

Disertační práce

**Vliv technologie výroby materiálů na jejich světelně
technické vlastnosti**

**The influence of material production technology on their light-
technical properties**

Autor: Ing. Pavel Hrbáček
Studijní program: P0788D270012 / Nástroje a procesy
Školitel: doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.

© Pavel Hrbáček

Klíčová slova: *Lehký aktivní skleněný materiál, ovčí vlna, prostup světla, pohlcení světla, software Wdls 5.0, 3D tisk.*

Key words: *Light active glass material, sheep wool, light transmission, light absorption, Wdls 5.0 software, 3D print.*

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Martinovi Vašinovi, Ph.D. za velkou ochotu, vstřícnost, pozitivní přístup, cenné praktické rady a odborné vedení.

ABSTRAKT

V rámci studia vlivu technologie výroby materiálů na jejich světelně technické vlastnosti byla zkoumána propustnost světla u světla aktivních skleněných materiálů, které se běžně uplatňují jako okenní a dveřní výplně v obytných budovách. Byly vyhodnoceny různé faktory, které mají vliv na šíření světla zkoumanými skleněnými materiály.

Absorpce světla byla zkoumána u 3D tištěných materiálů z polyethylentereftalátglykolu (PETG), vyrobených se dvěma typy otvorů, a to s otvory kruhového a čtvercového tvaru. Kromě toho byly otvory vytištěny s různými rozměry, hloubkami, tvary a rozestupy otvorů. V této studii byly hodnoceny různé faktory ovlivňující schopnost materiálu pohlcovat světlo.

V rámci využití vláken ovčí vlny v polymerních kompozitech bylo realizováno studium vlastností prostupu světla epoxidových (EP) a polyesterových (PES) pryskyřic, z nichž každá byla naplněna různými koncentracemi ovčí vlny. Studie ukázala, že obsah ovčí vlny v polymerních kompozitech významně ovlivnil jejich světelné vlastnosti.

U některých testovaných skleněných materiálů a také u některých polymerních kompozitů plněných vlákny z ovčí vlny byl pomocí softwaru Wdls 5.0 matematicky simulován vliv prostupu světla na kvalitu denního světla v referenční místnosti.

Vliv podmínek 3D tisku na světelné vlastnosti materiálů byl zkoumán na vzorcích vyrobených z materiálů s kyselinou polymléčnou (PLA), polymethylmethakrylátem (PMMA) a polyethylentereftalátglykolem (PETG). Materiály byly vyrobeny pomocí technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Konkrétně byl u studovaných polymerních materiálů zkoumán vliv průměru trysky, výšky vrstvy a teploty tisku na propustnost světla.

ABSTRACT

As part of the study of the influence of material production technologies on their light-technical properties, the light transmission of light-active glass materials, which are used as window and door fillings in residential buildings, were investigated. Various factors influencing the propagation of light and noise through the investigation of glass materials were evaluated.

Light absorptions were investigated in 3D printed samples of polyethylene terephthalate glycol (PETG) material made with two types of holes, namely circular and square shaped holes. In addition, holes were printed with different dimensions, depths, shapes and surface spacing. Different factors influencing the material's ability to absorb light were evaluated in this study.

In the interest of the possible use of sheep wool fibers in polymer composites, the study of the light transmission properties of epoxy (EP) and polyester (PES) resins, each filled with different concentrations of sheep wool. The study showed that the content of sheep wool in polymer composites reflects their physical properties.

Using the Wdls 5.0 software, the effect of light transmission through the tested glass materials and polymer composites filled with sheep wool fibers on the quality of daylight in the reference rooms was also mathematically simulated.

The effect of 3D printing conditions on the light properties of materials was investigated on samples made of materials with polylactic acid (PLA), polymethyl methacrylate (PMMA) and polyethylene terephthalate glycol (PETG). The materials were produced using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Specifically, the effect of nozzle diameter, layer height and printing temperature on light transmission was investigated for the studied polymer materials.

