

Ing. Jitka MOHELNÍKOVÁ, Ph.D.
Ústav pozemního stavitelství
Fakulta stavební VUT Brno

Fasádní zasklení s dynamickou regulací prostupu slunečního záření

Facade Glazing with a Dynamic control of Solar Radiation Transmission

Recenzent
doc. Ing. Karel Brož, CSc.

Článek je věnován vlastnostem druhů skel, omezujících vstup slunečního záření. Na rozdíl od běžných skel reflexních, která nemají spektrální závislost propustnosti záření, se zde popisují tzv. chromogenní zasklení. Ta docilují proměnnou propustnost záření v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření. Tato vlastnost se pozorovateli jeví jako změna zabarvení skla. Podle principu změny spektrální propustnosti záření jsou postupně zmíněna termochromní skla (změna spektrální propustnosti závislá především na teplotě skla), gasochromní (změna propustnosti dosažena chemickou reakcí vrstvy plynu a kysličníku kovu na vnitřním povrchu mezery mezi skly za přítomnosti katalyzátoru, výsledkem je změna zabarvení), fotochromní (tmavnutí vlastní hmoty skla podle intenzity ozáření vyvolaná určitou koncentrací přísad již při výrobě skla – užívané v optice), elektrochromní (změna zabarvení působením elektrického napětí a stejnosměrného proudu ve vrstvě elektrolytu) a konečně zasklení s tenkou vrstvou tekutých krystalů, která mohou nejlépe regulovat poměr mezi propouštěným energetickým tokem a potřebným osvětlením a tím co nejvíce snížit náklady na chlazení budov.

Klíčová slova: Sluneční záření, zasklení, chromogenní zasklení, propustnost záření, spektrální propustnost, elektrolyt, tekuté krystaly

The article is devoted to types of glass properties limiting the transmission of solar radiation. In contrast to common reflection glasses, having not the spectral dependence of radiation permeability, the so called chromogenic glazing types are described. These types of glazing achieve a variable radiation permeability in dependence on the wave-length of impacting radiation. This property appears to the observer as a change glass colouring. According to the principles of spectral radiation permeability change, presented in sequence are: thermo-chrome glasses (the spectral radiation permeability change depending above all on glass temperature), gaso-chrome glasses (permeability change achieved by a chemical reaction of gas layer and metal oxide on the inner surface of the gap between the layers in the presence of a catalyst, resulting in colouring change), photo-chrome glasses (darkening of the glass mass itself according to the radiation intensity, instigated by the concentration of certain ingredients during the glass production process – used in optics), electro-chrome glasses (colouring change due to the voltage and direct current effects in the electrolyte layer), and finally glazing with a thin layer of liquid crystals that can best control the relationship between the transmitted energy flow and the needed illumination, thereby reducing costs of buildings cooling load.

Key Words: solar radiation, glazing, chromogenic glazing, radiation permeability, spectral permeability, electrolyte, liquid crystals

Motivace k využívání solární energie a energeticky úsporné programy způsobily rozšíření speciálních druhů zasklení. V rámci programu International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme (IEA/SHC) [1] byl prováděn výzkum v oblasti „Advanced Glazing Materials“. Zasklení z těchto materiálů dostala označení „Windows 21-C“, což znamená zkratku pro okna 21. století. Jsou to inteligentní systémy, které mají schopnost do velké míry ovlivňovat vnitřní prostředí v budovách nezávisle na člověku. Vytváří tak účinnou ochranu proti nežádoucím tepelným ztrátám a některé druhy také zabraňují oslňování a přehřívání místností. Hlavními reprezentanty těchto speciálních skel jsou:

- reflexní skla, ve stavebnictví často označovaná jako zasklení s nízkou emisivitou,
- skla omezující vstup slunečního záření – tzv. chromogenní zasklení (termochromní, gasochromní, fotochromní a elektrochromní skla, popřípadě zasklení využívající efektu kapalných krystalů).

