

i výhodnější. Vynechává se zde etapa samovolného chladnutí, které je nahrazeno jemným chlazením. Odlévání do forem vede k menším ztrátám skloviny a pánve se dají použít pro několik taveb. Na druhé straně zde existuje určitá nebezpečí při odlévání tekuté skloviny do forem, že se do bloků zanesou nekvalitní sklovina od stěn pánve, která může znehodnotit obsah tavby. Při takto řízeném chlazení se dosahuje stabilizace skla, a tím fyzikální i chemické stejnorodosti skloviny. Stabilizačním chlazením lze v malém rozsahu korigovat též index lomu optických skel.

Náročné optické skloviny, u nichž je nebezpečí korozního znečištění a vzniku šlirovitosti jejich stykem se stěnami pánví, se elektricky taví v platinových kelímech. Skloviny tavené v platině mají také menší bublinatost a vyšší čírost.

Otázky a úkoly

1. Do jakých skupin rozdělujeme oxidy k výrobě skla?
2. Vyjmenuj nejpoužívanější sklotvorné oxidy.
3. Jaká je úloha taviv a stabilizátorů při tavení skla?
4. Co je to sklářský kmen?
5. Jaké jsou požadavky na materiál zařízení k výrobě optického skla?
6. Jaké typy pecí se používají k tavení optického skla?
7. Vysvětli princip pece s regeneračním způsobem vyhřívání.
8. Vyjmenuj jednotlivé etapy tavení skla a stručně je popiš.
9. Co je to jemné chlazení a jaký má význam?
10. Jaké znáš způsoby výroby polotovarů optického skla?

4. 4. VÝROBNÍ VADY SKLA A JEJICH KONTROLA

Přes veškerou pečlivost, která se věnuje jednotlivým etapám výroby optického skla, vyskytují se v utavené sklovině vady, které nepříznivě ovlivňují průchod světelných paprsků. Tyto vady bývají způsobeny nekvalitními nebo nesprávně dávkovanými surovinami ve kmeni a na druhé straně nedostatky přímo ve výrobním procesu.

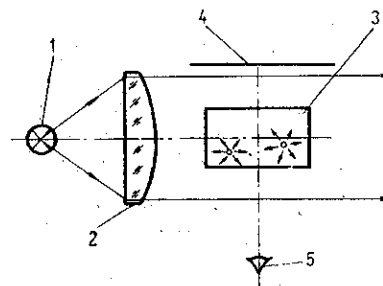
Výrobní vady vyskytující se v optickém skle rozdělujeme na několik druhů: bubliny, šliry, odsckelnění, zhoršení optické stejnorodosti a vnitřní napětí.

4. 4. 1. Bubliny

Bubliny jsou tvořeny zbytky plynu uzavřeného ve skle, který nebyl vypuzen z roztavené skloviny během čerení. Většinou mívají pravidelný, téměř kulový tvar, ale mohou být i protáhlé nebo jinak nepravidelně formované. Velmi malé bubliny, menší než $2 \cdot 10^{-3}$ mm, se často vyskytují ve shluku, který nazýváme závoj. Bubliny zhoršují jakost optického skla tím, že rozptylují světelné paprsky na jejich povrchu, a tím se v optických soustavách snižuje kontrast obrazu. Kromě toho se bubliny v blízkosti obrazové roviny mohou zobrazit jako tmavé stíny.

Podobné účinky jako bubliny naplněné plynem mají kaménky uzavřené ve skle, které jsou tvořeny buď neroztavenými zbytky kmene, nebo cizími tělisky (úlomky pánve, vnitřní vyzdívkvy pece apod.). Kaménky jsou na rozdíl od bublin zcela nebo téměř neprůhledné.

Kontrola bublinatosti ve skle záleží ve zviditelnění rozptylu světla na bublinách (obr. 9). Kontrolovaný blok skla se prosvětlí rovnoběžným svazkem světla a pozoruje se ve směru kolmém k šíření paprsků proti tmavému stínítku. Bubliny a kaménky se proti tmavému pozadí projevují jako zářící body. Velikost bublin určujeme srovnáním se vzorky bublin známé velikosti.



Obr. 9. Zařízení ke kontrole bublinatosti

- 1 — světelný zdroj;
2 — kondenzorová čočka;
3 — prohlížený blok skla;
4 — stínítko;
5 — oko pozorovatele

Československá státní norma ČSN 71 0114 rozděljuje optické sklo podle velikosti bublin na devět kategorií — od 0 do 2 mm — (tab. 4) a podle množství bublin v 1 kg skla do šesti tříd — od 0 do 3 000 ks (tab. 5). Odpovídající východoněmecká norma má označení TGL 25 923.

