

HI-SMART: BALÍK VYŠŠIEHO VZDELÁVANIA PRE TAKMER NULOVÚ SPOTREBU
ENERGIE A NÁVRH INTELIGENTNÝCH BUDOV

MODULE # 2

**ČASŤ 2: MODERNÉ OKENNÉ KONŠTRUKČNÉ SYSTÉMY ZAMERANÉ
NA ENERGETICKÚ EFEKTÍVNOŠŤ OBALOVÝCH PLÁŠŤOV BUDOV**

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



STU

SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA



ENERGIACLUB
CLIMATE POLICY INSTITUTE
APPLIED COMMUNICATIONS

1.1 OKNÁ V KONŠTRUKČNEJ SKLADBE BUDOV

Budovy s takmer nulovou spotrebou energie (nZEB – near Zero Energy Buildings) majú spĺňať veľmi vysoké požiadavky na energetickú hospodárnosť. Tieto budovy budú zvyčajne zahŕňať vysokú úroveň izolačných schopností obvodového plášťa, energeticky efektívne okenné konštrukcie, vysokú úroveň vzduchotesnosti a vyvážené mechanické vetranie s rekuperáciou tepla pri mechanickom vetraní na zníženie potreby vykurovania/chladenia. Hoci takmer nulové alebo veľmi nízke množstvo potrebnej energie by malo byť do značnej miery pokryté energiou z obnoviteľných zdrojov, dôležitú úlohu zohráva kvalita stavebných materiálov a prvkov, aby sa ušetrila aj energia zabudovaná do budovy.

Niet pochýb o tom, že pre úsporu energie môže byť správny výber typu okien rozhodujúci. Preto výber energeticky efektívnych okien s vhodnými vlastnosťami môže výrazne znížiť spotrebu energie budovy a jej prevádzkové náklady. Okná, resp. okenné systémy predstavujú dôležitú integrálnu súčasť tepelného obalu budovy, ktorý priamo ovplyvňuje aj návrh a funkciu ostatných mechanických systémov TZB. Kľúčové vlastnosti, ktoré by sa mali okenné systémy spĺňať, sú v základe nasledovné:

- tepelnotechnické vlastnosti :
 - U hodnota ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) (U_f, U_g, U_w)
 - g hodnota (-), variantne: Solar Heat Gain Coefficient
- optické vlastnosti:
 - LT, L_{vis} – svetelná priepustnosť (transmitancia)
 - RT, R_{vis} – svetelná odrazivosť (reflektancia)

Simulácie stavieb návrhu nám dnes môžu napovedať už v počiatočnom štádiu návrhu stavby, či náš požadovaný pomer medzi nepriehľadnými a transparentnými konštrukciami môže viesť k energeticky efektívnemu dizajnu alebo nie, súbežne so zachovaním požiadaviek na zabezpečenie komfortu užívateľov akými sú potreby pre vizuálne úlohy alebo hygienické kritériá. Moderné simulačné softvérové nástroje nám umožňujú zmeniť tento pomer ako parametrický vstup a tým poskytnúť architektom dôležitú informáciu pre definovanie tvaru a architektonického výrazu.

Pri moderných budovách, ktoré nachádzajú inšpiráciu v prírode prostredníctvom organickej architektúry, je vidieť, že architekti sa vo veľkej miere spoliehajú na transparentné konštrukcie v ich obálkach. Dôležitý je potom nielen správny výber konkrétnych materiálov, ale aj finálne spracovanie a tvarovanie pripomínajúce organické štruktúry týchto systémov.

Nasledujúce domény môžu ovplyvniť výkon okenných systémov:

- Tepelné mosty
- Tepelný a vizuálny komfort
- HVAC a osvetlenie

- Akustické vlastnosti
- Podanie farieb
- Vniknutie vody

Riešenie tepelných mostov je spojené najmä so správnou skladbou každého okenného prvku a jeho montážou, ale musí zahŕňať aj tepelné mosty vznikajúce pri montáži okenných rámov do ostenia pomocou správnych napojovacích prvkov, ktorých absencia môže viesť nielen k energetickým stratám (lineárne tepelné mosty), ale aj k problémom s kondenzáciou a údržbou.

Tepelná pohoda je väčšinou spojená so sálavou zložkou slnečného žiarenia prenikajúceho do budovy, čo musí byť zohľadnené pri výpočtoch potrieb tepla a chladu, ako aj zabezpečením tepelného komfortu užívateľov. Teplo, ktoré prechádza oknami, je želaným tepelným ziskom počas vykurovacieho obdobia, ale pri nadmerných množstvách tejto slnečnej energie môže výrazne ovplyvniť energetickú bilanciu prostredníctvom potreby zabezpečenia chladenia pri jej prehrievaní.

Návrh denného osvetlenia je efektívna stratégia, ktorú nemožno zanedbať. Veľké presklenné plochy sú navrhované tak, aby maximalizovali prienik viditeľného svetla, ale v mnohých prípadoch je ich potrebné vo výsledku zatmavovať alebo tieniť. Nevhodne navrhnuté alebo nedostatočné tieniace zariadenia môžu spôsobiť oslnenie. Preto je potrebné dosiahnuť optimálnu rovnováhu medzi vizuálnym komfortom, dostupnosťou denného svetla a energetickou bilanciou budovy. Na Slovensku sa vyžaduje svetelná priepustnosť zasklievacích systémov okenných systémov na úrovni 60 %.

Správny návrh z hľadiska denného osvetlenia môže ušetriť na potrebách umelého osvetlenia a môže znížiť veľkosť a spotrebu energie pre systémy VZT, pretože energeticky efektívne okenné konštrukcie a zasklievacie systémy ovplyvňujú špičkové vykurovacie a chladiace zaťaženie budovy.

Akustické vlastnosti sa stávajú rozhodujúcimi pri umiestnení budovy v blízkosti zdroja hluku, ako sú rušné dopravné plochy, technologické zariadenia alebo letiská. Správnu skladbu zasklievacieho systému vrátane rôznych hrúbok skiel je potrebné vypočítať, častokrát sa používajú v kombinácii s dodatočnými vetracími jednotkami, keďže tieto okná sú určené na používanie bez možnosti otvárania.

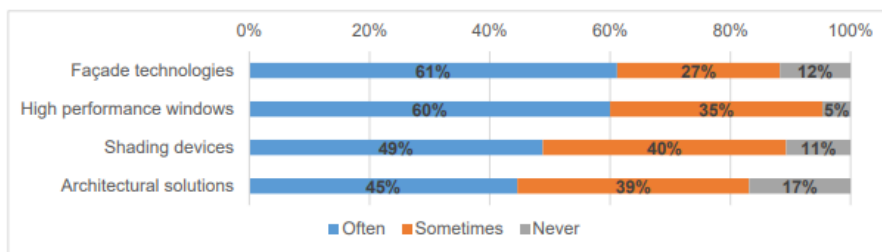
Farebné podanie sa stáva dôležitým, keď sa architekt rozhodne použiť farbené alebo tónované zasklenie. Tieto dodatočné vrstvy, prípadne iné prídavky k číremu sklu môžu zmeniť spektrálnu priepustnosť zasklenia a tým ovplyvniť kvalitu svetla prenikajúceho do budovy. V súčasnosti sa bežne používa číre sklo, ktoré by nemalo mať negatívny vplyv na užívateľov, ale architekt by mal byť opatrný pri používaní zasklenia s indexom podania farieb (Ra) < 0,9.

Vnikanie atmosferickej vody je problémom všetkých komponentov stavebnej konštrukcie a je väčšinou vecou správneho návrhu detailov. Zatiaľ čo samotné zasklievacie systémy majú vo všeobecnosti vysokú odolnosť voči parám, konštrukcia rámu a jeho napojenie na prvky obvodového plášťa budovy môžu vytvárať slabé miesta umožňujúce prienik dažďovej vody do interiéru. Výsledkom je nielen znehodnotenie vnútorných povrchových úprav, ale aj zníženie kvality vzduchu v interiéri a ovplyvnenie tepelnotechnických vlastností okolitých konštrukcií.

