný potenciál skla v tomto ohledu spočívá v možnosti sekundárního využití skleněného odpadu pro výrobu nových stavebních materiálů. V případě pěnových skleněných izolací se nejedná tedy o architektonicko – designově - vizuální aplikaci, ale o vhodnou aplikaci skla v kontextu materiálového cyklu při zachování jeho známých užitných vlastností (vyjma vlastností optických).

Obdobné výhody, spočívající v možnosti recyklace odpadového skla, představuje i výroba slinovaných dekorativních průsvitných panelů. Zde je nutno zdůraznit, že recyklací lze takto zpracovat s menší energetickou náročností i odpad v podobě drcených střepů autoskel nebo odpad v podobě drcených střepů s plastovým nebo papírovým potiskem. Od běžných čistě skleněných střepů zde dochází na energetické a technologické úspore, kdy by se střepty v opačném případě museli očistit od papírových potisků nebo od plastových, pryskyřičných fólií a vrstev pokovení.

V oblasti recyklace a následné výroby stavebních materiálů probíhá stále aplikovaný výzkum (viz rovněž představená idea v úvodní kapitole: **Technologické možnosti a směřování**).



Další nepřehlédnutelnou aplikací skla ve stavebních materiálech představují výztužná skleněná vlákna v cementové matrici, která kromě uplatnění ve staticky exponovaných konstrukcích (např. kolejové betony, průmyslové podlahy) našla uplatnění rovněž v obkladových prvcích (interiéry, fasády, dekorativní dílce).



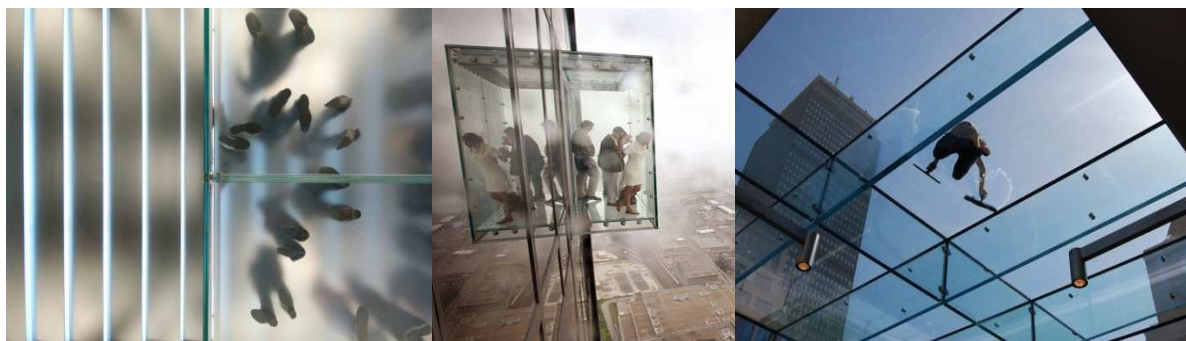
Aplikace optických osvětlovacích vláken je uvedena v předchozích kapitolách pro úplný výčet technických a designových možností.



11.3. TRANSPARENTNÍ ARCHITEKTURA

Problematika v této rovině byla již naznačena a otevřena v úvodní kapitole (viz: **Technologické možnosti a směřování**). Následně jsou v této kapitole uvedeny některé příklady architektonických návrhů, kde sklo představuje dominantní výrazovou složku stavby.

S ohledem na antroposferickou interakci a významovou vazbu „sklo x člověk“ je problematika transparentní architektury řešitelná jak v rovině architektonické, estetické, stavební, statické, tak je možné hledat otázky i v rovině fyziognomické, ergonomické, psychologické a emocionální.



Z konstrukčního hlediska jsou tyto příklady řešení realizovatelné, ale platí, že s určitým omezením do uspořádání konstrukčních detailů s ohledem na stávající technologickou a materiálovou úroveň (viz celá samostatná kapitola **ZÁSADY KONSTRUOVÁNÍ Z KŘEHKÝCH MATERIÁLŮ**), a dále s omezením dle řešení základní problematiky stavební a tepelné fyziky (tepelný odpor, kondenzace, rosení povrchů, tepelné mosty, údržba provozu, atd.).

Právě materiálová otázka ve vývoji například skleněných kompozitů, které v budoucnu potlačí například dosud negativně / rizikově působící křehkost skla, skrývá potenciál pro „odvážnější“ transparentní skleněné kompozice.



La Estancia Gardens, Bunker Arquitectura, Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2007

Další samostatná otázka spočívá v **účelnosti návrhu** transparentní (skleněné) architektury s ohledem na psychické působení a fyziognomické potřeby člověka, tedy uživatelů stavby. Ve vložené obrazové dokumentaci je dáno ke srovnání působení architektury s matovanými, translucenčními, skleněnými prvky, které dominantně zastupují vzhled budovy, vůči aplikaci čistě transparentních čirých skleněných tabulí.



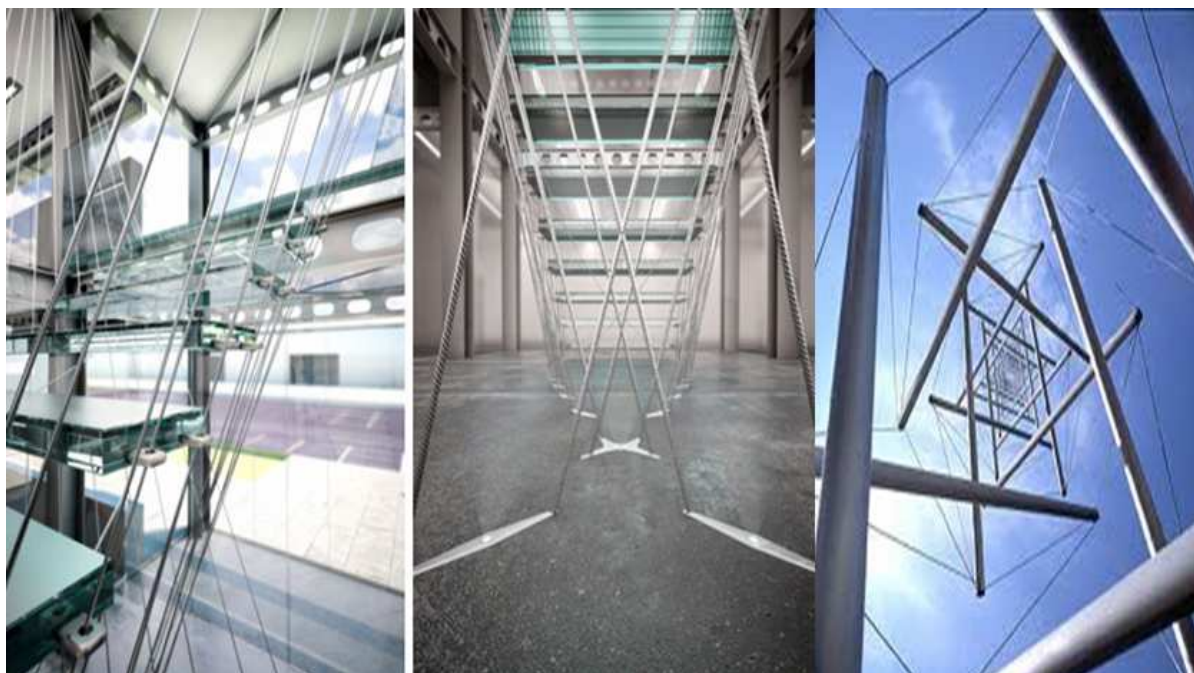
R128 House Designer, Werner Sobek, Stuttgart, Germany, 2000



architektura a design ateliéru Santambrogio, <http://www.santambrogioilano.it/>

Emocionální potřeba soukromí, intimity, pocitu určitého bezpečí a uzavřeného vymezeného prostoru vysoce pravděpodobně bude v protikladu vůči návrhu téměř 100% skleněného objektu zejména v případě individuální výstavby.