Tabulka 4. Rozdělení optického skla podle velikosti bublin

Kategorie bublinatosti	Průměr největší bubliny v polotovaru [mm]
1	do 0,002
2	přes 0,002 do 0,05
3	přes 0,05 do 0,1
4	přes 0,1 do 0,2
5	přes 0,2 do 0,3
6	přes 0,3 do 0,5
7	přes 0,5 do 0,7
8	přes 0,7 do 1,0
9	přes 1,0 do 2,0

Tabulka 5. Rozdělení optického skla podle množství bublin

Třída bublinatosti	Průměrný počet bublin v 1 kg skla
1	do 10
2	do 30
3	do 100
4	do 300
5	do 1 000
6	do 3 000

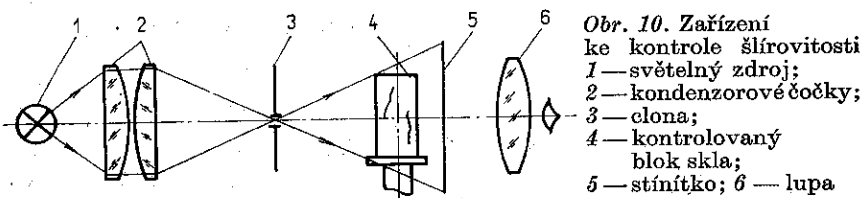
4. 4. 2. Šlíry

Vlivem nedostatečného promísení skloviny během tavicího procesu nebo vlivem nežádoucích příměsí vznikají v utaveném skle vláknové nebo i plošné útvary s rozdílným složením a s rozdílným indexem lomu, než má základní sklo; nazývají se šlíry.

Přestože odchylky indexu lomu šlíry nebývají obvykle větší než $2 \cdot 10^{-4}$ až $5 \cdot 10^{-4}$, způsobují v optických soustavách nepřijatelné zhoršení obrazové ostrosti, popřípadě i prosvětlení obrazového pole.

Vzhled a působení šlíry ve skle lze přirovnat k situaci vzniklé po vlití bezbarvého, třeba cukrového sirupu do vody, dříve než nastane dokonalé rozpustění. Roztok je sice průhledný, avšak předměty, které v něm pozorujeme, jsou nezřetelné, popřípadě i deformované.

Zařízení ke kontrole šlírovitosti (obr. 10) obsahuje projekční žárovku 1, jejíž světlo se soustřeďuje kondenzorovými čočkami 2 do otvoru clony 3. Rozbíhavý svazek světelných paprsků vycházející z clony prosvětluje kontrolovaný blok skla 4. Stínový obraz šlíry lze pozorovat na stínítku 5, nejlépe pomocí lupy 6.



Obr. 10. Zařízení ke kontrole šlírovitosti
1 — světelný zdroj;
2 — kondenzorové čočky;
3 — clona;
4 — kontrolovaný blok skla;
5 — stínítko; 6 — lupa

Přesně charakterizovat šlíry, například podle velikosti nebo tvaru, je prakticky nemožné. Proto československá státní norma pro technické požadavky na optické sklo ČSN 71 0114 určuje sedm kategorií šlírovitosti podle viditelnosti šlíry za různých podmínek zkoušení — mění se velikost svítícího otvoru a vzdálenost stínítka od zkoušeného bloku. Dále se rozlišují tři třídy šlírovitosti podle počtu předepsaných směrů prohlížení.

Šlírovitost optických skel se v NDR určuje podle normy TGL 21 790.

4. 4. 3. Odskelnění

Sklo, látka ve skelném stavu, postrádá pravidelnou krystalickou mřížku. Stabilní stav je však krystalický, a proto může za určitých podmínek nastat nežádoucí krystalizace, kterou nazýváme odskelnění.

K odskelnění neboli krystalizaci skla může dojít jen v určitém teplotním rozmezí při tuhnutí skloviny nebo při opětném zahřátí skla. Je proto nutné tuto nebezpečnou oblast, která je pro různé druhy skel rozdílná,

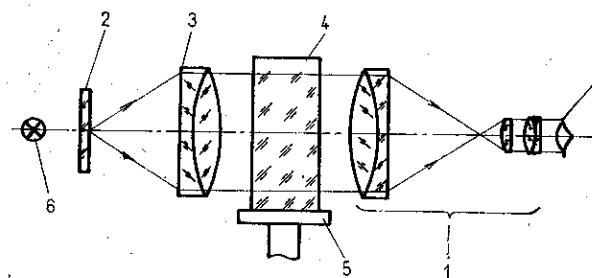
přejít při ochlazování skloviny co nejrychleji a bez míchání, neboť pohyb skloviny krystalizaci podporuje.