Okná sú súčasťou riešení energetickej efektívnosti budov, ktoré zahŕňajú najmä:

- tepelnotechnické riešenia obvodového plášťa budovy –prvky ako steny, strecha...
- pasívne stratégie chladenia - prirodzené vetranie, tienenie ...

Tieto energeticky efektívne riešenia predstavujú základy návrhu obalových konštrukcií a systémv TZB budovy. Keďže ich životnosť je navrhnutá v súlade s ekonomickým využívaním budovy, je potrebné ich vyberať aj s cieľom ľahkej údržby a minimalizovania potreby ich výmeny v krátkom časovom horizonte.



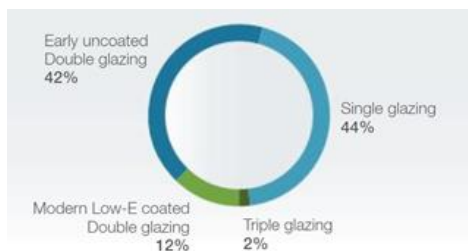
Obr. 2.1 Podiel energeticky efektívnych prvkov v návrhu nZEB budov (ZEBRA 2020)

Podľa prieskumu projektu Zebra 2020 projektanti pri realizácii nZEB využívajú v základe návrhu najmä pokročilé fasádne technológie a energeticky efektívne okenné konštrukcie. Architektonické riešenia ako návrh prirodzeného osvetlenia, umožnenie pasívneho chladenie boli medzi možnosťami menej preferované.

1.2 OKNÁ V EURÓPSKEJ ÚNII

V EÚ môžu členské štáty stanoviť požiadavky na úžitkové vlastnosti stavebných výrobkov dostupných na ich trhu. Uprednostňuje sa systém rôznych požiadaviek na technické vlastnosti okien naprieč EÚ. To je definované nielen rôznymi klimatickými špecifikáciami jednotlivých krajín, ale aj každá krajina má jedinečný stavebný fond budov a zaužívané stavebné postupy. V štúdií zadanej Európskou komisiou sa okná v EÚ považujú zodpovedné za 24 % potreby po energie na vykurovanie a 9 % potreby energie na chladenie. Odhaduje sa tiež, že viac ako 85 % presklených plôch v budovách EÚ je vybavených buď jednoduchým zasklením alebo obyčajným dvojitém izolačným sklom bez povrchovej úpravy, t. j. výrobky

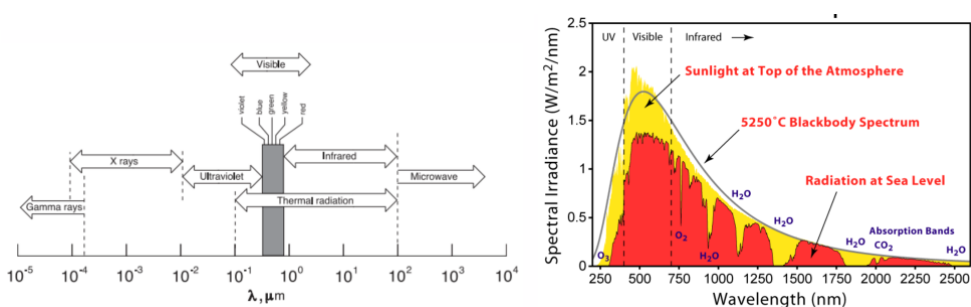
spred 70-tych až 80-tych rokov, zatiaľ čo dnes, bežné zasklievacie systémy sú 5 až 10krát energeticky úspornejšie. To nám dáva obraz o situácii v EÚ a vyžaduje našu pozornosť na zlepšenie tohto kľúčového komponentu plášťa budovy.



Obr. 2.2 Podiel typov zasklení v EÚ (GlassEurope)

1.3 SOLÁRNE ŽIARENIE A OKNÁ

Slnčné žiarenie je všeobecný pojem pre elektromagnetické žiarenie vyžarované slnkom. Keď slnečné svetlo prechádza atmosférou, časť z neho je absorbovaná, rozptýlená alebo odrazená vodnými parami, prachom, znečisťujúcimi látkami a inými zložkami atmosféry. To má za následok vytvorenie difúzneho slnečného žiarenia. Slnčné žiarenie, ktoré dopadá na zemský povrch bez toho, aby bolo rozptýlené, sa nazýva priame slnečné žiarenie. Súčet priameho a difúzneho žiarenia sa nazýva globálne slnečné žiarenie. Atmosférické podmienky môžu znížiť intenzitu dopadajúceho žiarenia, ktorá ovplyvňuje budovy v rôznych stupňoch. Spektrum slnečného žiarenia je blízke spektru vyžarovania čierneho telesa s teplotou asi 5800 K. Približne polovica tohto žiarenia (43 %) je vo viditeľnej časti elektromagnetického spektra (400 – 700 nm) a zvyšok je väčšinou (52 %) v blízkej infračervenej časti (700 – 2 500 nm) s malou časťou (5 %) v ultrafialovej (300-400nm) časti spektra.



Obr. 2.3 elektromagnetické spektrum a spektrum slnečného žiarenia

Keďže slnečná energia z neviditeľnej časti spektra tvorí viac ako 50 % slnečnej energie, ovplyvňovanie prestupu tohto neviditeľného slnečného spektra pomocou rôznych zasklievacích materiálov a ich povrchov môže hrať významnú úlohu pri návrhu nZEB.

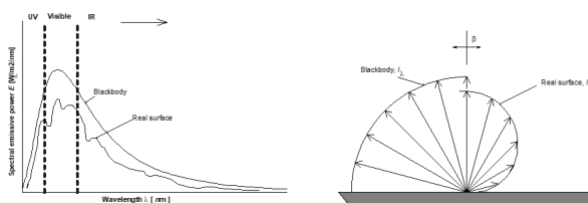
Pri dopade na zemský povrch sa žiarenie v závislosti od jeho vlnovej dĺžky a smeru, ako aj od charakteru materiálu, na ktorý dopadá, odráža, prenáša alebo absorbuje. V priehľadných a polopriehľadných materiáloch (napr. sklenená tabuľa, voda) sa vyskytujú všetky tri javy, t.j.

$$\rho \text{ (reflexia)} + \tau \text{ (transmisia)} + \alpha \text{ (absorpcia)} = 1 \quad (1)$$

Pri nepriehľadných materiáloch priepustnosť nemôžeme aplikovať, preto:

$$\rho \text{ (reflection)} + \alpha \text{ (absorption)} = 1 \quad (2)$$

Absorbované žiarenie povrchmi zvyšuje teplotu týchto materiálov alebo konštrukcií a ktorá sa následne odovzdáva (emituje) do prostredia pomocou sálania. Množstvo emitovanej energie je závislé od emisivity (povrchového žiarenia), ε , čo je jedna zo základných charakteristík materiálov. Emisivita je definovaná ako pomer žiarenia emitovaného povrchom materiálu k žiareniu emitovanému čiernym telesom pri rovnakej teplote. Čierne teleso je dokonalým absorbérom a emitentom žiarenia.



(a)

(b)

Obr. 2.4: Porovnanie vyžarovania čierneho telesa a skutočných povrchov (a) Spektrálne rozdelenie, (b) Smerové rozdelenie (I_λ = intenzita žiarenia, β = uhol žiarenia) (Incropera & DeWitt, 1996)

Emisivita daného materiálu závisí od teploty jeho povrchu a vlnovej dĺžky emitovaného žiarenia. Ale závisí aj od smeru žiarenia. Spektrálne rozloženie absorbovaného žiarenia a následnej emisie sa môže líšiť, napr. v prípade skla (obyčajné sklo „premieňa“ absorbované krátkovlnné žiarenie na dlhovlnné žiarenie).

Nepriehľadné materiály a konštrukcie sú charakterizované v stavebnej praxi najmä súčiniteľom tepelnej vodivosti (λ). Pri transparentných materiáloch sa zameriavame najmä na vlastnosti spojené s priepustnosťou slnečného žiarenia. Rozlišujeme dva hlavné typy týchto vlastností – energetické a svetelné (optické). Energetické vlastnosti integrujú viacmenej celé spektrum slnečného žiarenia a sú určené najmä na použitie pri výpočtoch energetickej hospodárnosti budov. Svetelné vlastnosti sa vzťahujú len na viditeľnú časť spektra a sú určené hlavne pre výpočty dostupnosti denného osvetlenia.