Ke zmiňovanému konstrukčnímu hledisku lze uvést zajímavý konstrukčně-koncepční model tensegrity, kde je dosaženo logického uspořádání skla a ostatních konstrukčních dílců. Skleněné prvky / trubice / schodnice představují samozřejmě díly namáhané tlakem. Ostatní ocelové prvky / tyče / táhla / lana jsou tažená.



TENSEGRITY, schodiště jako TENSEGRITY

11.4. INTELIGENTNÍ KONSTRUKCE

Problematika inteligentních transparentních konstrukcí je naznačena v předchozí kapitole (viz: **NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY**), kde jsou prezentovány materiálové a vůbec koncepční možnosti konstrukčních aplikací skla v budoucnosti.

V současnosti jsou například k dispozici a v nabídce na trhu technologie na elektrostatické ovladatelné neprůhlednění a zastínění skla, které je dosaženo integrací polovodičových nebo kovových vrstev do konstrukce zasklení. Pod pojmem inteligentní konstrukce, ve smyslu skleněných prvků s integrovanou elektronikou, lze představit například koncepty venkovních svítidel s aplikovanými vrstvami fotovoltaických článků a LED světelnými zdroji. FV články za denního provozu nabíjejí externí baterie, které v noci napájejí LED osvětlení.



Jinou skupinu možností představuje aplikace zobrazovacích a senzorických vrstev (na principu dotykových obrazovek) do skleněných konstrukčních a designových prvků s datovým napojením na informační sítě a bezdrátové komunikační technologie.

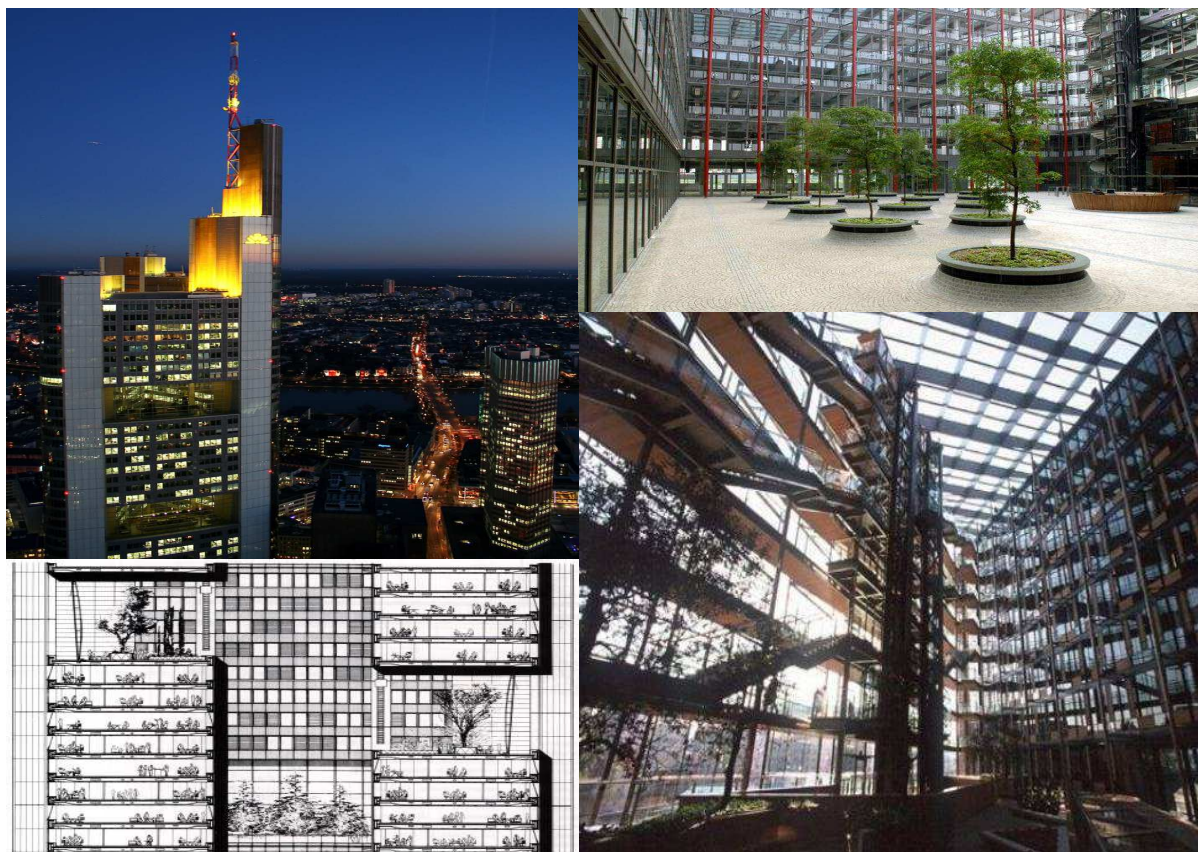


Kromě potenciálu pro bezesporu uživatelské rozšíření v blízké budoucnosti se zde ale nabízí otázka nad možným následným nakládáním, likvidací a eventuelní **recyklací** takto vzniklého sklo-elektronického odpadu od vysloužilých zařízení (?).

11.5. GREEN GLASS TECHNOLOGY

V tomto případě spojení skleněných konstrukcí s živou „zelenou“ hmotou nelze prezentovat jako samostatný proud vývoje, který by byl takto vymezen a například soustavě řešen v odborných pramenech.

Instalace zimních zahrad v prostorách budov pro vyvážení teplot, vlhkosti a mikroklimatu, tj. spolupráce zelené hmoty a transparentních konstrukcí, nepředstavuje neznámou kombinaci v architektuře.



Commerzbank – Frankfurt - Germany, Nille House + Danube House – Karlín - Praha

Jinou aplikaci představují experimentální průmyslové skleněné bioreaktory, kde transparentní obal jednoznačně umožňuje fotosyntézu pěstovaných bakteriálních a rostlinných buněčných kultur (pro výrobu biopaliv nebo pro další energetické produkty). V tomto případě nelze hledat architektonický přístup s harmonickou vazbou k přírodě, také se nejedná o občanské a bytové stavby ale o industriální konstrukce.