1. CHROMOGENNÍ ZASKLENÍ

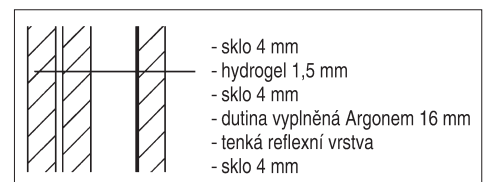
Předmětem světového výzkumu je již od osmdesátých let minulého století problematika tzv. chromogenních jevů [2]. Mezi chromogenní jevy patří například elektrochromismus, fotochromismus nebo termochromismus, vlivem kterých dochází ke změnám vlastností materiálů v závislosti na působícím záření. Praktické využití těchto jevů přineslo, mimo jiné, i vývoj speciálních zasklení, která mají schopnost měnit své optické vlastnosti. Tato skla nabízí možnost dynamické regulace prostupu slunečního záření,

což je ve stavebnictví využitelné hlavně u velkých budov s prosklenými fasádami. Prosklené budovy mívají problémy s přehříváním a oslňováním interiérů, které vedou ke zvýšeným požadavkům na ventilaci a chlazení a tím i k vyšší energetické spotřebě.

1.1 Termochromní skla

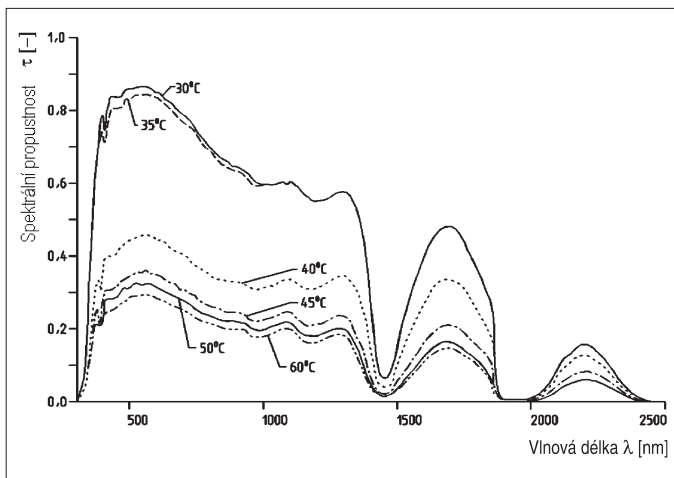
Termochromní zasklení obsahují vrstvy s tepelně aktivními gely, které mají schopnost měnit své optické vlastnosti v závislosti na teplotních změnách [1].

Tyto gely obsahují termochromní látky, které se skládají ze dvou složek s rozdílnými indexy lomu. Při nízké teplotě vytváří obě složky homogenní a transparentní materiál. Jestliže dojde ke zvýšení teploty na limitní hodnotu (20 až 50 °C), složky se oddělují do velmi malých částic (s rozměry blízkými se vlnové délce světla), což způsobí silnou disperzi dopadajícího záření. Aktivovaná termochromní vrstva se jeví jako bílá. Složení termochromního zasklení je podle [1] uvedeno na obr. 1.



Obr. 1 Skladba termochromního zasklení

Na obr. 2 je uveden průběh spektrální propustnosti termochromního zasklení obsahujícího vrstvu 800 µm hydrogelu mezi dvěma tabulemi skla float tl. 4 mm [1].



Obr. 2 Spektrální propustnost termochromního zasklení v závislosti na teplotě [1]

Z obr. 2 je patrné, že k výraznému snížení propustnosti dochází při teplotách vyšších než 40 °C, ale i mezi 30 a 40 °C. Optické vlastnosti termochromních hydrogelů a polymerních směsí jsou zkoumány na Oxford Brookes University ve Velké Británii [1]. Tato skla lze použít v prostorech, kde je vyžadováno osvětlení pouze difúzním zářením (např. výstavní sály apod.).

1.2 Gasochromní skla

U gasochromních skel dochází ke změnám v prostupu slunečního záření vlivem chemické reakce vodíku s oxidem wolframu. Silně zředěný vodík přítomný v dutině mezi skly speciálního izolačního dvojskla, reaguje s oxidem wolframu (WO_3), který je v podobě tenkého filmu nanesen na vnitřní stranu jedné ze skleněných tabulí.