Okrem vyššie uvedených charakteristík sa používa globálna charakteristika energetických vlastností zasklenia vo forme celkového koeficientu priepustnosti slnečnej energie, tzv. solárneho faktora g – hodnota (-), alt. koeficientu solárneho tepelného zisku (SGHC).

Solárny faktor (celková priepustnosť slnečnej energie), g , je definovaný v EN 410:1998 ako súčet priamej solárnej priepustnosti τ_{sol} a sekundárneho faktora prestupu tepla q_i zasklenia smerom dovnútra. Sekundárny faktor prestupu tepla je spôsobený konvekciou a dlhovlnným infračerveným žiarením tej časti dopadajúceho slnečného žiarenia, ktorá bola zasklením absorbovaná. Príslušná rovnica pre g -hodnotu je nasledovná:

$$g = \tau_{sol} + q_i \quad (3)$$

Priama priepustnosť slnečného žiarenia, τ_{sol} , je vlastnosťou zasklenia. Je to časť dopadajúceho slnečného žiarenia, ktorá prejde zasklením a dá sa opísať ako primárny tepelný zisk, g_1 , delený celkovým dopadajúcim slnečným tepelným tokom, φ_e . Sekundárny súčiniteľ prestupu tepla q_i je závislý od absorpčných faktorov vrstiev zasklenia, ich emisivity (dlhovlnné infračervené žiarenie), ε a tepelnej vodivosti Λ , vrátane dutín a prestupu povrchového tepla. Je to absorbovaná časť dopadajúceho slnečného žiarenia, ktorá sa premieňa na vodivý a sálavý tepelný tok smerom dovnútra a možno ju opísať ako sekundárny tepelný zisk, g_2 , delený celkovým dopadajúcim slnečným tepelným tokom, φ_e . Ďalšia rovnica pre hodnotu g j

$$g = \frac{g_1 + g_2}{\varphi_e} \quad (4)$$

Solárny faktor je jednou z najdôležitejších charakteristík zasklievacích systémov, pretože umožňuje okamžité a spoľahlivé posúdenie budúceho výkonu zasklievacieho systému z hľadiska energetických - solárnych tepelných ziskov. Moderné zasklievacie systémy sú vybavené vysoko modifikovanými sklenenými tabuľami. Najčastejšie používanou úpravou skla z hľadiska zlepšenia solárnych vlastností je takzvané pokovovanie. Táto metóda je založená na znížení emisivity skla nanosením extrémne tenkej vrstvy oxidov kovov. Výrobcovia používajú rôzne technológie výroby, a to najmä:

- **CVD** (chemical vapor deposition) – proces, pri ktorom sa vrstva nanáša v ponorení skla do roztokov. Tento proces má obmedzenú schopnosť dosiahnuť vysoko výkonné úrovne solárnej ochrany.

- **Sprejová pyrolýza** – proces, pri ktorom sa povlak oxidov kovov nastrieka na povrch, kde reakciou vznikne trvanlivá vrstva. Tento typ môže zhoršiť farebnosť podkladového skla a zvýšiť odrazivosť, čím sa zníži priepustnosť svetla

- **MSVD** – (Magnetron Sputter Vacuum Deposition) – proces, pri ktorom sa povlak nanáša vo vákuovej komore na hotové predrezané sklenené tabule. Tento typ umožňuje nižšiu emisivitu a lepší stupeň protislnečnej ochrany. Vzhľadom na povahu povlakovej vrstvy by väčšina z nich mala byť umiestnená dovnútra alebo laminovaná, aby sa zabránilo jej poškodeniu vonkajšími vplyvmi. Väčšina nízkoenergetických zasklení s protislnečnými vlastnosťami je vyrobená pomocou tejto technológie.

Pomocou týchto metód môžeme znížiť emisivitu skla z približne 0,95 (číre sklo) na 0,2 alebo menej. Táto skupina zasklení sa označujú ako zasklenia s nízkou emisivitou alebo „low-e“ zasklenia.

Poloha nízko emisnej vrstvy je v rámci zasklievacieho systému veľmi dôležitá a jej umiestnenie definuje výsledné vlastnosti tohto systému. Typické nízkoenergetické zasklenie môže pôsobiť ako:

-Protislnečné zasklenie: blokuje slnečné žiarenie, aby sa znížili solárne zisky, čo má za následok konečné zníženie nákladov na chladenie. Tento typ skla sa zvyčajne používa vo veľkých kancelárskych budovách, kde je použitie vonkajších tieniacich systémov obmedzené.

-Tepelnoizolačné „low-e“ zasklenie: prepúšťa slnečné žiarenie v menšom množstve, avšak najmä odráža dlhovlnnú tepelnú energiu z interiéru späť dovnútra a tým zlepšuje tepelnoizolačné vlastnosti zasklenia.

Na dosiahnutie najlepšieho výsledku by mal byť v jednej dutine zasklievacieho systému umiestnená len jedna vrstva s nízkou emisivitou. Okrem týchto základných typov nízkoemisných zasklení existujú aj tónované, reflexné, antireflexné či iné typy špeciálnych skiel.

Okrem technológie nízkoemisných povlakov existuje aj možnosť aplikácie napríklad reflexných vrstiev so špeciálnymi požadovanými spektrálnymi vlastnosťami (známe aj ako spektrálne selektívne filtre) vo forme fólií. Hlavnou výhodou tejto techniky je, že túto fóliu je možné aplikovať aj po montáži okien alebo pri rekonštrukcii starších budov.

Nevýhodou týchto úprav zameraných na solárne vlastnosti zasklenia je, že ovplyvňujú aj optické vlastnosti zasklievacích systémov a to v negatívnom zmysle. A preto obrovské zníženie solárneho faktora (zníženie vonkajších tepelných ziskov) má za následok aj zníženie priepustnosti svetla, čo môže viesť k zvýšenému využívaniu umelého svetla a tým spôsobené zvýšenie spotreby energie a zvýšenie vnútorných tepelných ziskov.

Popri klasickom prístupe využitia nízkoenergetických skiel dochádza k určitému pokroku aj vo výskume a vývoji.

Stratégie na zlepšenie prvkov okenných konštrukcií so zameraním na zasklievacie systémy sú:

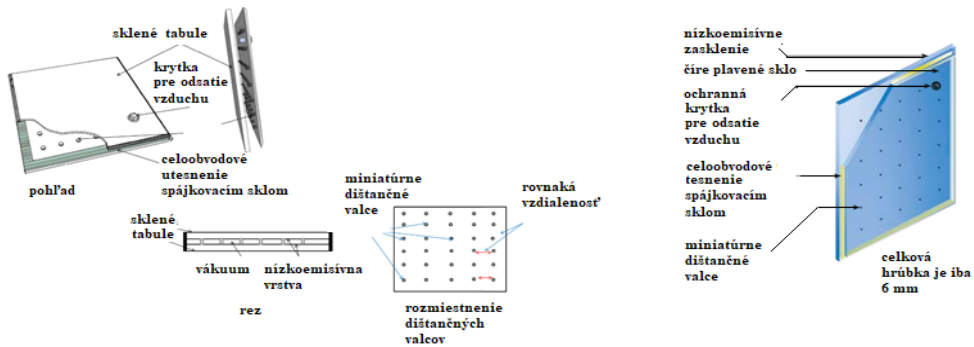
- Statické systémy (technológia nízkoemisných povlakov, viacvrstvé zasklenia, vákuové panely, aerogélom plnené sklo ...)
- Aktívne systémy (elektrochromické sklá (EC), rozptýlené častice (SP), tekuté kryštály (LC) ...)
- Pasívne systémy (PCM, termochromické ...)

Okrem vylepšení zasklievacích systémov sa zavádzajú nové materiály a konštrukčné prvky aj pre systémy konštrukcií rámov.