Na druhou stranu je zde ale možný potenciál pro aplikaci těchto systémů v bytové a občanské výstavbě v koncepci pro likvidaci odpadních vod (biologické čistírny odpadních vod) a nebo začlenění do oběhu recyklovaných - šedých odpadních vod.



Z hlediska výše uvedeného je představen možný opačný přístup v projektu zelené fasády, kde rostlinný vnější plášť je hydroponicky vyživován zadrženou dešťovou vodou, která je upravována soustavou na fasádě zavěšených skleněných kapkovitých baněk, tj. skleněných bakteriálních bioreaktorů na fotosyntetickou úpravu dešťové vody.

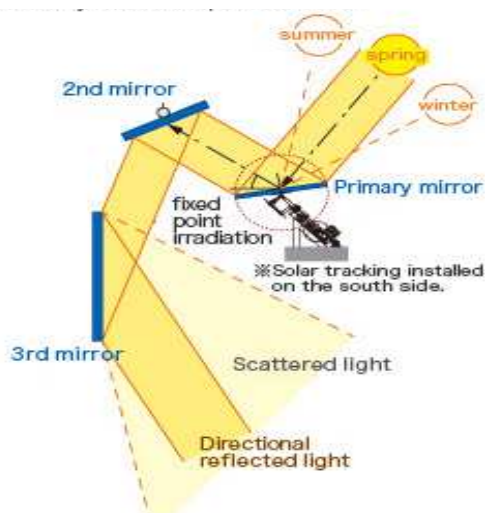


"I" MLOSTIN PARIS, PARIS, FRANCE, 2009, ARCHITECT: R&SIE(N)

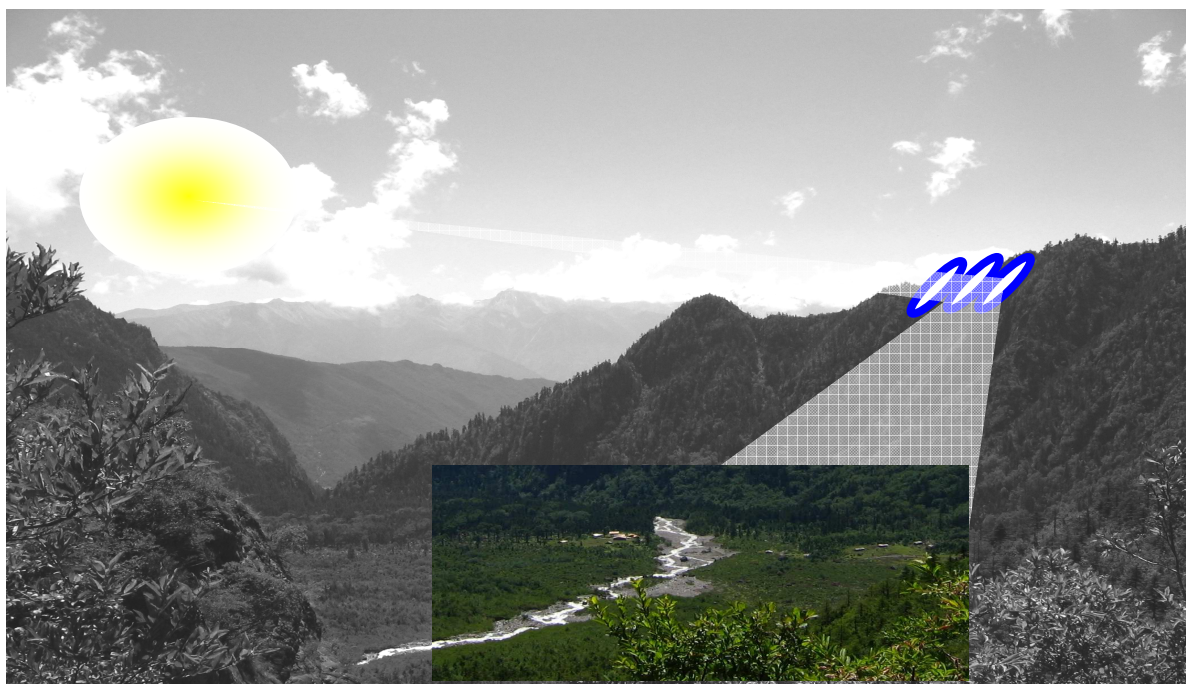
11.6. DISTRIBUCE DENNÍHO SVĚTLA V URBANISTICKÉM MĚŘÍTKU

V rámci designu jednotlivých budov je samozřejmostí s ohledem na hygienické limity a zdravotní požadavky zpracování studie na ověření splnění podmínek denního osvětlení, resp. u bytových projektů i splnění podmínek oslunění.

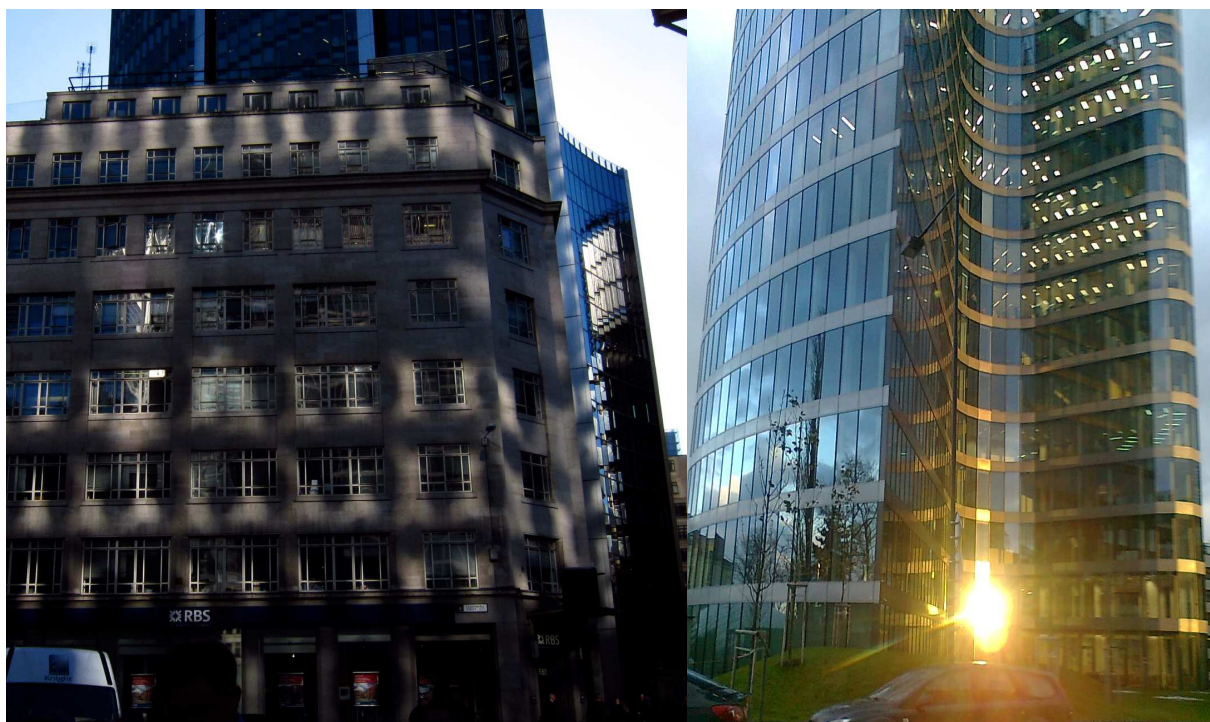
Z výše uvedeného je možné do jednotlivých budov navrhnout a zabudovat systémy pro distribuci denního světla, např. světlovody, světelné šachty, odrazné plochy, světlíky aj.