OBSAH

ABSTRAKT	4
ABSTRACT	5
ÚVOD.....	8
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
1.1 Rešerše v oblastech týkajících se zvolených témat	10
1.1.1 Vliv tvaru povrchu materiálu na světelné vlastnosti.....	10
1.1.2 Technologie 3D tisku	11
1.1.3 Skleněné výplně oken a dveří	13
1.1.4 Kompozity na bázi polymer/ovčí vlna	14
2. KRITICKÉ ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU	16
3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	18
4. TEORETICKÁ ČÁST	19
4.1 Světelné vlastnosti materiálů	19
4.1.1 Světlo.....	19
4.1.2 Osvětlenost.....	19
4.1.3 Osvětlení	20
4.1.4 Světelný tok a jeho energetická bilance.....	24
4.1.5 Prostup světla	25
4.1.6 Odraz a lom světla.....	28
4.2 Materiály a technologie	33
4.2.1 Výroba a vlastnosti skla pro okenní a dveřní výplně.....	33
4.2.2 Kompozity plněné ovčí vlnou	40
4.2.3 Technologie 3D tisku	41
5. VÝROBA A PŘÍPRAVA TESTOVANÝCH VZORKŮ	44
5.1 Skleněné vzorky pro měření prostupu světla.....	44
5.2 Polymerní vzorky pro měření světelné pohltivosti.....	44
5.3 Kompozity plněné ovčí vlnou pro měření prostupu světla.....	46
5.4 Polymerní vzorky pro výzkum vlivu parametrů 3D tisku	47
6. METODY TESTOVÁNÍ A JEJICH VÝSLEDKY	51
6.1 Studie absorpce světla 3D tištěných vzorků	51
6.1.1 Přístroj pro měření absorpce světla.....	51
6.1.2 Princip měření absorpce světla	52
6.1.3 Výsledky měření absorpce světla.....	52
6.2 Studie prostupu světla skleněnými vzorky	54
6.2.1 Princip měření světelné propustnosti skla.....	54
6.2.2 Výsledky měření propustnosti světla testovaných skel	55
6.3 Studie propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou	56
6.3.1 Výsledky měření propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou.....	57
6.4 Studie vlivu parametrů 3D tisku na prostup světla.....	57
6.4.1 Mikroskopická analýza vzorků polymerů vyrobených 3D tiskem	58
6.4.2 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů	60

6.5	Matematické simulace kvality denního osvětlení.....	61
6.5.1	Princip programu Wdls 5.0.....	61
6.5.2	Simulace kvality denního osvětlení pro vzorky skla	62
6.5.3	Simulace kvality denního osvětlení pro polymerní kompozity	65
6.5.4	Simulace vlivu odraznosti ploch na denní osvětlenost	67
7.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	69
8.	ZÁVĚR.....	71
	Seznam použité literatury	74
	Seznam obrázků.....	86
	Seznam tabulek.....	88
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	89
	Publikační aktivity autora.....	90
	Odborný životopis autora	91

ÚVOD

Denní světlo je neodmyslitelnou součástí lidského života a má zásadní vliv na lidský organismus i celkovou duševní pohodu. V poslední době tráví lidé stále větší část dne v uzavřených prostorech, ať už na pracovištích, doma, či ve školních učebnách a je proto zásadní otázkou, zda je v těchto prostorech přiměřené množství denního světla. Právě množství denního osvětlení ve vnitřních prostorech je řešeno z hygienického hlediska především při výstavbě nových budov či při rekonstrukcích budov stávajících a je přirozenou snahou zajistit v místnosti dostatek světla, které je rozptýlené v atmosféře, a vytvořit tak vhodné světelné podmínky pro zrakové práce konané v interiéru. Zraková pohoda je stav splňující hygienické požadavky, které závisejí na intenzitě a kvalitě denního osvětlení. Při hodnocení příspěvku denního světla se však zohledňuje nejen dostupnost denního světla v daném místě, ale i vlastnosti prostoru jako jsou vnější překážky, činitel prostupu světla zasklením, vnitřní členění místností a činitel odrazu světla povrchů. Množství světla v místnostech, jeho složení, poměry a prostorové rozdělení mají totiž zásadní vliv na zrakovou pohodu člověka. Zdravotní, ekonomické a ekologické aspekty dávají jednoznačně přednost dennímu osvětlení před osvětlením umělým. Moderní architektura proto využívá co nejvíce osvětlení denního a zároveň klade důraz na jeho optimalizaci spolu s prevencí možného oslnění. Ve vnitřním prostoru však může být oslnění způsobeno také zdroji světla a svítidly, nebo odrazy od lesklých povrchů.