1.4 VÁKUOVÉ IZOLAČNÉ ZASLENIE

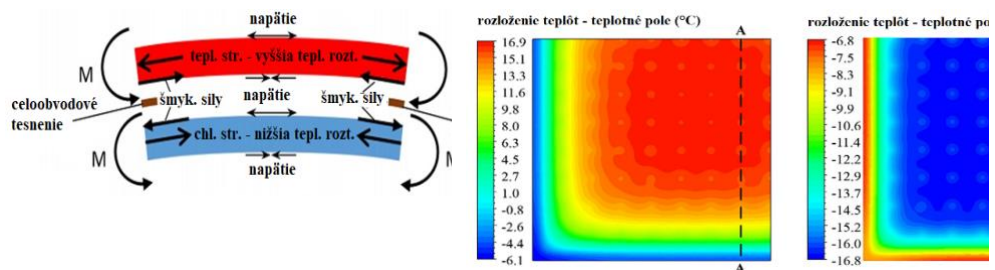
Vákuové izolačné zasklenia (VIZ) sú charakteristickým príkladom riešenia izolačného zasklenia, kedy je prioritou dosiahnutie minimálnych tepelných strát. Bežný typ VIZ by sa dal zjednodušene prirovnať svojou konštrukciou ku štandardnému izolačnému dvojsklu, avšak významným rozdielom je šírka dutiny medzi sklenenými tabuľami, ktorá dosahuje u VIZ približne 0,2 mm a výplň v tomto prípade tvorí vákuum. Pre dosiahnutie vákuového stavu je potrebné zabezpečiť, aby bol tlak v dutine menej ako 0,1 Pa. Pre porovnanie, atmosférický tlak dosahuje hodnotu približne 101 kPa. Aby sa zabránilo deformácii sklenených tabúľ vplyvom rozdielného tlaku a nespojili sa, je nevyhnutné, aby boli oddelené medzi sebou sériou miniatúrnych dištančných prvkov v podobe valcov, ktoré sú rozmiestnené v pravidelnej mriežke v odstupoch obvykle po 20 až 35 mm. Najčastejšie sú vyhotovené z nerezovej ocele alebo na báze silikátov s priemerom 0,25-0,5mm a výškou 0,1 - 0,2 mm.

Existujú tri základné druhy prenosu tepla, a to vedením (kondukciou), prúdením (konvekciou) a sálaním (radiáciou). Vytvorením vákuu medzi sklenenými tabuľami sa minimalizuje prenos tepelného toku vedením a prúdením, pretože vo vákuu nie sú častice, ktoré by umožnili prenos a nízkoemisívna vrstva minimalizuje prenos tepla sálaním. Jednou z rozhodujúcich výhod štandardného typu VIZ je hrúbka zasklenia, ktorá sa pohybuje okolo 6 mm, zatiaľ čo dvojité zasklenie dosahuje hrúbku od približne 20 do 28 mm a trojité zasklenie približne od 28 do 44 mm. Kľúčovým faktorom u VIZ je hodnota súčiniteľu prechodu tepla zasklením U_g . Na teoretickej úrovni môže VIZ dosiahnuť hodnotu U_g len asi 0,2 W/m²K, avšak kvôli technickým nedostatkom a limitom nebola táto hodnota doteraz dosiahnutá. Výrobky VIZ sú v súčasnosti komerčne dostupné napríklad pod názvom Spacia, obr. 2.5.



Obr. 2.5 Schéma a popis VIZ, vľavo, schéma rozloženia dištančných valcov, v strede, (Ghosh, Norton et al., 2017) a VIZ Spacia, vpravo.

Rovnako ako majú VIZ benefity, tak majú aj svoje nedostatky. V tomto prípade sú jednou z hlavných nedostatkov nehomogenita teplotného poľa kvôli obvodovému tesneniu a dištančným prvkom a práve obvod zasklenia je najrizikovejším miestnom, pretože pre udržanie vákuu v dutine je a nevyhnutné jej dokonale utesnenie. V praxi sa u VIZ vyskytujú komplikácie a poruchy, ktoré vyplývajú z rôznej teplotnej rozťažnosti a z toho ku nežiaducim mechanickým silám, ktoré vyvolávajú pnutie po obvode z pôsobenia rozdielnej teploty v interiéri a exteriéri.



Obrázok 2.6: Schéma pôsobenia vnútorných síl od rozdielnych teplôt., naľavo, (Paschke, 2019) a rozloženie teplotného poľa z teplej a chladnej strany, napravo (Katsura, Memon et al., 2020)

Tieto sily vytvárajú mikrotrhliny po obvode, ktoré postupne spôsobia stratu vákuu, a tým sa zdegradujú tepelno-izolačné vlastnosti vákuového zasklenia. Jedným z riešení je pridanie ďalšej tabule skla uprostred, ktorá vytvorí ďalšiu medzivrstvu, ktorá zníži teplotné rozdiely na povrchoch tabúľ, čím sa zredukuje aj napätie aj šmykové sily po obvode zasklenia (Memon, Farukh et al., 2018). V súčasnosti sa intenzívne vyvíjajú rôzne hybridy trojitého VIZ s nízkoenergetickými povlakmi, ktoré sú kombinované s rôznymi aktívnymi dynamickými zaskleniami, fotovoltaickými prvkami a aerogélom. Tieto hybridy sú však stále vo fáze prototypov, a preto nie sú komerčne dostupné.

1.5 PASÍVNE DYNAMICKÉ ZASKLENIA

Pasívne dynamické okná predstavujú skupinu inteligentných zasklení so schopnosťou meniť svoje vlastnosti bez zásahu užívateľa. Najčastejšie sa jedná o regulovanie celkovej priepustnosti energie slnečného žiarenia alebo priepustnosť svetla pre celoročný komfort užívateľov, ako výsledok autonómnej reakcie na vonkajšie podnety bez potreby zapojenia elektrického prúdu. Takýmito vonkajšími podnetmi sú svetlo, resp. osvetlenie (fotochromatické zasklenie) alebo teplo zo slnečného žiarenia (termochromické alebo termotropné zasklenie, prípadne zasklenie, v ktorom je zabudovaný materiál s fázovou zmenou). Akékoľvek dynamické zasklenie predstavuje zásadný pokrok v porovnaní so zasklením s protisľnečnou ochranou so statickými vlastnosťami, ako je napríklad izolačné trojsklo s nízkoemisívnou vrstvou. Hlavnou výhodou pasívnych dynamických vlastností, v porovnaní s aktívnym dynamickým zasklením, je ich nezávislosť od elektrického prúdu, čo zároveň uľahčuje inštaláciu pasívnych systémov a šetrí energie. Táto výhoda je zároveň aj nevýhodou kvôli strate možnosti ich ovládania na základe individuálnych požiadaviek používateľa, čo v prípade neskúseného používateľa alebo poruchy regulačných prvkov zasklení môže byť vo výsledku brané aj ako benefit.