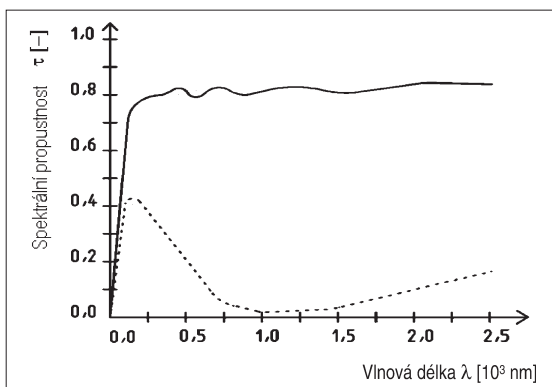
Chemická reakce $xH + WO_3$ (transparentní) $\rightarrow H_xWO_3$ (modrá) způsobí modré zabarvení skla. U zasklení v zabarveném stavu dochází k pohlcení a rozptýlení dopadajícího slunečního záření. Opačného efektu, kdy se dvojsklo vrací do transparentního stavu, se dosahuje silně zředěným kyslíkem [4].



Obr. 3 Skladba gasochromního zasklení

Na obr. 4 je uvedena ukázka spektrální propustnosti slunečního záření gasochromním sklem. Čárkovaná čára představuje průběh spektrálního činitele prostupu v době intenzivního slunečního svitu, kdy dochází k modrému zabarvení zasklení.

Výzkum v oblasti gasochromních skel se provádí např. ve Fraunhofer Institutu v Německu [4].



Obr. 4 Spektrální propustnost gasochromního skla [1]

1.3 Fotochromní skla

Reference o využití fotochromismu jsou známy již z roku 1880 [5, 6]. Fotochromní skla byla vyvinuta po druhé světové válce v zemích s vyspělým sklářským průmyslem, kde byl zaznamenán intenzivní rozvoj výzkumné činnosti v oboru skel vystavených účinku různých druhů záření. Jedná se o skla, která se vlivem expozice záření vhodných vlnových délek zabarvují – probíhá tvorba barevných center uvnitř skelné hmoty. Po přerušení ozáření skla nabývají opět svého původního stavu, dochází k destrukci barevných center.

Jedna z možností jak dosáhnout fotochromních vlastností u skel je využití fotochemické reakce vybraných látek. Jedná se tedy o skla obsahující fotochemicky citlivé látky přímo ve skelné hmotě. Těmito látkami mohou být halogenidy stříbra, europium a cer, halogenidy Cu a Cd. Existují však i in-formace o sklech s obsahem chromu, molybdenu, wolframu a skel s minerály typu Hackmanit [6]. Na základě studia kinetiky fotochemických pochodů probíhajících v uvedených typech fotochromních skel jsou za nejvhodnější považována skla obsahující halogenidy stříbra [5,6].

Průběh vratné fotochromní reakce je ovlivněn složením základního skla, koncentrací a druhem halogenidů stříbra či jiných fotochemicky citlivých látek, druhem a koncentrací stabilizátoru a režimem tepelného zpracování fotochromních skel. Tvorba barevných center je podmíněna účinkem ultrafialového a krátkovlnného viditelného záření. Naproti tomu destrukce barevných center je podmíněna dlouhovlnným viditelným a krátkovlnným infračerveným zářením. Dále existují tzv. „neutrální“ vlnové délky záření, které nepůsobí na tvorbu ani destrukci barevných center.

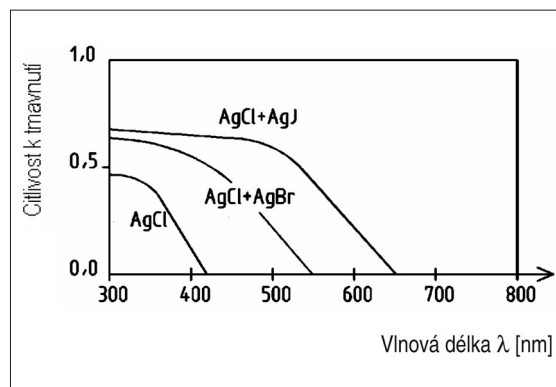
Při interakci slunečního záření s fotochromním sklem dochází k tvorbě barevných center v poměrně širokém rozsahu vlnových délek, od ultrafialové (UV-C) oblasti až do viditelné oblasti (přibližně 650 nm). Skla obsahující mikrokristaly $AgCl$ jsou citlivá k záření vlnových délek do 400 nm, skla obsahující směsné krystaly ($AgCl + AgBr$) nebo samotný $AgBr$ k záření do 500 nm, a skla obsahující směsné krystaly $AgCl + AgJ$ až do vlnové délky 650 nm [6].

Na obr. 5 je uvedena závislost citlivosti k tmavnutí fotochromních skel na vlnových délkách aktivujícího záření.