Pohlčováním nežádoucího světla s vyloučením oslnění odraženým světlem se zabývá studie vlivu geometrie a povrchového rozložení otvorů na světelné absorpční vlastnosti 3D-tištěných PETG materiálů. V této studii jsou zkoumány možnosti využití technologie 3D tisku pro výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur s ohledem na možnosti jejich využití v uzavřených místnostech jako podhledů nebo lehkých stěn či obložení.

Propustnost světla byla zkoumána nejprve u skleněných materiálů, které se používají jako okenní a dveřní výplně, a v další studii taktéž u kompozitů pryskyřice/ovčí vlna, které mohou sloužit např. jako náhražka skleněných tvárnic nebo skleněných příček. V případě ovčí vlny se navíc jedná o příspěvek k efektivnějšímu využití tohoto dosud podceňovaného a nedostatečně využívaného obnovitelného zdroje.

Díky matematickým simulacím bylo možno ilustrovat vliv propustnosti světla těchto světelně činných materiálů na kvalitu denního osvětlení v simulované obytné místnosti.

Vliv podmínek 3D tisku na fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů byl zkoumán na vzorcích vyrobených z materiálů s kyselinou polyléčnou (PLA), polymethylmethakrylátem (PMMA) a polyethylentereftalátglykolem (PETG). Materiály byly vyrobeny pomocí technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Konkrétně byl u studovaných polymerních materiálů zkoumán vliv průměru trysky, výšky vrstvy a teploty tisku na prostup světla. Studie dospěla k závěru, že podmínky 3D tisku významně ovlivňují strukturu a povrch 3D tištěných vzorků polymerů spolu s propustností světla.

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Světelné vlastnosti materiálů mají přímý vliv na zdraví člověka, což musí být při návrhu budov zohledňováno. Je nanejvýš potřebné zajistit dostatek světla v prostorách, ve kterých vykonáváme zrakově náročnou činnost a trávíme zde většinu času. Pro naše zdraví je ideální žít v psychické pohodě a denní světlo je v tomto ohledu nenahraditelné. Pro dané místnosti platí normy, které projektant musí dodržovat. Projektanti při návrhu budov pro tyto účely využívají počítačových simulací, díky nimž lze matematicky modelovat vliv prostupu světla okenních výplní na kvalitu denního světla v referenční místnosti. Vedle prostupu světla hraje přitom důležitou roli i odraz světla od světelně činných prvků.

Je důležité si uvědomit, že na každou místnost klademe jiné požadavky. Zatímco pro denní část domu jako je kuchyň či pracovna potřebujeme světla co nejvíce, pro noční místnosti a skladovací prostory je maximum světla spíše nežádoucí a preferujeme v nich přítomnost a klid. V jiných prostorech je nutné zajistit bezpečnost a pocit soukromí. Znamé je rozdělení domu na denní a noční část.

V promítacích a koncertních sálech je vedle akustiky kladen důraz také na prevenci možného oslnění, přičemž ve vnitřním prostoru by mohlo docházet k oslnění odrazem od lesklých povrchů. Proto je nutné zabývat se také pohlcováním nežádoucího světla a s tím spojeným studiem vlivu tvaru a struktury materiálu na odraz a absorpci světla.