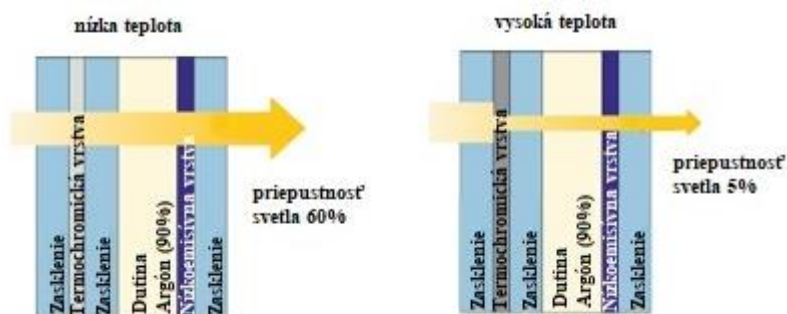
1.5.1 Fotochromatické zasklenie

Fotochromatické zasklenie (FCZ) predstavuje druh pasívneho dynamického zasklenia, ktorý sa po vystavení pôsobenia nadmerného osvetlenia, nezávisle od človeka, prispôsobuje stmavnutím a poskytuje tak ochranu proti nadmernému oslneniu a prehriatiu interiéru a znižuje tak energetické nároky na chladenie. Túto schopnosť zasklenia umožňuje špeciálna vrstva vyrobená z organických alebo anorganických zlúčenín a funguje ako „optický detektor“. Túto vrstvu môže tvoriť napríklad halogenid kovu (chlorid strieborný AgCl), ktorý reaguje na ultrafialové svetlo a absorbuje slnečné žiarenie. Keď je FCZ vystavené priamemu slnečnému žiareniu, rozdiel v spektrálnej absorpcii medzi energetickými vrstvami skla a ďalšími aktívnymi vrstvami vedie k vytvoreniu vratného procesu intenzívneho tmavnutia. Režim tmavnutia s finálnou úrovňou priepustnosti svetla až na úrovni približne 25 % trvá niekoľko minút a približne dvojnásobný čas trvá, kým sa vráti do číreho stavu zasklenia, kedy je priepustnosť svetla na úrovni približne 70 %. V tomto „tmavom“ režime sa zasklenie správa viac ako absorpčné zasklenie, než ako reflexné zasklenie, a teda absorbuje teplo. Nedostatkom tohto typu zasklenia je, že v prípade častých zmien intenzity svetla alebo vysokého slnečného žiarenia môže vzniknúť vyššie riziko prasknutia zasklenia vyvolaného z prehriatia skla, (Casini, 2014). Aby bolo takýto typ zasklenia vhodný pre široké uplatnenie v architektúre, je potrebné vytvoriť opatrenie, ktoré dovoľí zvýšiť cyklickosť tmavého a číreho režimu a zabráni nežiadúcim reakciám z nadmerného prehriatia zasklenia. Z dôvodu vysokých nákladov, technologických komplikácií a chýbajúcej kontroly užívateľom sa fotochromatické zasklenie v súčasnosti využíva skôr v automobilovom priemysle. Naďalej však pokračuje výskum zameraný na hľadanie nákladovo efektívneho riešenia a existujú štúdie zaoberajúce sa kombináciou fotochromatického a elektrochromického zasklenia. Aj keď nie je zatiaľ

komerčne dostupné fotochromatické zasklenie, súčasný trh ponúka samolepiace fotochromatické fólie obmedzenou životnosťou, ktoré je možné aplikovať na existujúce okná.

1.5.2 Termochromické/termotropické zasklenie

Termochromické zasklenie (TCZ) je najjednoduchší a zároveň preferovaný typ pasívneho dynamického systému zasklenia. Technológia TCZ umožňuje regulovať svetelnú priepustnosť a celkovú priepustnosť slnečného žiarenia zasklením z číreho do stmavnutého stavu bez elektrického podnetu, teda autonómne bez zásahu užívateľa. Princíp TCZ spočíva v podobe nanesej tenkej termochromickej vrstvy, ktorú tvorí napríklad oxid vanadičitý (VO_2) na sklenenú tabuľu alebo je možné VO_2 aplikovať na polyvinylbutylovú (PVB) fóliu, v rámci izolačného dvojskla, resp. trojskla, ako je vidieť na obrázku 2.7. Ako narastá teplota, termochromická vrstva sa postupne zafarbuje-stmavuje a svetelná priepustnosť sa pohybuje v rozmedzí hodnôt od 60 %, v čírom stave, do asi 5 % pri plnej aktivácii TCZ. TCZ vtedy absorbuje nadmerné slnečné žiarenie a tónovaný stav tak umožňuje znížiť riziko z prehriatia a oslnenia interiéru, čím zredukuje potrebu energie na chladenie, obrázok 4 (Aguilar-Santana, Jarimi et al., 2019).



Obr. 2.7 Termochromické zasklenie – schéma, princíp funkcie pri nízkej vonkajšej teplote, vľavo a vysokej teplote, pravo (Casini, 2014)



Obr. 2.8 Pohľad na presklenú fasádu z FCZ počas fáz dňa, ("Web page: <https://www.commercialwindows.org/thermochromic.php> [online 29.08.2020],")

1.5.3 Zasklenie obsahujúce materiál s fázovou zmenou

Materiály s fázovou zmenou (PCM) predstavujú skupinu materiálov so zaujímavou vlastnosťou, a to absorbovanie určitého množstva tepelnej energie bez ďalšieho zvýšenia svojej teploty. Keď PCM vykazuje nárast teploty, pri určitej teplote sa PCM materiál prestane zahrievať a začne meniť svoje skupenstvo z pevného na kvapalné, pričom ďalej absorbuje tepelnú energiu. Neskôr, keď zdroj tepla prestane produkovať teplo, kvapalné skupenstvo PCM sa začne postupne meniť späť na tuhé skupenstvo a materiál vyžaruje tzv. zvyškové - latentné teplo, obrázok 2.9. PCM majú zloženia anorganického aj organického pôvodu a rôzne teploty tavenia a majú preto veľmi široké možnosti svojho uplatnenia, ale v tomto prípade sa rieši iba jeho využitie pri dynamickom zasklení. Nedá sa povedať, že ide o ekvivalentný typ pasívnych dynamických zasklení, ako sú fotochromatické a termochromické zasklenia, lebo pri tuhom skupenstve nie je zaistená transparentnosť, čo je základným predpokladom využitia pre okná, ale napriek tomu má aj v tomto prípade potenciál najmä v horúcom podnebí, kedy je možné využiť PCM v okennom zasklení, resp. pri celopresklenej fasáde, ako dodatočný prvok, na zníženie spotreby energie budovy z chladenia. V prípade fasády sa však PCM častejšie využíva ako doplnok tieniaceho zariadenia a najmä v kombinácii s fotovoltaickými prvkami, (Vigna, Bianco et al., 2018).



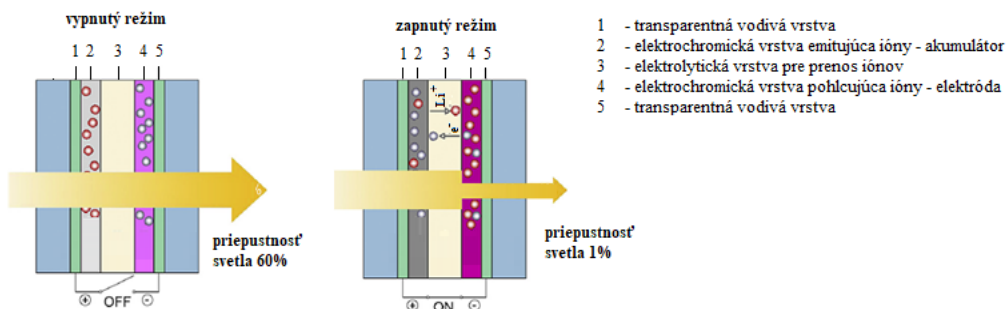
Obr. 2.9 Pohľad na PCM umiestnenom v zasklení v tuhom skupenstve, naľavo a v kvapalnom skupenstve po dosiahnutí hraničného bodu topenia PCM, (Goia, 2012)

1.6 AKTÍVNE DYNAMICKÉ ZASKLENIA

Aktívne dynamické zasklenia predstavujú skupinu inteligentných zasklení „SMART“ s inovatívnymi systémami zasklenia, ktoré zabezpečujú nanočastice. Už podľa názvu „aktívne“ je zrejmé, že sa jedná o zasklenia, ktoré sú schopné meniť svoje spektrálne vlastnosti a užívatelia majú možnosť ovládať a regulovať tieto zmeny elektrickým prúdom, na rozdiel od pasívnych systémov. V prípade zasklení sú najdôležitejšími parametrami celková priepustnosť energie slnečného žiarenia, svetelná priepustnosť a ochrana proti oslneniu. Existuje niekoľko typov aktívnych systémov, ktoré využívajú rôzne technológie. Najčastejšie používanými druhmi aktívneho dynamického zasklenia sú: Elektrochromické zasklenie, plynochromatické zasklenie, zasklenie s rozptýlenými nanočasticami, zasklenie s tekutými kryštálmi rozptýlenými v polyméri, zasklenia využívajúce mechanochromické materiály.

1.6.1 Elektrochromické zasklenie

Elektrochromické zasklenie (ECZ) predstavuje najpoužívanejší typ aktívneho dynamického zasklenia. ECZ je charakterizované prítomnosťou špeciálnej vrstvy chromogénneho materiálu, ktorá môže na základe jednosmerného elektrického prúdu meniť postupne farbu zasklenia do tmavomodrého odtieňa. Tým sa reguluje svetelná priepustnosť a celková priepustnosť energie slnečného žiarenia a zníži sa v lete riziko z prehrievania a náklady na chladenie. Zároveň sa zlepši kvalita vnútorného prostredia pre užívateľov. Funkcie ECZ zaisťuje súbor piatich špeciálnych vrstiev medzi tabuľami zasklenia, v poradí, ako je vidieť na obrázku 2.10.