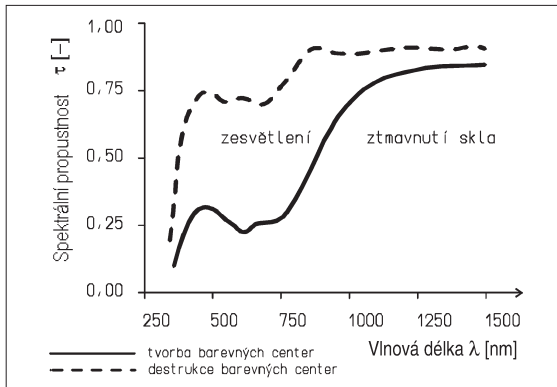
Skla obsahující mikrokristaly $AgCl$ jsou citlivá pouze k ultrafialovému záření [5]. Vystavením tohoto skla ultrafialovému, viditelnému a blízkému infračervenému záření, dochází k urychlení destrukce barevných center [6].

Účinkem záření vhodných vlnových délek tedy nastává vznik barevných center v krystalech halogenidů stříbra, což způsobí ztmavnutí fotochromního skla. Na obr. 6 je uvedena ukázka spektrální propustnosti fotochromního skla [5].

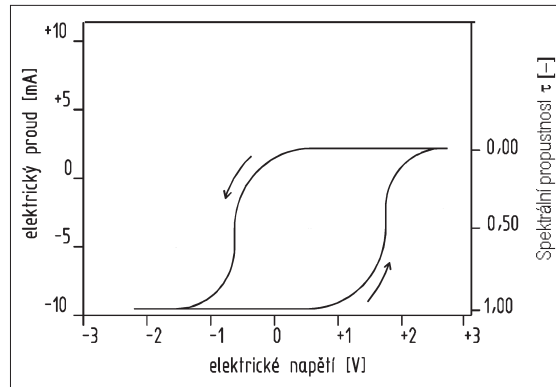
Fotochromní skla se používají v optice. U okenních zasklení ve stavebnictví však tento typ skla nenašel širšího uplatnění.



Obr. 5 Závislost tvorby barevných center na vlnových délkách [5]



Obr. 6
Spektrální propustnost fotochromního skla [6]



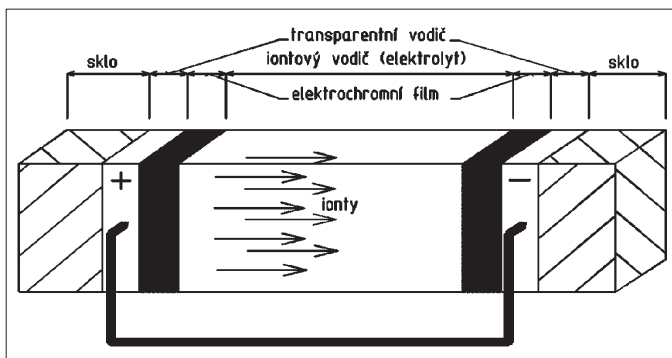
Obr. 9
Závislost propustnosti elektrochromních skel na elektrickém napětí [3]

1.4 Elektrochromní skla

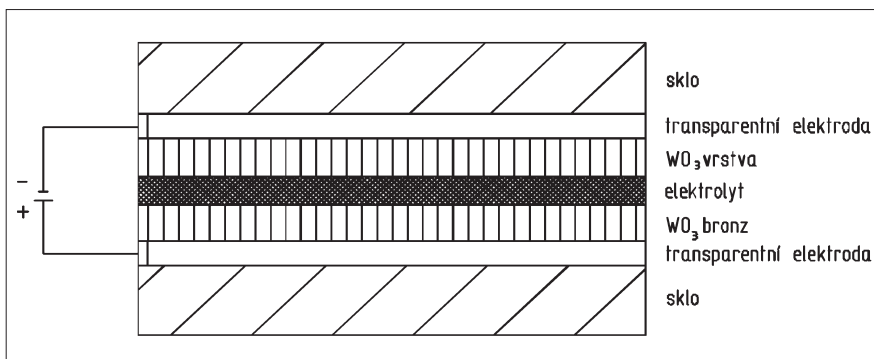
Technologie tenkých vrstev daly podnět k vývoji speciálních druhů zasklení, která mění své optické vlastnosti vlivem působení elektrického napětí. Elektrochromismus je vratná elektrochemická změna optických vlastností elektrochromních materiálů [2]. K elektrochromnímu jevu dochází tehdy, jestliže elektrický proud procházející materiálem mění jeho chemickou strukturu a tím i výsledné spektrální charakteristiky. Dochází k procesu inzerce iontů látkám, které jsou závislé na druhu a počtu vkládaných iontů. Migrací iontů centrálním elektrolytem je dodáván elektrochromní materiál, což způsobuje ztmavnutí.