V rámci aplikovaného výzkumu byly prověřovány i systémy pro distribuci denního světla v urbanistickém měřítku, tj. například pro přeměrování slunečního světla zrcadly z okolních vyvýšených míst do údolního sídelního celku.



K tomu současně v městské zástavbě dochází relativně často k nahodilé, neřízené a nevyužité distribuci denního světla prostřednictvím odrazu slunečního záření vzájemně od skleněných (nebo jiných reflexních) ploch okolní zástavby.



Právě v tomto se nabízí nevyužitý nebo neprověřený potenciál skleněných ploch a fasád ve skupinách urbanistické zástavby, kde by tohoto jevu bylo využito záměrně ke zlepšení podmínek dostupnosti denního světla.

Tato skutečnost může nabrat určité synergie i s ohledem na problematiku řešení energetické náročnosti budov, kde je otázka skupiny urbanistické zástavby prověřována ⁽⁴⁷⁾:

*„...**Prof. Kabele:** Jedním z problémů, jenž vidím, jsou některé matoucí definice. Budovy s téměř nulovou spotřebou energie nejsou budovami energeticky soběstačnými, které realizujeme na odlehlých místech, kde neexistuje napojení na žádné silové sítě a je třeba poměrně nákladným způsobem řešit, jak energii v budově vyrobit, případně ušetřit. Budova s téměř nulovou spotřebou energie je v pojetí, jak já ho chápu, pojem, který se používá pro výstavbu v hustě osídlené Evropě, a není tedy otázkou individuální budovy, ale celého urbanistického celku nebo sídla. Cela Evropa v současnosti pracuje s pojmem Smart Grids, tedy chytrých vzájemně propojených decentralizovaných zdrojů energie. Je snahou, aby se energie, jež v těchto budovách vznikají, případně které se nespotebují, převedly do dalších částí území. Pokud bychom se zaměřili pouze na úroveň jednotlivých budov, budou výsledkem velmi problematické situace. Ty budou pro uživatele neekonomické a pro stát velmi zatěžující. Řešením není zaměřit se jen na samostatné budovy navržené s nízkou energetickou náročností a vybavit je obnovitelnými energetickými zdroji s malou účinností, které budou uživatele sami složitě provozovat. Řešení této, v daném okamžiku komplikované oblasti následně samozřejmě předurčí vývoj celého stavebnictví v ČR. Pokud přijmeme definici, jež povede k rytmu individuálního přístupu, posílí se vývoj určitého typu příslušných technologií. Jiný vývoj nastane, pokud přijmeme definici odlišnou. Nacházíme se tedy v klíčovém okamžiku vývoje stavebnictví v ČR pro příští období...“*

⁴⁷ Transpozice druhé evropské energetické směrnice do českých právních předpisů, diskutující: Ing. Jiří Šála, CSc., Ing. Karel Vaverka, CSc., Marie Báčová, Ing. Roman Šubrt, Ing. Jaroslav Šafránek, CSc., Ing. Petr Veleba, prof. Ing. Karel Kabele, CSc., časopis Stavebnictví, 4/2012, (<http://www.casopisstavebnictvi.cz/>)

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL**12. ZÁVĚR**

Sklo bezesporu svými výjimečnými specifickými vlastnostmi si vyměňuje odlišný konstrukční přístup ve srovnání s ostatními nosnými konstrukčními materiály (beton, dřevo, ocel, kámen, atd.). Dokladem tohoto stavu je i situace návrhových konstrukčních norem k tomuto materiálu. Dále je proto pro orientaci v konstrukčních možnostech skla výhodou znalost technologie jeho výroby.

S ohledem na optické vlastnosti skla je jeho užití v architektuře zároveň z jiné strany usměrňováno nejen materiálovými fyzikálními limity, ale i problematikou řešení stavební fyziky a fyziologickými - psychologickými potřebami uživatelů.

Další rozvoj skla bude samozřejmě souviset vůbec s rozvojem inteligentních / kompozitních / nano / programovatelných materiálů. Nabízí se otázka, jestli pak bude možné dále hovořit o skle. Tyto future transparentní materiály by měli především řešit pro současnost stále trvající dvě negativní konstrukční vlastnosti skla, kterými jsou vysoká vlastní objemová hmotnost a mechanická křehkost.



Budoucnost EU: energeticky nezávislá města? (<http://www.ekobydleni.eu/architektura/budoucnost-eu-energeticky-nezavisla-mesta>)

SKLO JAKO MODERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

13. STUDIUM PRAMENŮ - PRAMENY A ZDROJE INFORMACÍ**13.1. KNIHY A ODBORNÉ ČASOPISY****13.1.1. Technická literatura**

- 1) Solární energie : Využití při obnově budov
Andreas Haller, Othmar Humm, Karsten Voss. -- 1. vyd. -- Praha : Grada, 2001
- 2) Využití skla pro přeměnu sluneční energie
Gitta Srnková. -- 1. vyd. -- Hradec Králové : Státní výzkumný ústav sklářský, 1979
- 3) Inteligentní skleněné fasády : vysokoškolská učebnice
doc. Ing. arch. Miloš Florián, Ph.D. -- 1. vyd. -- Praha : Vydavatelství ČVUT, c2005
- 4) Solární energie : fotovoltaika : perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti
Martin Libra, Vladislav Poulek. -- 2. dopl. vyd. -- V Praze : Česká zemědělská univerzita, 2006
- 5) Solární tepelná technika
Jaromír Cihelka . -- Praha : Malina, 1994
- 6) Glaverbel Czech : Skla pro architekturu : Technický katalog
Teplice : Glaverbel Czech a.s., 1999
- 7) Ploché a stavební sklo
Alena Urbanová. -- 1. vyd. -- Praha : Řempe : Merkur, 1988
- 8) Pevnost a lom skla a keramiky
Jaroslav Menčík. -- 1. vyd. -- Praha : Nakladatelství techn. lit., 1990
- 9) Sklo kolem nás : přednáška pro DEN VĚDY NA PRAŽSKÝCH VYSOKÝCH ŠKOLÁCH (www.sciprag.cz)
Prof. Ing. Lubomír Němec, DrSc. a kol. -- Laboratoř anorganických materiálů, Společné pracoviště Ústavu anorganické chemie AV ČR a Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, ve spolupráci s firmou Glass Service, s.r.o. -- Vysoká škola ekonomická v Praze, 4.12.2007
- 10) Netradiční využití mikrovlné trouby
Renata Šulcová a Ludmila Nyvltová, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra učitelství a didaktiky chemie, 2004
- 11) POVRCHY PODLAHOVÝCH KONSTRUKCÍ NA BÁZI SINTROVANÉHO SKLA,
Doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc., Ing. Tomáš Melichar, Ústav technologie stavebních hmot a dílců Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, ERA 21, vydání 6/2008
- 12) Glass Construction Manual 2nd Ed. Hardcover,
Christian Schittich, Gerald Staib, Dieter Balkon, Matthias Schuler, Werner Sobek, Edition DETAIL, Munich, 2007
- 13) INTRODUCTION ON USE OF GLASS IN MODERN BUILDINGS,
Wilfried Laufs and Andreas Luible, Rapport ICOM 462, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2003. český překlad - ÚVOD DO POUŽITÍ SKLA V MODERNÍCH BUDOVÁCH, Ing. Martina Eliášová, CSc., Ing. Martin Fučík – odborný poradce, Vydavatelství ČVUT v Praze, 12/2003
- 14) STAVBA A UŽÍVÁNÍ NÍZKOENERGETICKÝCH A PASIVNÍCH DOMŮ,
Ing. arch. Josef Smola, vydavatelství Grada Publishing, 28.01.2011 (<http://www.pasivnidomy.cz/>)