Obr. 2.10 Elektrochromické zasklenie – funkčná schéma a poradie vrstiev vo vypnutom a zapnutom režime, Casini (2018)

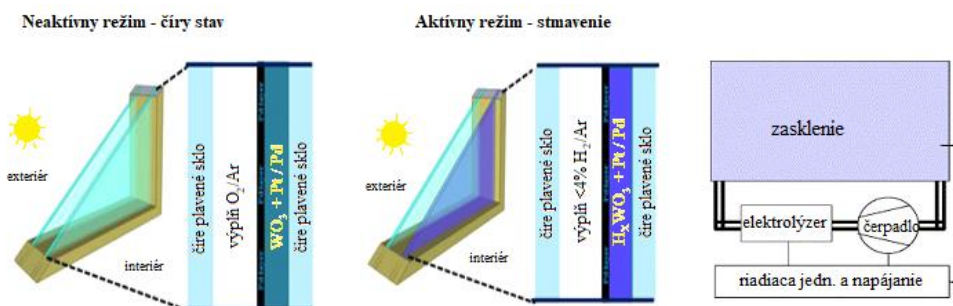
Elektrochromická vrstva - elektróda je zvyčajne na báze oxidu WO_3 , ktorý po pripojení napätia spôsobuje modrý odtieň (Baetens, Jelle et al., 2010). ECZ zvyčajne poskytuje od číreho (vypnutý režim) do tmavého (zapnutý režim) štyri prechodné stavy tmavnutia, obrázok 2.11. Čas medzi zmenami stavu závisí od rozmerov okna, ale v prípade okna s rozmermi 1,2 m x 0,8 m to trvá asi 12 minút. Dlhší čas medzi zmenami stmavovania je možné brať skôr ako výhodu, pretože pre ľudí je takéto prispôsobenie sa zmenám svetelných podmienok prirodzenejšie.



Obr. 2.11 Elektrochromické zasklenie – postupné štádiá stmavovania od číreho po úplne stmavený stav, (Konis & Selkowitz, 2017)

1.6.2 Gasochromické (plynochromické) zasklenie

Gasochromické zasklenie (GCZ) predstavuje po ECZ druhé najpoužívanejšie riešenie pre aktívne dynamické zasklenie. Na prvý pohľad je tento typ v mnohých ohľadoch porovnateľný s ECZ. Najvýznamnejším rozdielom GCZ oproti ECZ sú nižšie obstarávacie náklady. Elektrický prúd, ktorý je neodmysliteľnou súčasťou ECZ je tu nahradený chemickou reakciou medzi plynochromickou vrstvou, ktorú zvyčajne tvorí vrstva oxidu volfrámu (WO_3), ktorá je navyše prekrytá vrstvou paládia (Pd) alebo platiny (Pt), aby sa zlepšila účinnosť štiepenia vodíka H_2 ako druhej zložky. Keďže vodík je vo vzduchu vysoko výbušný, vodík použitý v dutine sa riedi v koncentrácii menej ako 4 % s argónom, ktorý slúži ako nosič. Zabráni sa tak riziku výbuchu pri poškodení skla a zároveň sa tým zlepšia tepelno-izolačné vlastnosti GCZ. Proces stmavovania prebieha tak, že H_2 reaguje s povrchom WO_3 a výsledná reakcia spôsobí, že predtým číry povrch s WO_3 sa zmení na wolfrámový bronz H_xWO_3 , ktorý je tmavomodrý a vzniká vedľajší produkt – voda H_2O . Vyššia koncentrácia H_2 vedie k tmavšiemu stavu. Na rozdiel od jednotky ECZ, zmeny v úrovni priehľadnosti u GCZ prebiehajú rýchlejšie a rýchlosť nezávisí od veľkosti zasklenia. Taktiež u GCZ je možné aplikovať vrstvu WO_3 na ľubovoľný transparentný povrch, ktorý nemusí byť elektricky vodivý, ako je to v prípade ECZ. Z hľadiska množstva potrebných špeciálnych aktívnych vrstiev, je GCZ oproti ECZ jednoduchšie, pretože namiesto piatich vrstiev u ECZ je u GCZ v dutine naplnenej argónom so zriedeným H_2 iba vrstva WO_3 pokrytá vrstvou Pt alebo Pd, ako je vidieť na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Gasochromické zasklenie – neaktívny a aktívny režim, schéma riadenia obehu pre zachovanie funkcie (Feng, Zou et al., 2016)

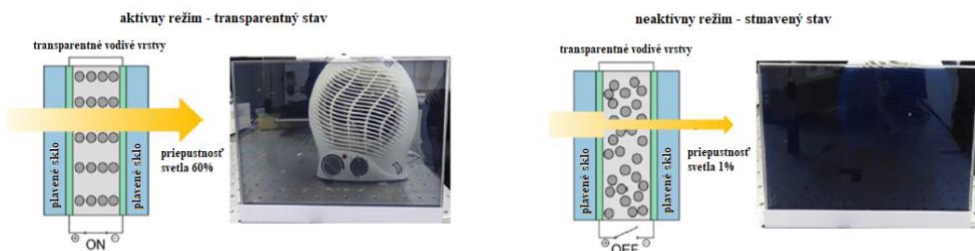
Gasochromické zasklenie je doporučené pre trojsklá, pretože je potrebná dodatočná dutina, nakoľko chemické reakcie, ktoré zaisťujú stmavenie zasklenia by nežiaduco reagovali s nízkoemisívnou vrstvou. Pri neaktívnom režime, kedy je požadované číre zasklenie, je do dutiny s argónom (Ar) načerpaný kyslík (O_2), ktorý zachováva číry stav. Pri aktívnom režime, po prebehnutí vyššie opísanej chemickej reakcií, je stav sfarbenia v dutine stabilný a nie je potrebné dodávanie ďalšieho plynu a postačuje iba prerušenie čerpania. Stmavený režim pretrváva, až do doby, kedy bude do dutiny načerpaný kyslík.

Experiment s GCZ na testovacej fasáde na Fraunhofer ISE vo Freiburgu ukazuje, že kyslík a vodík, ktoré sú potrebné na plynochromickú reakciu, je možné vyrábať s malým elektrolyzérrom a proces funguje vďaka čerpadlu v hermeticky uzavretom obehu, bez potreby

ďalšieho pridávania zložiek, (Wittwer, Datz et al., 2004). Voda, ktorá vznikne v dôsledku reakcie počas bieliacej fázy sa znova použije na ďalší proces elektrolyzy. Elektrolyzátor pracuje so silne hygroskopickou kvapalinou, ktorá vysušuje vyrobené plyny a zabraňuje ich kondenzácii v dutine okna aj keď sú vonkajšie teploty extrémne nízke (Casini, 2018), (Zakirullin, 2020).

1.6.3 Zasklenie s rozptýlenými nanočasticami

Zasklenie s rozptýlenými nanočasticami (ZRN) je tiež elektroaktívne, ale na rozdiel od ECZ pracuje ZRN pri striedavom napätí. Princíp ZRN spočíva v náhodne rozptýlených a orientovaných dipolárnych tyčinkovitých časticiach s vysokou optickou anizotropiou, ktoré sú rozložené v organickej tekutine. Tekutina je umiestnená medzi dve transparentné vodivé vrstvy, ktoré sú nanosené na vnútorné strany sklenenej tabule v dutine. Keď je striedavé napätie vypnuté, častice sú náhodne orientované a sklo sa stane nepriehľadným až nepriesvitným. Keď sa napájanie so striedavým prúdom zapne, častice sa behom krátkej chvíle všetky orientujú po dĺžke a umožnia svetlu prenikať cez zasklenie. Tento priehľadný stav sa udrží pokiaľ je zapnuté striedavé napätie. V tmavom režime ZRN blokuje až 99% viditeľného svetla, ako je vidieť na obrázku 2.13.