Základní požadavky na elektrochromní materiál jsou přítomnost barevných center, která zajišťují optickou absorpci ve viditelné části spektra elektromagnetického záření a iontová a elektronová vodivost, která je nezbytná pro udržení elektroneutality.

Elektrochromní materiály jsou předmětem světového výzkumu [2,8]. Mezi nejznámější materiály patří oxidy wolframu, vanadu, molybdenu a titanu (WO_3, V_2O_5, TiO_2) a směsné oxidy těchto kovů. Redukovanou formou oxidů jsou tzv. bronz (např. $AxWO_3$ bronz wolframu, nebo se také používá bronz molybdenu). Vkládanými ionty jsou většinou ionty vodíku a alkalických kovů, lithia, sodíku nebo draslíku). Intenzita zabarvení závisí přede-



Obr. 7 Elektrochromní sklo [3,8]



Obr. 8 Skladba elektrochromního zasklení [3,8]

vším na množství prošlého náboje a tloušťce filmu aktivního materiálu. Používají se také hydratované oxidy iridia, rhodia, niklu a kobaltu (IrO_2, RhO_2, NiO, CoO_2), jejichž složení výrazně ovlivňuje schopnost přijímat inzerované částice, jimiž jsou anionty.

Elektrochromní film se podle [3] skládá z pěti vrstev. Vnější vrstvy jsou tvořeny transparentním materiálem s elektronovou vodivostí např. SnO_2 , další vrstvy jsou tvořeny vlastním elektrochromním materiálem se smíšenou (iontovou i elektronovou) vodivostí a střední vrstva je iontovým vodičem (elektrolyt).

Po připojení vnějšího zdroje napětí proběhne elektrochemická reakce a v aktivním materiálu dojde kvázně barevné změně, která přetrvává i po odpojení zdroje. Elektrochromní materiály jsou schopny měnit své zabarvení v době 150 až 300 ms^{-1} a barevnou změnu udržet bez napětí minimálně dva dny [8]. Změna barvy je vratná a návrat do původního stavu se děje zpětnou reakcí, po přiložení napětí s opačnou polaritou. Prvek je schopen tuto změnu absolvovat v desetitisících cyklech [1]. Zvýšení napětí má za následek vyšší propustnost záření, záporné napětí propustnost snižuje.

Ukázka elektrochromní zasklivačské soustavy (Flabeg) i spektrální propustnosti elektrochromního skla je uvedena na obr. 10.