Odskelnění může být jen místní. V takovém případě se nacházejí krystaly často ve formě kulových sférolytů, nebo podél šlíry, kamének nebo bublin. Krystalizace se však může rozšířit do celé hmoty skloviny, což znehodnocuje celou tavbu.

4. 4. 4. Zhoršení optické stejnorodosti

Malé, plynulé odchylky indexu lomu velikosti asi 10^{-4} nejsou sice okem patrné jako bubliny, kaménky a šlíry, avšak jejich přítomnost ve skle zhoršuje kvalitu zobrazení, zejména jemné obrazové struktury.

Stupeň takového zhoršení určuje optická stejnorodost, která se kontroluje zařízením znázorněným na obr. 11. Dalekohledovou soustavou 1 se pozorují prosvětlené čárové testy 2, umístěné v ohniskové rovině kolimačního objektivu 3. Tyto testy, které jsou výměnné, se pozorují jednak se zařazeným zkušebním vzorkem 4, jednak bez něho. Nejmenší vzdálenost čar testu, kterou lze optickou soustavou přístroje na testu rozlišit, se nazývá rozlišovací mez.



Obr. 11. Zařízení ke kontrole optické stejnorodosti
1 — dalekohledová soustava; 2 — čárový test; 3 — kolimační objektiv;
4 — měřený vzorek skla; 5 — podložný stolek; 6 — světelný zdroj; 7 — oko pozorovatele

Optická stejnorodost skla se vyjadřuje poměrem rozlišovacích mezí zkušebního zařízení s měřeným vzorkem skla a bez něho.

Nejkvalitnější optická skla ponechávají rozlišovací mez na stejné výši, mají tedy optickou stejnorodost rovnou 1. Taková skla náležejí podle normy ČSN 71 0114 do 1. kategorie optické stejnorodosti, zatímco do poslední, 8. kategorie patří skla zhoršující rozlišovací mez na dvojnásobek.

Pro kvalitu skla z hlediska optické stejnorodosti je rozhodující optimálně prováděná homogenizace a chlazení.

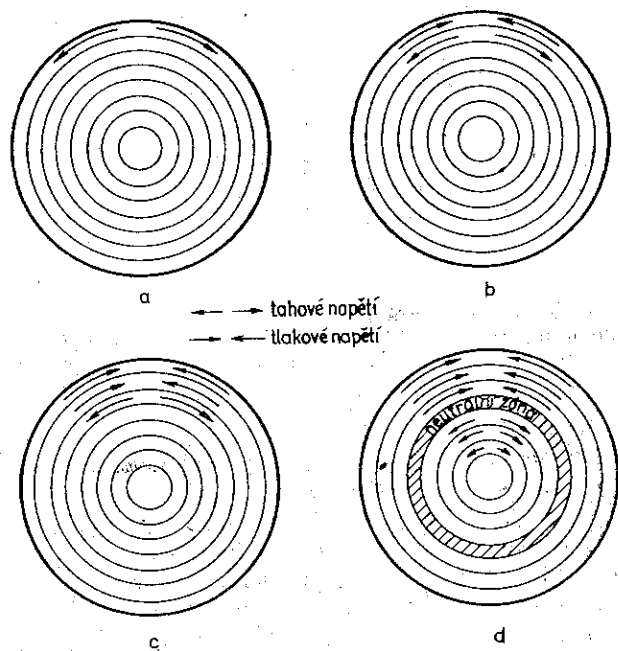
4. 4. 5. Vnitřní napětí

Vlivem příliš rychlého ochlazování vzniká uvnitř ztuhlého skla vada, kterou nazýváme vnitřní napětí. Původ jeho vzniku si vysvětlíme na bloku tuhneoucího skla kulového tvaru (obr. 12), který pro názornost rozdělíme do několika soustředných vrstev.

Nejrychleji se ochlazuje, a tedy nejdříve tuhne povrchová vrstva, která se snaží smršťovat. V počátku chladnutí je tato vrstva namáhána tahovým napětím (obr. 12a), které působí v tečném směru k obvodu tuhneoucího bloku — jsou to tzv. tangenciální síly. Situaci můžeme přirovnat k napětí pryžového kroužku, navlečeného na příliš velkou kouli.