13.1.2. Literatura teorie, koncepce, historie

- 15) Programy a prohlášení architektů XX. století : Paralelní texty ke studiu dějin a teorie architektury
Oldřich Ševčík. -- 1. vyd. -- Praha : České vysoké učení technické, 1999
- 16) Dějiny 19. a 20. století : Architektura - umění - filosofie - věda a technika
Petr Urlich, Oldřich Ševčík, Pavel Škranc. -- 1. vyd. -- Praha : České vysoké učení technické, 1997
- 17) Rozhovory s architektky 01 : [Masák, Pleskot, Lábus, Pelčák, Eisler, Fiala, Hruša, Malinský, Střítecký]
Petr Kratochvíl. -- Vyd. 1. -- Praha : Prostor, c2005
- 18) Transpozice druhé evropské energetické směrnice do českých právních předpisů, diskutující:
Ing. Jiří Šála, CSc., Ing. Karel Vaverka, CSc., Marie Báčová, Ing. Roman Šubrt, Ing. Jaroslav Šafránek, CSc., Ing. Petr Veleba, prof. Ing. Karel Kabele, CSc.,

časopis *Stavebnictví*, 4/2012,
(<http://www.casopisstavebnictvi.cz/>)

13.2. INTERNETOVÉ PRAMENY

13.2.1. *Architektura, design, historie*

- 19) Áron Losonczy, Litracon - průhledný beton (technik.ihned.cz, www.pozemni-stavitelstvi.wz.cz)
- 20) Architekt odpadu, Michael Reynolds (<http://garbagewarrior.com/>)
- 21) Opravy panelových bytů půjde financovat i z prostředků EU, Michal Ruml, Finance.cz, 2.1.2006
(<http://www.sfinance.cz/zpravy/finance/59080-opravy-panelovych-bytu-pujde-financovat-i-z-prostredku-eu/>)
- 22) Opravy panelových bytových domů - přehled zahraničních zkušeností,
Výsledky vyhledávání výrazu "domovní fond",
Domovní fond v ČR, stav k 1.3.2001,
(<http://www.mmr.cz/>)
- 23) Veřejná databáze Českého Statistického Úřadu: Struktura domovního / bytového fondu, stav k 1.3.2001
(<http://vdb.czso.cz/>, [http://www.czso.cz/csu/2003edicniplan.nsf/t/57004FB3B4/\\$File/4112CC25.pdf](http://www.czso.cz/csu/2003edicniplan.nsf/t/57004FB3B4/$File/4112CC25.pdf))
- 24) O českém křišťálu (http://www.luckyglass.cz/cs/cesky_kristal.html)
- 25) Moravská zemská knihovna v Brně (<http://www.brno.cz>)
- 26) Občanské sdružení Liga Ekologických Alternativ, Ekosídlíště nebývalé komplexnosti, Rakousko, Linz – Solar City
(<http://www.lea.ecn.cz/02linz.html> , <http://www.gap-solar.at>)
- 27) Stránky projektů arch. Rolfa Dische (<http://www.rolfdisch.de>)
- 28) PROMES NEWS (<http://www.promes.ch>, www.promes.cnrs.fr)
- 29) Ploché čočky, Solar Power Glass
(<http://3rings.designerpages.com/2010/02/05/case-solar-power-glass-an-aesthetically-and-environmentally-energetic-facade/>)
- 30) Ekodomý a stavební materiály, Zuzana Pátková, Lenka Ševčíková
(<http://www.essentia.cz> , <http://umwelt-wand.de/ti/index.html>)
- 31) Hybridní architektura (<http://www.e-architekt.cz>)
- 32) Strukturální morfologie (<http://www.e-architekt.cz>)
- 33) Alan Macfarlane, Cambridgeská univerzita (<http://www.alanmacfarlane.com/glass/AMED.pdf>),
AKADEMON.CZ (<http://akademon.cz/search.asp?searchtext=Alan+Macfarlane>)
- 34) Osvětlení pro 21. století,
Ing. Jaroslav Ondruš, ON-NO, s. r. o., Technika, technologie, vydání 14/2004,
(www.svetlo.info, <http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=2861&cid=6.html>)
- 35) Výroba plochého skla ve světě a v českých zemích,
Milan Vacek - Technika, technologie - vydání 18/2004,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=2976&cid=6.html>)
- 36) Historie výroby plochého skla v českých zemích,
Doc. PhDr. Ludomír Kocourek, Csc., Vysoká škola finanční a správní, katedra veřejné správy,
ASOCIACE SKLÁŘSKÉHO A KERAMICKÉHO PRŮMYSLU ČR,
Association of the Glass and Ceramic Industry of the Czech Republic
(http://www.askpcr.cz/media_studie.php?idz=4)
- 37) stránky výrobce 24% olovnatého křišťálu. společnosti RÜCKL CRYSTAL a. s., Nižbor
(<http://www.ruckl.cz/vyroba-skla.php>)
- 38) Sklo je jediný materiál, který je čtyřrozměrný,
prof.akad.soch.Marián Karel, Ústav průmyslového designu Fakulty architektury ČVUT,
Technicall, vydání 3/2011
(<http://www.tecnicall.cz/>)
- 39) The Cubed Maze3,
Phil Pauley,
(<http://www.philpauley.com/cubed.php> , <http://inhabitat.com/cubed-maze3-is-a-larger-than-life-maze-made-from-recycled-materials/cubed-maze3-by-phil-pauley/>)
- 40) ateliér Santambrogio, architektura a design,
Carlo Santambrogio, Ennio Arosio (<http://www.santambrogiomilano.it/>)
- 41) LED GLASS TABLE (<http://inhabitat.com/led-glass-table/>)