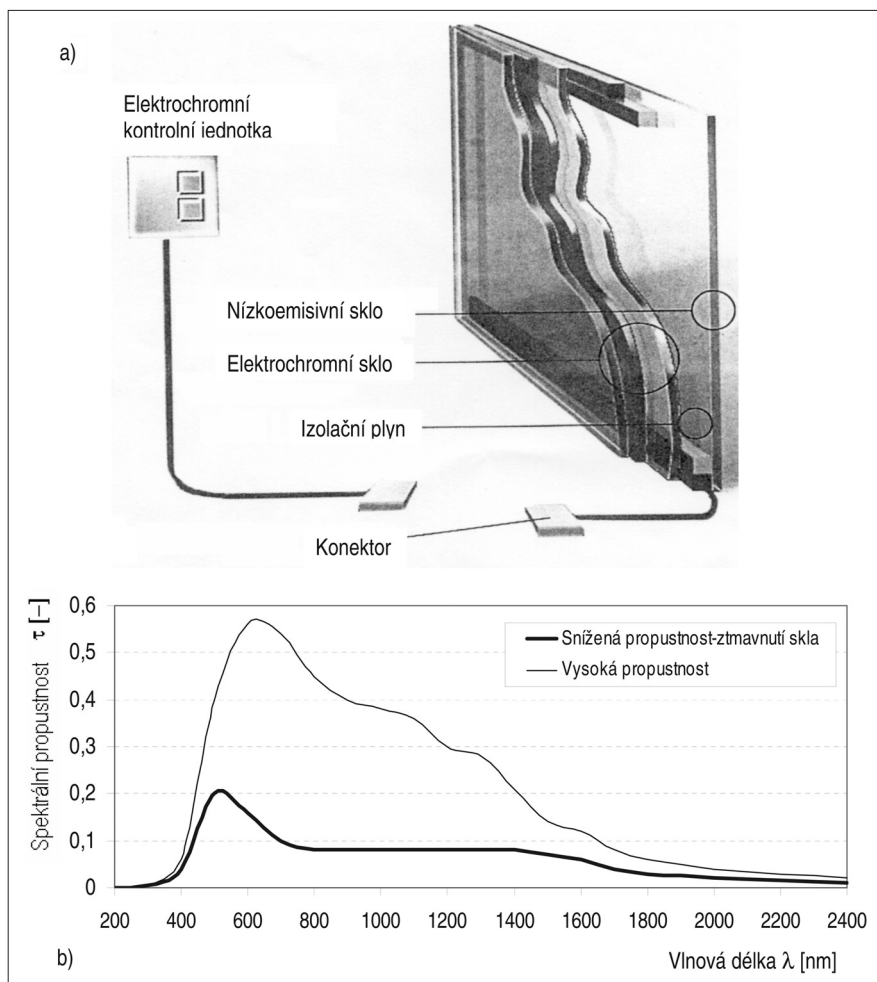
Běžné charakteristické zabarvení elektrochromních materiálů je modré, ale směsí vhodných oxidů je možné docílit i jiné barevnosti, čehož lze s výhodou využívat například při architektonickém návrhu prosklených budov.

V současné době je zvládnutá problematika malorozměrových zasklení např. pro automobilová okénka, kde speciální elektrochromní skla, takzvaná „smart window glass“ [1,2], vyvinutá v USA, našla široké a opodstatněné uplatnění (ochrana řidiče před nebezpečným oslňováním). Nyní je snaha o aplikace elektrochromních skel větších ploch a jejich využití v současné architektuře. Vývoj je zaměřován na elektrochromní vrstvy obsahující oxidy wolframu a oxidy molybdenu, které mají vytvořit základy pro trvanlivé filmy neutrální v barvě vhodné pro úpravu zasklení oken [8].

1.5 Skla s tenkými vrstvami z tekutých krystalů

Tekuté krystaly byly objeveny na začátku sedmdesátých let v Anglii (George Gray) [3]. Jsou to látky vykazující vlastnosti kapalin a krystalů. Tekuté krystaly jsou charakterizovány tzv. dynamickým rozptylem, což je elektro – optický jev, při kterém se vyzáří z původně průzračné kapaliny silně rozptýlené světlo (např. připojí-li se stejnosměrné elektrické pole na určitý druh kapalného krystalu).

Dynamický rozptyl byl vysvětlen [9] vznikem rozptylových center v důsledku průchodu iontů mezi pravidelně uspořádanými neutrálními molekulami. Neprůzračnost vzniká difuzním odrazem světla při pohybu shluku iontů ve směru připojeného vnějšího



Obr. 10 Elektrochromní zasklení (Flabeg) [7]

a) fotografie elektrochromní zasklívací jednotky

b) spektrální propustnost elektrochromního skla

elektrického pole. Při tomto pohybu dochází k místnímu odklonu v orientaci molekul kapalného krystalu, vznikají rozptylová centra se změněným indexem lomu, ve kterých se dopadající světlo ostře láme. Rozptylová centra vznikající v elektrickém poli mají průměr asi 1 až 5 μm , to znamená, že jsou pět až desetkrát větší než vlnová délka dopadajícího světla. Dynamický rozptyl tedy není závislý na vlnové délce.

Tekuté krystaly nacházejí velké použití pro malou spotřebu elektrické energie do displejů kapesních kalkulaček, počítačů a televizních obrazovek. Použití také nacházejí k reklamním účelům k zobrazování firemních znaků nebo písmen, které se po připojení napětí objeví v místech, kde byla odleptána elektroda [9]. Tato místa jsou průhledná, zatímco okolí je matné a temné. Další možnost využití je při řízení dopravy nebo ve sportovních zařízeních jako informační tabule.