Obr. 2.13 ZRN – funkčné schémy v aktívnom režime, po zapojení striedavého napätia a v neaktívnom režime, (Casini, 2014); doplnené o ilustráciu pre transparentný stav a stmavený stav, (Ghosh, Norton et al., 2015)

Na rozdiel od ECZ, ZRN vyžaduje nepretržité napájanie striedavým prúdom na udržanie si transparentného režimu, čo je ďalší rozdiel a značná nevýhoda oproti predošlým typom. Úroveň priehľadnosti ZRN závisí od hrúbky vrstvy s tekutinou s rozptýlenými časticami a ich hustotou. Čas potrebný na prepnutie medzi transparentným a stmaveným stavom je niekoľko sekúnd (Casini, 2014). Samotná zasklievacia jednotka ZRN má veľmi vysokú hodnotu súčiniteľa prechodu tepla zasklením U_g , asi $5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ a $2,98 \text{ W/m}^2\text{K}$ pri dvojskle. V súčasnosti prebiehajú výskumy, ktoré testujú ZRN kombinované s vákuovým zasklením. Podľa (Ghosh, Norton et al., 2016) sa priemerná hodnota U_g , pre kombináciu ZRN s vákuovým zasklením, pohybuje od $1,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ do $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. S úsporou energie v horúcom období sú to sľubné výsledky, ale nateraz je zasklenie ZRN považované za jeden z najdrahších typov aktívnych dynamických zasklení.

1.6.4 Zasklenie s tekutými kryštálmi rozptýlenými v polyméri

Zasklenie s tekutými kryštálmi rozptýlenými v polyméri (TKRP) predstavujú druh elektroaktívneho dynamického zasklenia, ktorý je založený na podobnom princípe ako predošlý typ ZRN. Oba systémy využívajú náhodne rozptýlené aktívne dipólové nanočastice, ktoré reagujú na striedavý prúd.

TKRP riadi priepustnosť svetla zasklenia z nepriehľadného stavu do priehľadného stavu po zapojení striedavého prúdu prakticky okamžite bez ohľadu na veľkosť okna.

V odpojenom (neaktívnom) stave bez prúdu sú častice náhodne rozložené a naklonené a je zablokovaných takmer 99 % kolmo dopadajúceho svetla, aby bolo zaistené súkromie. Po zapojení striedavého prúdu (aktívny stav) sa dipólové častice natočia kolmo na povrch zasklenia v pozdĺžnom smere do mriežky a prepustia tak svetlo a zaistia priehľadný stav s priepustnosťou svetla približne do 80 %. Produkty TKRP sa zvyčajne používajú v priestoroch, kde sú požiadavky na súkromie, ako sú zasadacie miestnosti, oblasti intenzívnej starostlivosti, kúpeľne a sprchové dvere alebo zasklené steny, ktoré sa dočasne používajú ako premietacie plátno. Schéma funkcií je znázornená na obrázku 2.14. Výrobky TKRP sú vyrábané v dvoch základných formách, a to ako laminované prepínateľné sklo TKRP alebo vo forme samolepiacej prepínateľnej fólie, ktorá sa dá dodatočne umiestniť na ľubovoľnú transparentnú plochu.

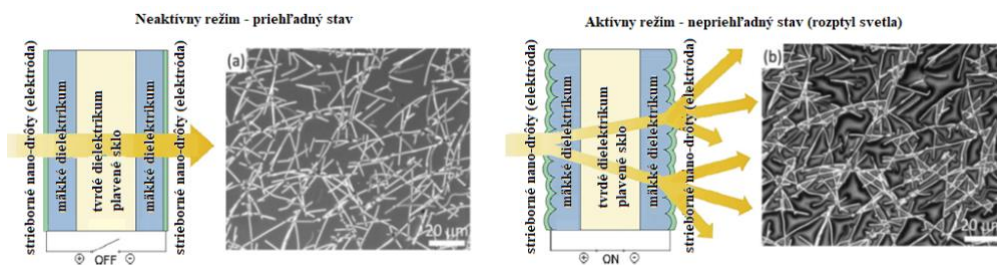


Obr. 2.14 TKRP znázornenie funkčnej schémy pre oba režimy – aktívny a neaktívny, doplnené o pohľad na vzorku zasklenia (Hemaida, Ghosh et al., 2020)

1.6.5 Zasklenia využívajúce mechanochromické materiály

Tento typ dynamických aktívnych zasklení (MCM) je založený na mechanochromických alebo piezochromických materiáloch, ktoré predstavujú skupinu materiálov, ktoré menia farbu alebo priehľadnosť pri vystavení mechanickému namáhaniu, (Ferrara & Bengisu, 2014). Tieto materiály majú perspektívu aj v budúcom vývoji inteligentných okien (Ke, Chen et al., 2019). Princíp fungovania mechanochromického zasklenia je znázornený na obrázku 2.15. Povrch sklenenej tabule – (tuhé dielektrikum) je z oboch strán pokrytý priehľadnou vrstvou elastoméneho polyméru – (mäkké dielektrikum), v ktorom sú rozptýlené vysoko vodivé strieborné nanočastice - nanodrôty vo forme mriežky. Tieto nano - drôty sú také malé, že sú pre oči neviditeľné a neznižujú vizuálny komfort. Po zapojení striedavého prúdu sa začne

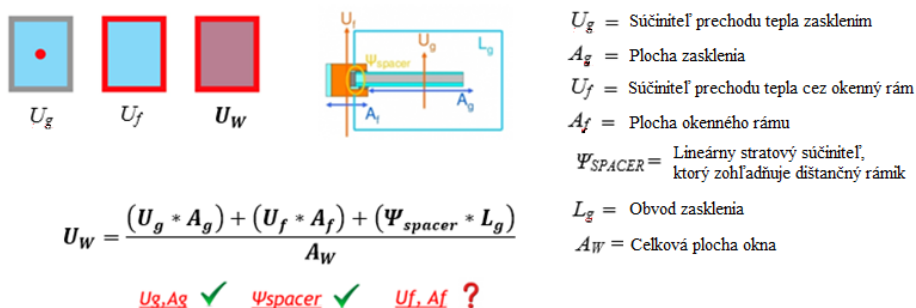
generovať silné elektromagnetické pole, ktoré spôsobí, že sa z nano - drôtov stanú elektródy a začnú sa ku sebe priťahovať Coulombovými silami, čím spôsobia okamžitú kontrolovanú deformáciu mäkkého elastoméru vo forme mikrovrások na povrchu, čo mení úroveň priehľadnosti (Chen, Busfield et al., 2020). Tento stav je možné využívať v priestoroch, kde je požadované súkromie alebo vo vozidlách na parkoviskách počas horúcich dní, aby sa zabránilo ich prehrievaniu. Výskum mechanochromického zasklenia pokračuje v jeho potenciálnom použití v inteligentných oknách, pretože procesy spojené s deformáciou elastoméru si vyžadujú ďalší priestor v zaskleniach, čo je komplikované. Nateraz je tento efekt možné efektívne využiť pri navrhovaní dynamických tieniacich zariadení, ktoré môžu byť zároveň transparentné v dobe, kedy je to žiadúce (Kim, Ge et al., 2018).



Obr. 2.15 Mechanochromické zasklenie – schéma pre neaktívny a aktívny stav (Casini, 2014) doplnené o zodpovedajúcu ukážku rozloženia nano-drôtov v mäkkom dielektriku pri oboch režimoch, (Shian & Clarke, 2016)

1.7 INNOVATÍVNE RIEŠENIA PRE OKENNÉ RÁMY

Ako bolo opísané v predchádzajúcich kapitolách, zasklenie prešlo a naďalej prechádza veľmi intenzívnym vývojom v súlade s požiadavkami nZEB, ktoré vyplývajú z úsilia o záchranu prírodného prostredia a zdrojov pre ďalšie generácie. Rovnako ako zasklenie, tak aj rámy je potrebné optimalizovať, aby zodpovedali vlastnostiam vysokoúčinných zasklení. Okenný rám, v porovnaní s energeticky veľmi efektívnym zasklením, predstavuje naďalej, z hľadiska tepelno-izolačných vlastností okennej konštrukcie, tepelný most. Jednou z možností je snaha o minimalizovanie plochy rámu, ako je znázornené na obrázku 2.16.