1.1 Rešerše v oblastech týkajících se zvolených témat

V následující kapitole je předložen stručný přehled rešerší na jednotlivá zkoumaná témata včetně jejich závěrů a případných komentářů.

1.1.1 Vliv tvaru povrchu materiálu na světelné vlastnosti

V článku [1], který se zabýval hodnocením vlivu tvaru povrchu expandovaného polyvinylchloridu na odraz světla, byly pro tyto účely vyrobeny vzorky na CNC frézce, a to s různými tvary, hloubkami, šířkami a počtem povrchových drážek. Vzorky byly následně porovnány z hlediska jejich schopnosti odrážet světlo. Na základě experimentálních měření bylo zjištěno, že nejvyšší odrazivost byla dosažena v případě hladkého povrchu zkoumaného materiálu. Nižší hodnoty odrazivosti byly naměřeny u profilovaných povrchů. Odrazivost obecně klesala s rostoucím počtem drážek, se zvětšující se šířkou drážky a také se zvětšující se

hloubkou drážky. Studován byl také vliv samotného tvaru drážky. Nejvyšší odrazivost světla byla naměřena u vzorku s obdélníkovou drážkou, a naopak nejnižší hodnoty odrazivosti vykazovaly vzorky s drážkou trojúhelníkovou. Výsledky jsou však ovlivněny nerovnostmi povrchu po obrábění. Část práce se také zabývá matematickou simulací činitele denní osvětlenosti pro různé tvary povrchu stěn ve zkoumané místnosti pomocí softwaru Wdls 4.1. Bylo ověřeno, že nejvyšší odrazivost byla získána v případě hladkých stěn místnosti. Profilované povrchy stěn vedou k nižší odrazivosti a také k nižším hodnotám osvětlenosti v místnosti.

Vlivu nerovnosti skla na přenos světla se věnuje článek [2]. Zkoumána byla skla hladká, strukturovaná s nerovnostmi ve tvaru drážek, jehlanů a obrácených pyramid, ale i skla s lehkými nerovnostmi. Bylo zjištěno, že strukturovaná skla propouštějí více světla než skla s rovným povrchem. Strukturované sklo totiž dokáže zachytit více světla přeměrováním odražených paprsků na přední ploše a dát jim druhou šanci postoupit dále. Skleněné konstrukce s hrubší strukturou skla tedy mohou zachytit více světla, které by u hladkých skel uniklo kvůli odrazu. Největší zlepšení prostupu světla oproti hladkému sklu vykazala nejhrubší struktura.

1.1.2 Technologie 3D tisku

Především z důvodu ovlivnění výsledků nerovnostmi povrchu při obrábění byla pro výrobu a výzkum polymerních vzorků raději zvolena technologie FDM. Jedná se o snadno a poměrně levně dostupnou aditivní technologii vhodnou pro tvorbu prototypových a malosériových dílů. Aditivní technologie či aditivní výroba, známá též pod pojmem 3D tisk, představuje inovativní přístup k výrobě objektů. Na rozdíl od tradičních způsobů obrábění, které jsou typické odebráním materiálu z polotovaru, aditivní technologie pracuje na principu postupného nanášení vrstev materiálu a vytváření objektu podle dat z digitálního modelu. Aditivní technologie umožňuje tvorbu složitých a organických tvarů, které vedou k efektivnějším strukturám snižujícím hmotnost výrobku, a to při zachování mechanických vlastností.

S aditivní výrobou jsou však spojeny i určité problémy, které vyžadují pozornost. Konkrétně u technologie FDM (Fused Deposition Modeling) vznikají otázky ohledně soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami, celkových mechanických vlastností a dlouhodobé stability, zahrnující jak aspekty chemické, tak rozměrové [3-5].

Další výzvou je vliv pórovitosti struktury, protože vytištěné modely zpravidla obsahují určité procento dutin [6-9].