42) THE FUTURE OF GLASS TECHNOLOGY

(<http://www.youtube.com/watch?v=gplbpAljMq8> ,
<http://tech.spotcoolstuff.com/cell-phone/lg-gd900/transperent-design>)

13.2.2. Konstrukční prvky

43) Solární absorbér - systém pro ohřev vody (http://www.ekoplast.cz/solarni_absorber.htm)

44) Obvodový plášť s nezaskleným vzduchovým kolektorem (<http://www.solarwall.com/home>)

45) Zakrytý vzduchový kolektor, systém American Solar (<http://www.americansolar.com/>)

46) Sklo, dvojitě fasády, Ústav stavitelství I. 15123, FA ČVUT (<http://15123.fa.cvut.cz/>)

47) FDT (CZ), s.r.o., FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co., Mannheim, SRN (<http://www.fdt.cz/?s=evalonsolar>)

48) Sklobetonové konstrukce – Luxfery, Reglit, Copilit

(<http://cs.wikipedia.org/wiki/Sklobeton>, <http://www.sklobetonpraha.cz>, <http://www.luxfery.cz>,
<http://www.luxfery.net>, <http://www.sklobetonsro.cz/>)

49) NADROZMĚRNÁ IZOLAČNÍ SKLA (<http://www.isosklo.cz/uvod.html>)

50) FOAMGLAS, pěnové sklo (<http://www.foamglas.cz>),

51) REFAGLASS, pěnové sklo (<http://www.penove-sklo.eu/>),

52) GLASILEX, sklokystalické výrobky (<http://www.glasilex.cz>)

53) Pevnost plochého skla. Způsoby zatěžování a základní vzorce pro výpočet napětí. 2. část
Ing. Milan Vích, CSc., Ing. Vladimír Novotný, CSc., Technika, technologie, vydání 17/2006
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=5097&cid=6.html>)

54) Teoretická a experimentální analýza skleněných prvků

Ing. Slivanský Miloš, Doc. Ing. Brodnianský Ján CSc., časopis KONSTRUKCE, vydání 4/2006
(<http://www.konstrukce.cz/clanek/teoreticka-a-experimentalna-analyza-sklenenych-prvkov/>)

55) K problémům dimenzování nosných konstrukcí z konstrukčního skla,

Prof. Ing. Melcher Jindřich DrSc, časopis KONSTRUKCE, vydání 4/2005,

(<http://www.konstrukce.cz/clanek/k-problemum-dimenzovani-nosnych-konstrukci-z-konstrukcniho-skla/>)

56) Pevnost skla v kontaktu,

Ing. Eliášová Martina CSc., Prof. Ing. Wald František CSc., časopis KONSTRUKCE, vydání 1/2005,

(<http://www.konstrukce.cz/clanek/pevnost-skla-v-kontaktu/>)

57) Využití a návrhové charakteristiky vzorovaného drátoskla,

Ing. Miroslav Vokáč, Ph.D., Ing. Miroslav Špaček, Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D., doc. Ing. Petr Bouška, CSc., Kloknerův ústav ČVUT v Praze, časopis Stavebnictví, 3/2012,

(http://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-a-navrhove-charakteristiky-vzorovaneho-dratoskla_N5007)

58) Hra se skly na Nile House,

Ing. Cieslar Stanislav, časopis KONSTRUKCE, publikováno 25.8.2005,

(<http://www.konstrukce.cz/clanek/hra-se-skly-na-nile-house>)

59) River City Praha – nepřehlédnutelný administrativní komplex pod drobnohledem,

Bc. Vítězslav Fejfar, časopis KONSTRUKCE, publikováno 9.3.2010,

(<http://www.konstrukce.cz/clanek/river-city-praha-neprehlednutelny-administrativni-komplex-pod-drobnohledem>)

60) Multifunkční zasklení 1 – Sklo a solární ochrana,

Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 27.5.2008,

(<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-1-Sklo-a-solarni-ochrana.html>)

Multifunkční zasklení 2 – Bezpečnostní skla,

Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 29.5.2008,

(<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-2-Bezpecnostni-skla.html>)

Multifunkční zasklení 3 – Požadavky na požární prosklené konstrukce,

Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 1.6.2008,

(<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-3-Pozadavky-na-pozarni-prosklene-konstrukce.html>)

Multifunkční zasklení 4 – Ochrana proti hluku,

Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 10.6.2008,

(<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-4-Ochrana-proti-hluku.html>)

Multifunkční zasklení 5 – Pevnost skla a jeho statický návrh,

Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 17.7.2008,

(<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-5-Pevnost-skla-a-jeho-staticky-navrh.html>)

Multifunkční zasklení 6 – Tepelný šok,
Ing. Miroslav Sázovský, iMateriály, publikováno 15.10.2008,
<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Multifunkcni-zaskleni-6-Tepelny-sok.html>).

Nový přístup k výpočtu ekvivalentní tloušťky vrstveného skla,
Ing. Miroslav Sázovský, WWW.SAZOVSKY.CZ, publikováno 25.11.2010,
<http://www.sazovsky.cz/novinky/novy-pristup-k-vypoctu-ekvivalentni-tloustky-vrstveneho-skla/>)

Správný návrh tloušťky skla aneb proč ne-lineární metoda konečných prvků,
Ing. Miroslav Sázovský, WWW.SAZOVSKY.CZ, publikováno 5.4.2011,
<http://www.sazovsky.cz/novinky/spravny-navrh-tloustky-skla/>)

- 61) Stránky společnosti SJ Mepla - Software for Structural Glass Design (http://mepla.eu/en/home_en)
- 62) Uplatňování Eurokódů pro navrhování staveb a další rozvoj podle CEN/TC 250,
doc. Ing. Jana Marková, Ph.D., Ing. Karel Jung, Ph.D.,
Kloknerův ústav ČVUT v Praze, časopis Stavebnictví, 2/2012,
http://www.casopisstavebnictvi.cz/uplatnovani-eurokodu-pro-navrhovani-staveb-a-dalsi-rozvoj-podle-cen-tc-250_N4980)
- 63) Podmínky pro energeticky úsporné domy v České republice,
Doc. Ing. Josef Chybík, CSc.,
Fakulta architektury VUT v Brně, časopis Stavebnictví, 9/2012,
http://www.casopisstavebnictvi.cz/podminky-pro-energeticky-usporne-domy-v-ceske-republice_N5122)
- 64) Tensegrity Staircase Made of Glass
<http://tensegritywiki.blogspot.com/2010/08/tensegrity-staircase-made-of-glass.html>)
- 65) Inteligentná fasáda sa stáva skutočnosťou, fasáda Schüco E2
<http://www.stavajtesnami.sk/priloha31/clanok29.htm> ,
http://www.schueco.com/web/ae/unternehmen/presse/press/trade_fair_innovations/Schueco_E2_Facade_System_mature)
-
- L'innovazione tecnologica Schüco nei sistemi di ventilazione,
 Technologické inovace Schüco ve ventilačních systémech,
<http://www.youtube.com/watch?v=uPB-cskrZJU>)