Obr. 2.16 Princíp zníženia hodnoty U_w prostredníctvom zmenšenia prierezovej plochy okenného rámu

Okrem tepelnej izolácie a tesnosti sú ďalšími hlavnými požiadavkami na okenné rámy trvanlivosť, stabilita a statika. Veľkosť rámu vyplýva aj od vlastností materiálu, z ktorého je rám vyrobený. Nemá zmysel pokúšať sa zmenšovať veľkosť plastového alebo dreveného rámu, pretože veľkosti týchto konvenčných materiálov sú nevyhnutné, nakoľko rozmery okien a počet tabúl majú narastajúci trend. Pokiaľ chceme zmenšiť prierezovú plochu okenného rámu, je nutné využiť na zhotovenie iný materiál, ktorý má lepšie mechanické vlastnosti a zároveň poskytne veľmi dobré tepelno-izolačné vlastnosti. Takýmto materiálom sú napríklad sklenené vlákna, ktoré je možné upraviť do podoby rámových okenných profilov. Takto upravený sklolaminát má viaceré výhody oproti konvenčným materiálom pre výrobu okenných rámov (Appelfeld, Hansen et al., 2010). Sklolaminát je materiál, ktorý má vysokú rozmerovú stálosť a jeho tepelná rozťažnosť je porovnateľná so sklom, na rozdiel napríklad od plastu, u ktorého je tepelná rozťažnosť niekoľkonásobne vyššia ako u skla, čo spôsobuje nežiadúce deformácie a netesnosti u plastových okien, obrázok 2.17. Sklolaminát je veľmi tuhý, UV stabilný a nereaktívny materiál s veľmi vysokou životnosťou a odolnosťou, čo znamená, že sa rámy nebudú deformovať, praskať, korodovať a poskytnú dlhú životnosť pri nezmenených vlastnostiach.

Materiál	Modul pružn. (GPa)	Pevn. v ťahu (MPa)	Súč. tep. vodivosti (W/m.K)	Súč. tepl. rozťažnosti (10^{-6} /m.K)	Hustota (kg/m^3)
Mäkké drevo	7	14	0.13	4.5	500
Hliník	72	300	160	23	2800
Oceľ	210	360	50	12	7800
PVC	3	-	0.17	61	1390
Sklolaminát	23	240	0.32	9	450
Sklo	70	30-90	237	8-9	2700

Obr. 2.17. Porovnanie mechanických vlastností vybraných materiálov pre okenné rámy a sklolaminátu, (Appelfeld et al., 2010)

Tieto mechanické a tepelno-technické vlastnosti v kombinácii s energetickou účinnosťou, trvanlivosťou bez nutnej dodatočnej údržby a ekologickou výrobou z recyklovania robia zo sklolaminátu sľubný materiál, ktorý je vhodným prostriedkom pre optimalizovanie okenného rámu a tým aj celkového súčiniteľa prechodu tepla okna U_w . Príklad komerčne dostupného riešenia okna s izolačným trojsklom s ultratenkým okenným rámom zo sklolaminátového profilu doplnenom o drevený profil je na obrázku 2.18.



Obr. 2.18 Príklad použitia ultratenkého sklolaminátového okenného rámu pre izolačné trojskló ("Web page: <http://www.ecliptica.dk/komposit> [online: 13. 8. 2018],")

- Aguilar-Santana, J. L., Jarimi, H., Velasco-Carrasco, M., & Riffat, S. (2019). Review on window-glazing technologies and future prospects. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(1), 112-120. doi: 10.1093/ijlct/ctz032
- Appelfeld, D., Hansen, C. S., & Svendsen, S. (2010). Development of a slim window frame made of glass fibre reinforced polyester. *Energy and Buildings*, 42(10), 1918-1925. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.028>
- Casini, M. (2014). *Smart windows for energy efficiency of buildings*. Paper presented at the Proceedings of Second International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering–ACSEE.
- Casini, M. (2018). Active dynamic windows for buildings: A review. *Renewable Energy*, 119, 923-934. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>
- Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., et al. (2016). Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 316-323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.029>
- Ferrara, M., & Bengisu, M. (2014). Materials that Change Color *Materials that Change Color: Smart Materials, Intelligent Design* (pp. 9-60). Cham: Springer International Publishing.
- Ghosh, A., Norton, B., & Duffy, A. (2015). Measured overall heat transfer coefficient of a suspended particle device switchable glazing. *Applied Energy*, 159, 362-369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.019>
- Ghosh, A., Norton, B., & Duffy, A. (2016). Measured thermal performance of a combined suspended particle switchable device evacuated glazing. *Applied Energy*, 169, 469-480. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.031>
- Ghosh, A., Norton, B., & Duffy, A. (2017). Effect of sky clearness index on transmission of evacuated (vacuum) glazing. *Renewable Energy*, 105, 160-166. doi: 10.1016/j.renene.2016.12.056
- Goia, F. (2012). Thermo-physical behaviour and energy performance assessment of PCM glazing system configurations: A numerical analysis. *Frontiers of Architectural Research*, 1(4), 341-347. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.10.002>
- Hemaida, A., Ghosh, A., Sundaram, S., & Mallick, T. K. (2020). Evaluation of thermal performance for a smart switchable adaptive polymer dispersed liquid crystal (PDLC) glazing. *Solar Energy*, 195, 185-193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.024>
- Chen, L., Busfield, J. J., & Carpi, F. (2020). Electrically tunable directional light scattering from soft thin membranes. *Opt Express*, 28(14), 20669-20685.
- Katsura, T., Memon, S., Radwan, A., Nakamura, M., et al. (2020). Thermal performance analysis of a new structured-core translucent vacuum insulation panel in comparison to vacuum glazing: Experimental and theoretically validated analyses. *Solar Energy*, 199, 326-346. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.030>
- Ke, Y., Chen, J., Lin, G., Wang, S., et al. (2019). Smart Windows: Electro-, Thermo-, Mechano-, Photochromics, and Beyond. *Advanced Energy Materials*, 9(39), 1902066. doi: 10.1002/aenm.201902066

- Kim, H.-N., Ge, D., Lee, E., & Yang, S. (2018). Multistate and On-Demand Smart Windows. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 30(43), e1803847. doi: 10.1002/adma.201803847
- Konis, K., & Selkowitz, S. (2017). Effective Daylighting with High-Performance Facades. *Emerging Design Practices*, 269.
- Memon, S., Farukh, F., & Kandan, K. (2018). Effect of Cavity Vacuum Pressure Diminution on Thermal Performance of Triple Vacuum Glazing. *Applied Sciences*, 8(9), 1705.
- Paschke, F. (2019). *The Thermo-Mechanical Performance of a Vacuum Insulated Glazing Window*. Paper presented at the GPD Finland 2019.
- Shian, S., & Clarke, D. (2016). Electrically tunable window device. *Optics letters*, 41 6, 1289-1292.
- Vigna, I., Bianco, L., Goia, F., & Serra, V. (2018). Phase change materials in transparent building envelopes: A Strengths, Weakness, Opportunities and Threats (SWOT) analysis. *Energies*, 11(1), 111.
- Web page: <http://www.ecliptica.dk/komposit> [online: 13. 8. 2018].
- Web page: <https://www.commercialwindows.org/thermochromic.php> [online 29.08.2020].
- Wittwer, V., Datz, M., Ell, J., Georg, A., et al. (2004). Gasochromic windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84(1), 305-314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.040>
- Zakirullin, R. (2020). Grating optical filters for smart windows: Materials, calculations and prospects. *AIMS Materials Science*, 7(6), 720-771. doi: 10.3934/mat.2020.6.720

Financované Európskou úniou. Vyjadrené názory a postoje sú názormi a vyhláseniami autora(-ov) a nemusia nevyhnutne odrážať názory a stanoviská Európskej únie alebo Európskej výkonnej agentúry pre vzdelávanie a kultúru (EACEA). Európska únia ani EACEA za ne nepreberajú žiadnu zodpovednosť.

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



STU

SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN



ENERGIACLUB
CLIMATE POLICY INSTITUTE
APPLIED COMMUNICATIONS