Při postupujícím chladnutí se snaží smršťovat i další vrstva, vzdálenější od povrchu. Tomu však brání ještě hlubší, teplejší vrstvy, takže i v této vrstvě vzniká tahové napětí. Snaha o její smrštění se projeví také ve vnější, již ztuhlé vrstvě vznikem trvalého tlakového napětí (obr. 12b).

Tento postup se opakuje při tuhnutí dalších vrstev. Každá vrstva přijme tahové napětí a sama udělí sousední vrstvě, bližší k povrchu, tlakové napětí (obr. 12c). V hlubších vrstvách se postupně působení tahových a tlakových sil vyrovnává.



Obr. 12. Časový průběh vzniku vnitřního napětí při chladnutí tekuté skloviny.

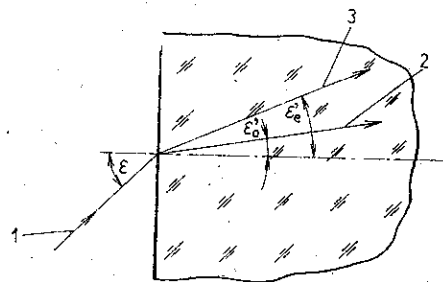
Vrstvu, v níž dochází k rovnováze tahových a tlakových sil a kde po ztuhnutí skloviny nezůstává žádné napětí, nazýváme neutrální zónou.

Ve vrstvách blíže jádru bloku, než se nachází neutrální zóna, převládá i po ztuhnutí tahové napětí (obr. 12d).

Při chladnutí a s ním souvisejícím tuhnutí skloviny se vnitřní, ještě tekuté vrstvy snaží smršťovat, a tím také zaujmout menší prostor. Vnější, již ztuhlé vrstvy to však nedovolí. Tím vzniká kromě již popsaného tangenciálního napětí také radiální napětí, působící kolmo k povrchu bloku (12d).

Můžeme říci, že vnitřní napětí je výsledkem tlakového a tahového napětí, která zůstávají ve sklovině vlivem rychlého ochlazování.

Průvodním jevem vnitřního napětí je dvojlom. Paprsek dopadající na dvojlomné sklo se štěpí na dva paprsky — řádný a mimořádný paprsek (obr. 13) s odlišnými rychlostmi šíření, a tím i s odlišnými indexy lomu. Na tomto rozdílu je založena metoda měření dvojlomnosti skla.



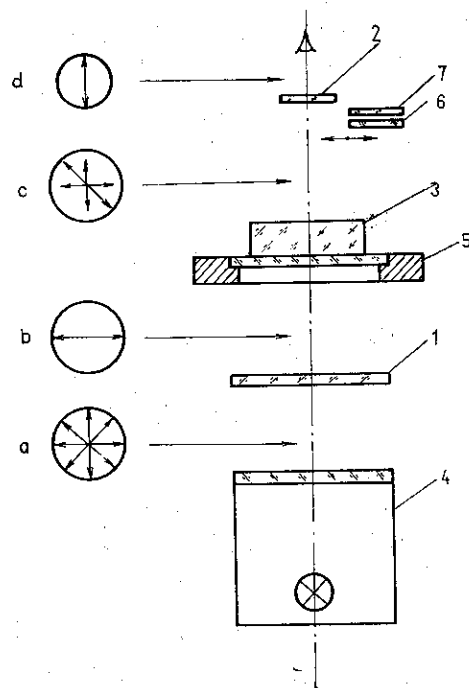
Obr. 13. Průchod světla dvojlomným prostředím
1 — dopadající paprsek;
2 — lomený paprsek řádný;
3 — lomený paprsek mimořádný

Norma ČSN 71 0114 rozděluje optická skla do pěti kategorií dvojlomnosti podle dráhového rozdílu řádného a mimořádného paprsku na dráze 1 cm. U nejkvalitnějších skel, patřících do první kategorie, se připouští maximální dráhový rozdíl 2 nm cm⁻¹, skla páté kategorie mohou mít dráhový rozdíl až 50 nm cm⁻¹. Odpovídající norma NDR pro dvojlom optických skel má označení TGL 21 792.