13.2.3. Technologie

- 66) Gerotop s.r.o., řešení tepelného čerpadla VODA-VODA se zdrojem tepla odebraného z kanalizační stoky,
<http://www.gerotop.cz/cz/home/tepelne-čerpadlo-s-neobvyklým-řešením/>)
- 67) projekt RENATA - SUROVINY K VÝROBĚ SKLA (<http://www.oe.svitavy.cz/pro/renata/vedatech/sklo/index.htm>)
 projekt RENATA - VÝROBA SKLA (<http://www.oe.svitavy.cz/pro/renata/vedatech/sklo2/index.htm>)
- 68) Historie a technologie výroby skla v severních Čechách, současné sklo – Mája Křížová
<http://www.gymfry.cz/zmp0405/krizova>)
- 69) Sklářská huť TOMI (<http://www.sklamatomi.webz.cz/historie.html>)
- 70) Jak se co dělá: Sklo (<http://www.stream.cz/video/45/2701-jak-se-co-dela-sklo>)
- 71) Co dokážou lasery?
reportéři: Michael Londesborough, Vladimír Kunz, Česká televize, pořad PORT TV, 29.9.2010,
<http://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/596-co-dokazou-lasery/video/>)
- 72) Technologie výroby plaveného skla, Ladislav Kopecký,
http://www.geocities.com/madhukar_shukla/crebook/63.html)
<http://www.pilkington.com/pilkington-information>)
- 73) Fusing - spékání, stavování skla,
Ing. Ivana Hladká, Technika, technologie, vydání 3/2001
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=91&cid=6.html>, <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fusing>,
<http://www.brydova.cz/techniky/7-techniky/159-fusing-mikrovlnka>)
- 74) Věda a umění. Metoda tavení skla pomocí mikrovlnné energie - nové možnosti odlévání skleněných soch
autoři: Alena Matějková - Vysoká škola uměleckoprůmyslová,
Jiří Hájek, Ing. Milan Hájek, CSc. - Ústav chemických procesů AV ČR,
Technika, technologie - vydání 1/2007, Praha
<http://glassrevue.com/news.asp@nid=5446&cid=6.html>, <http://www.quido.cz/104/pec.htm>,
http://zpravy.idnes.cz/zahranicni.asp?c=A010713_145240_vedatech_zem)
- 75) Doplnkové technologie lepení, z přednáškového cyklu Zpracovatelské inženýrství polymeru
autor: Ing. Dagmar Měřinská, Ph.D,

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů
http://web.ft.utb.cz/?id=0_2_5_3&iid=24&lang=cs&type=0,
http://web.ft.utb.cz/cs/docs/8_Dopl_kov_technologie.pdf)

- 76) Technologie lepení v automobilovém průmyslu,
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf)
- 77) SKLO A PRŮMYSLOVÝ TRH. OBRAZ IV., Povlakování skla a plastů,
 Alexandr Abušínov, *Technika, technologie*, vydání 14/2007
<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=5868&cid=6.html>
<http://www.radio.cz/cz/rubrika/ceskonej/unikatni-mozaika-posledniho-soudu-je-zachranena>)
<http://old.hrad.cz/castle/mozaika.html>)
- 78) Destičky a jiné speciální útvary ze skleněných optických vláken
 Miroslav Jedlička, *Technika, technologie*, vydání 19/2006
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=5162&cid=6.html>)
- 79) Chemické leštění skla bez emisí fluoru
 Milan Vacek, *Technika, technologie*, vydání 11/2005
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=3945&cid=6.html>)
- 80) Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem
 Jana Dvořáková, Jaromír Dvořák, *Technika, technologie*, vydání 21/2007
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=5059&cid=6.html>)

 Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II.
 Jana Dvořáková, Jaromír Dvořák, *Technika, technologie*, vydání 15/2008
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=5097&cid=6.html>)
- 81) Technická revoluce ve sklářských formách ?
 Ing. Zdeněk Jech, *Technika, technologie*, vydání 27/2007
 Sklářny Kavaliér
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=6277&cid=6.html>
- 82) Vacuum Insulation Panels (http://www.ecbcs.org/docs/Annex_39_Report_Subtask-A.pdf),
 Vakuové izolační panely VIP/ QASA (<http://www.virtualsro.cz/foto/download/7.pdf>),
 Vakuová izolace - Izolace s vysokým tepelným odporem i při malé tloušťce
 Dana D. Daňková, Jiří Hejhálek, *Stavebnictví a interiér*, 1. 3. 2009
<http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vakuova-izolace/>)
- 13.2.4. Materiály a chemie**
- 83) Křemík, křemen a sklo – Wikipedie, otevřená encyklopedie
<http://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99em%C3%ADk>
- 84) Vodní sklo (<http://www.stavebnitechnologie.cz/forum/index.php?action=vthread&forum=4&topic=15>)
- 85) Písek ve sklářství,
 Petr Exner, *Technika, technologie*, vydání 13/2002
<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=854&cid=6.html>)
- 86) Chemický vzdělávací portál (http://chemie.gfxs.cz/index.php?pg=prvek&prvek_id=14)
- 87) Osobní stránky Pavla Glosse, Referáty z chemie - výroba skla (09.08.2001) (www.x-name.wz.cz)
- 88) Skleněná vlákna do betonů a malt ,
 Sklovláknobeton POLYCON,
www.sklocement.cz, www.sklocementplus.cz, <http://www.sklocementplus.cz/omaterialu.html> ,
<http://www.ortodum.cz/prezentu>, www.wolfprefa.cz)
- 89) PLAZMATICKÉ POVRCHOVÉ ÚPRAVY SKLENĚNÝCH VLÁKEN NA BÁZI ORGANOKŘEMIČITANŮ,
 autor diplomové práce: JAROMÍR VETEŠKA,
 ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ, FAKULTA CHEMICKÁ, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2008
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4887)
- 90) Sklo (<http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>)
- 91) Kovová skla (<http://www.techblog.cz/technologie/kovove-sklo-odhaluje-sva-tajemstvi.html>,
http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v38_1_05/article17.shtml),
 AKADEMON.CZ (<http://akademon.cz/search.asp?searchtext=Sklo+z+oxidu+hliniti%E9ho>,
<http://akademon.cz/search.asp?searchtext=Zirkoniov%E9+sklo>)
 Fosforečnanová skla (<http://akademon.cz/default.asp?source=0109>)
 Křemenná vata (<http://akademon.cz/default.asp?source=0504>, <http://akademon.cz/default.asp?source=0502>,
http://cs.wikipedia.org/wiki/Sol_gel)

- 92) Laboratorní sklo (<http://www.excellent-pipes.cz/tp/lib/infobox/57/co-je-to-pyrex/>)

Tepelně odolná boritokřemičitá skla typu Pyrex,
Petr Exnar, Technická univerzita Liberec, Technika, technologie, vydání 32/2002
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1479&cid=6.html>)