V současné době se objevují snahy používat vlastností tekutých krystalů pro elektronicky ovladatelné zclonění oken nebo celých skleněných stěn. Jediná překážka bránící rozšíření této úpravy zasklení je její značně vysoká pořizovací cena. Na vývoj a výrobu speciálních skel používajících tekutých krystalů se soustřeďují společnosti jako Taliq Corporation of California a Nippon Sheet Glass Company nebo společnost Saint Gobain.

Pro realizaci těchto zasklení jsou tekuté krystaly v polymerové matici uzavřeny mezi dvěma tenkými vrstvami tvořenými oxidy india a cínu, tzv. ITO filmy (indium-tin oxide). Připojením elektrického pole se vyvolá dynamický rozptyl a zasklení se mění z transparentního na opálově bílé, čímž se okno stává neprůhledným. Je-li plocha okna složena z několika jednotek, lze využít i barevných přeměn a elektronicky vytvářet barev-

nou mozaiku. Ve spojení s fotoelektrickým odporem lze elektronicky řídit intenzitu světla procházejícího do interiéru [9].

ZÁVĚR

Z uvedených typů speciálních skel se v architektuře a stavebnictví uplatnilo nejvíce sklo elektrochromní. I tento typ skla však zatím nenašel široké použití. Elektrochromní zasklení se vyskytují především u velkých budov komerčního charakteru nebo v případě experimentálních projektů. Vysoké pořizovací náklady stále ještě brání jejich rozšířenému používání.

Výhoda uvedených chromogenních zasklení v porovnání s běžnými typy skel spočívá v možnosti dynamické regulace prostupu slunečního záření. Tato zasklení omezují přehřívání a oslňování místností při současném zajištění zrakové pohody v interiéru. Běžná protisluneční skla mají potlačená průstupy v oblasti viditelného i krátkovlnného infračerveného záření. Působí tedy jako permanentní světelné filtry. Při podmínkách zatažené oblohy dochází v místnostech s takovým zasklením ke snížení denní osvětlenosti, což vyvolává nutnost kombinovaného nebo stálého umělého osvětlení.

Ve většině případů se tedy dostatečně nevyužije výhod transparentních fasád, které by měly zajišťovat vizuální kontakt s okolím, denní osvětlení a tepelné zisky ze slunečního záření. Prosklené fasády mnohdy znamenají pro budovy vysokou energetickou zátěž.

Chromogenní zasklení představují jeden z možných způsobů řízené regulace solárních zisků, které by v případě jejich vyšší aplikovatelnosti mohly přispět ke zlepšení zrakové a tepelné pohody v budovách.

Spojení na autorku: mohelnikova.j@fce.vutbr.cz

Použité zdroje:

- [1] Hutchins., M.G.: Advanced Glazing Materials, *Solar Energy*, Vol.62, No 3, 1998
- [2] Munshi, M.Z.A.: *Handbook of Solid State Batteries and Capacitors*, World Scientific, London 1995
- [3] Wigginton, M.: *Glass in Architecture*. Phaidon Press Ltd, London 1996
- [4] Willson, H.R., Blessing, R., Hangenstrom, H., Platzer, W.J., Dvorjetski, D., The optical properties of gasochromic glazing. Conference proce. of the 4th International conference on coating on glass, Braunschweig 2002, Germany
- [5] Fandelík, I.: *Vlastnosti skel*. Informatorium Praha 1996
- [6] Fandelík, I.: *Fotochromická skla*. Státní výzkumný ústav sklářský-Informativní přehled č. 4/1969, roč. XII
- [7] Stránský, F.: Elektrochromatické izolační sklo. *Stavební aktuality* 1998
- [8] Juřica, A.: *Elektrochromismus*. Výzkumná zpráva grantového projektu č. 104/96/13 21 FEI VUT Brno, 1997
- [9] Miškařík, S.: *Moderní zdroje světla*. SNTL, Praha 1979
- [10] Vlček, M., Mohelníková, Vondrák, J., Sedlaříková, M.: Electrochromic glazing for window applications. Abstract proceedings of the International conference MSM 2005, Vilnius, Lithuania, October 2005, ISBN 9986-05-900-3, pp. 152
- [11] Macalík, M., Vondrák, J., Sedlaříková, M., Mohelníková, J., Helán, R.: Thin films for electrochromic devices. Sborník příspěvků z 6. mezinárodní konference ABA-Advanced Batteries and Accumulators, Brno 2005, ISBN 80-214-2944-5.