Dvojlom skla, a tím také vnitřní napětí, se kontroluje na polarizačním přístroji (obr. 14). Jeho základními součástmi jsou dva polarizační elementy — polarizátor 1 a analyzátor 2, mezi něž se vkládá kontrolovaný vzorek skla 3. Polarizátor bývá přímo spojen s osvětlovačem 4 a podložním stolek 5, na němž se umísťuje vzorek skla. K zpřesnění měření dvojlomu je vybavení polarizačního přístroje doplněno tzv. čtvrtvlnovou destičkou 6 (vyvolává dráhový rozdíl řádného a mimořádného paprsku λ/4) a zeleným filtrem 7.

Světlo je z fyzikálního hlediska druh vlnění, jehož kmity se dějí ve všech rovinách, kolmo ke směru šíření (obr. 14a). Polarizátor usměrní (za cenu určitých světelných ztrát) kmitání jen do jedné, tzv. polarizační roviny

(obr. 14b). Takto upravené světlo se nazývá polarizované. Jsou-li postaveny za sebou polarizátor s analyzátozem, jejichž polarizační roviny jsou navzájem kolmé, pohltí veškeré světlo. Stejná situace nastane, vložíme-li do polarizačního přístroje vzorek skla bez dvojlomu, tj. bez vnitřního napětí, zorné pole přístroje zůstane temné. Avšak dvojlomné sklo stáčí rovinu polarizace (obr. 14c). Proto se při vložení takového skla do polarizačního přístroje objeví i při zkřížených polarizačních rovinách polarizátoru a analyzátoru světelné útvary, které odpovídají dvojlomu a napětí ve skle (obr. 14d).



Obr. 14. Polarizační přístroj
 1 — polarizátor;
 2 — analyzátor;
 3 — zkoušený vzorek skla;
 4 — osvětlovač;
 5 — podložní stolek;
 6 — výklopná čtvrtvlnová destička;
 7 — výklopný zelený filtr

Podrobný popis proměrování a vyhodnocování dvojlomu ve skle je uveden v normě ČSN 71 0134.

Vnitřní napětí výrazně ovlivňuje optické a mechanické vlastnosti skla. Dvojlom je znehodnocuje z hlediska kvality optického zobrazení a vlivem vnitřního napětí se sklo stává křehčím. Na druhé straně lze však řízeného vzniku vnitřního napětí využít pro zvýšení odolnosti skleněných výrobků k účinku mechanických a tepelných rázů.

Otázky a úkoly

1. Jaké výrobní vady se vyskytují při výrobě optického skla?
2. Jaký je rozdíl mezi bublinami a kaménky?
3. Popiš zařízení ke kontrole bublinatosti.
4. Vysvětli, co jsou šlíry a jaká je příčina jejich vzniku.
5. Popiš způsob kontroly šířovitosti.
6. Vysvětli pojem odsklenní.
7. Co je to optická stejnorodost? Vysvětli princip jejího měření.
8. Co je to rozlišovací mez optické soustavy?
9. Co je příčinou vzniku vnitřního napětí ve skle?
10. Co je to neutrální zóna?
11. Vysvětli dvojlom světla.
12. Popiš polarizační přístroj.
13. Jak ovlivňuje vnitřní napětí vlastnosti skla?

4. 5. VLASTNOSTI OPTICKÉHO SKLA A JEJICH KONTROLA

Abychom optimálně využili mnoha druhů skel, které se v současné době vyrábějí, musíme dobře znát chování optických skel za různých podmínek.

Vlastnosti optických skel můžeme rozdělit do pěti skupin: optické, chemické, tepelné, mechanické a elektrické.

4. 5. 1. Optické vlastnosti

Optické vlastnosti vymezují, jakým způsobem ovlivňuje sklo jako optické prostředí světelné záření různých vlnových délek, tj. jakým způsobem láme světelné paprsky a do jaké míry je propouští. Optické vlastnosti charakterizují index lomu n a číselní průstupu τ , popřípadě jejich závislost na vlnové délce světla.

Tabulka 6. Vlnové délky vybraných spektrálních čar

Symbol	nm	Chemická značka vyznačujícího prvku	Část spektra — barva
i	365,0	Hg	UV
h	404,7	Hg	fialová
g	435,8	Hg	modrá
F'	480,0	Cd	modrá
F	486,1	H ₂	modrá
e	546,1	Hg	zelená
d	587,1	He	žlutá
D	589,3	Na	žlutá
C'	643,8	Cd	červená
C	656,3	H ₂	červená
A'	768,2	K	červená
il	852,1	Cs	IČ