Vlastnosti SIMAXU,
Bohuslav Vtípil, Technika, technologie, vydání 9/2004
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=2731&cid=6.html>)
- 93) Co je sklo?
Ing. Ivana Hladká, SAHM ČS, s.r.o., Technika, technologie, vydání 7/2001,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=196&cid=6.html>)
- 94) Sintrovaný materiál ze skla,
Tomáš Žižka - Technika, technologie, vydání 13/2008,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=6648&cid=6.html>)
- 95) Děje probíhající při vypalování sklářských barev
Ing. Ivana Hladká, Sahn, s.r.o. Praha, Technika, technologie, vydání 14/2002
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=889&cid=6.html>)
- 96) Scholzův článek o sklářství "v nejnovějších časech" z roku 1820 - II.,
Jitka Lněničková, Technika, technologie, vydání 26/2004,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=3218&cid=6.html>)
- 97) Základní kámen každého foťáku. Jak vzniká obraz v objektivu,
Jan Libich, (zkratka autora: jlb), 1.11.2007, Technet.cz
(http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-tec_foto.asp?c=A071025_103506_tec_foto_jlb)
- 98) Index lomu, disperze záření a jejich stanovení,
Ing. Petr Havel, Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 12/2002
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=822&cid=6.html>)

Význam indexu lomu skel a dalších materiálů,
Ing. Petr Havel, Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 9/2002,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=709&cid=6.html>)
- 99) Objektivní měření barevnosti skel,
Ing. Petr Havel, Sklářský ústav s.p., Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 2/2001
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=67&cid=6.html>)

Použití objektivního měření barevnosti skel v praxi,
Ing. Petr Havel, Technika, technologie, vydání 9/2001,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=243&cid=6.html>)

Diskuse k názvům sklovin,
Rudolf Hais, Technika, technologie, vydání 7/2006
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=4808&cid=6.html>)

Solarizace historických skel,
Rudolf Hais, Technika, technologie, vydání 8/2005
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=3853&cid=6.html>)
- 100) Zakalená bižuterní skla,
Petr Exnar, Technická univerzita Liberec, Technika, technologie, vydání 3/2003,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1656&cid=6.html>)
- 101) Stříbrná lazura,
Petr Exnar, Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 16/2002,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=952&cid=6.html>)

Měděná lazura,
Petr Exnar, Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 18/2002,
(<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1028&cid=6.html>)

- 102) Skleněné tvarovky pro fasádu Nové scény Národního divadla v Praze vznikly před 25 lety, *Berthold Mann, Technika, technologie, vydání 11/2007*, (<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=5759&cid=6.html>)

 Použití záření (http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.5.9)

 Užití ionizujícího záření (web.vscht.cz/sajdlp/Uziti_LZ.doc)

 Problematika uranem barveného skla (http://www.sujb.cz/?c_id=288 , resp. http://www.sujb.cz/?c_id=159)
- 103) Skelně krystalické materiály, *Petr Exnar, Technika, technologie, vydání 12/2001* (<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=317&cid=6.html>)
- 104) Teplotní roztažnost skel a její měření
Ing. Petr Havel, Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 21/2002 (<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1141&cid=6.html>)

 Praktické aspekty teplotní roztažnosti skel
Ing. Petr Havel, Hradec Králové, Technika, technologie, vydání 22/2002 (<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=1174&cid=6.html>)
- 105) Poznávání hornin (<http://petrol.sci.muni.cz/poznavanihornin/magmatity/vulkanickaskla.htm>),
 Vltavín (<http://cs.wikipedia.org/wiki/Vltav%C3%ADn>),
 Perlit (http://www.perlit.cz/expand_perlit.php)
- 106) Cyklus přednášek - ZÁKLADY SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH TECHNOLOGIÍ, ANORGANICKÁ SKLA, SKELNÝ STAV, STRUKURA SKEL, VLASTNOSTI SKLOTVORNÝCH TAVENIN,
Prof. Ing. Josef Matoušek, DrSc., Ústav skla a keramiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, (<http://www.vscht.cz/sil/download/download.html>)
- 107) Aspects of Structural Glass,
Tim Morgan CEng MIMechE, Technical Manager, Pilkington Architectural, Institute of Structural Engineers, SE Counties Branch, 2010 (<http://www.scribd.com/philipjwilson/d/77635791-Aspects-of-Glass-Handout#download>)
- 13.2.5. Ekologie a biotechnologie**
- 108) Recyklace - Ročníková práce ze Základů ekologie (<http://ekologie.xf.cz/temata/recyklace/recyklace.htm>)
- 109) Vitifikace odpadů,
Ing. Petr Exnar, CSc., Technika, technologie, vydání 6/2001, (<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=178&cid=6.html>)
- 110) AUTOSKLA, CO SE SKLEM PO ČELNÍ SRÁŽCE S KOROPTVÍ
 (<http://www.trideniodpadu.cz/trideniodpadu.cz/Autoskla.html>)
- 111) NOVÉ TRENDY V ENERGETICE,
František Kůrka, OŘTÚ MMP, Odbor řízení technických úřadů Magistrátu města Plzeň, 11/2006 (<http://energetika.plzen-city.cz/dokuments/novetrendy.pdf>)

 NOVÉ TRENDY V ENERGETICE 2,
František Kůrka, OŘTÚ MMP, Odbor řízení technických úřadů Magistrátu města Plzeň, 1/2008 (http://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni_dokumenty/akcni_plany/nove_trendy_2.pdf)

 NOVÉ TRENDY V ENERGETICE 3,
František Kůrka, OSI MMP – Odbor správy infrastruktury Magistrátu města Plzeň, 8/2009 (http://energetika.plzen-city.cz/dokuments/NOVÉ%20TRENDY_3.pdf)

 NOVÉ TRENDY V ENERGETICE 4,
František Kůrka, OSI MMP – Odbor správy infrastruktury Magistrátu města Plzeň, 2/2011 (http://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni_dokumenty/akcni_plany/NOVETRENDY_4.pdf)
- 112) PHOTOSYNTHESIS BIO REACTOR
 (<http://www.technologyreview.com/energy/39488/> ,
<http://www.green-trust.org/wordpress/2011/04/24/diy-algae-photo-reactors/>)

- 113) "I' MLOSTIN PARIS, PARIS, FRANCE, 2009, ARCHITECT: R&SIE(N)... PARIS
(<http://www.new-territories.com/lostinparis.htm> , <http://www.archdaily.com/12212/im-lost-in-paris-rsien/>)

13.2.6. Grafika

- 114) Úvodní obálka (<http://hyakugojuuichi.deviantart.com/art/Future-Glass-289241901>)
115) Budoucnost EU: energeticky nezávislá města?
(<http://www.ekobydleni.eu/architektura/budoucnost-eu-energeticky-nezavisla-mesta>)
116) Obrázek pece (<http://euro.e15.cz/profit/19-milniku-ceskeho-hospodarstvi-12-900929>)