U technologie 3D tisku je důležitá nejen volba materiálu, ale také podmínky. Vliv různých parametrů 3D tisku, jako je průměr trysky, orientace výplně, výška vrstvy a teplota tisku, na tahové a ohybové vlastnosti kompozitů z nylonu 6/66 vyztuženého skelnými vlákny byl zkoumán v [10]. Studie zjistila, že nejvyšší mechanické tuhosti bylo dosaženo při orientaci výplně 0° a použití velké výšky vrstvy a vysoké teploty tisku. Průměr trysky zároveň nevykazoval konzistentní vliv na mechanické vlastnosti.

Vliv tloušťky vrstvy na mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků vyrobených z PLA, ABS a PETG byl zkoumán v [11]. Výzkum prokázal, že zvyšující se tloušťka vrstvy snižuje konečnou pevnost v tahu a deformaci při přetržení u všech materiálů. Vzorky PLA však vykazovaly výraznější snížení pevnosti v tahu a deformace při přetržení v důsledku hydrolyzy. Současně vzorky PETG vykazovaly menší pokles mechanických vlastností se zvýšenou tloušťkou vrstvy.

Další studie [12] zjistila, že zvýšení tloušťky vrstvy by mohlo snížit pevnost v tahu vzorků ABS a PETG až o 20 %. Vyšší úhel tisku navíc snížil pevnost v tahu přibližně o 12 %.

Vliv orientace stavby, vzoru výplně a hustoty výplně na povrchové napětí 3D tištěných vzorků PLA byl zkoumán v [13]. Studie zjistila, že vzorky vytištěné v orientaci na hraně (0°) vykazovaly výrazně nižší pevnost v tahu a Youngův modul než vzorky ve svislé orientaci (90°), což zvýraznilo anizotropní chování.

Další výzkum [14] ukázal, že vzorky PLA orientované na hraně vykazovaly optimální mechanické vlastnosti, včetně pevnosti v tahu, pevnosti v ohybu, tuhosti a tažnosti, ve srovnání s plochou a vzpřímenou orientací. Byl zkoumán i vliv tloušťky vrstvy a rychlost posuvu. Studie prokázala, že spolu se zvyšováním obou parametrů se snižuje tažnost.

Studie [15] prokázala, že u 3D tištěných vzorků PLA vyrobených pomocí technologií FDM se zvýšila pevnost v tahu, když byly rastry orientovány rovnoběžně s aplikovaným zatížením a také s vyšší hustotou výplně a nižší tloušťkou vrstvy.

Vliv vertikální a horizontální orientace tisku na únavové vlastnosti v ohybu vzorků polymerů z ABS a PLA byl zkoumán v [16]. Studie zjistila, že vertikální vzorky vykazovaly kratší únavovou životnost než horizontální vzorky pro oba materiály, zejména při nižších úrovních napětí. Vzorky PLA navíc prokázaly delší únavovou životnost než ABS při stejných podmínkách zatížení.

Vliv teploty tisku na tahové vlastnosti 3D tištěných vzorků PLA byl studován v [17]. Studie dospěla k závěru, že zvýšení teploty tisku zvýšilo pevnost v tahu a Youngův modul. Měla však zanedbatelný vliv na prodloužení při přetržení.

Ve studii [18] byl zkoumán vliv teploty FDM 3D tisku a tloušťky vrstvy na mechanické vlastnosti materiálu PLA. Bylo prokázáno, že zvyšující se teplota tisku zlepšuje adhezi mezi vrstvami, avšak se zvyšující se teplotou má materiál zároveň tendenci stát se křehkým. S nárůstem teploty dochází ke snížení viskozity a vytlačený materiál ztrácí svůj kruhový tvar a stává se oválným, čímž se zvětšuje kontaktní plocha mezi vrstvami. Přílnavost se také zvyšuje s nižší tloušťkou vrstvy.

V článku [19] autoři při FDM 3D tisku polymerních materiálů PLA, PETG a ABS použili 3 různé teploty tisku odstupňované vždy po 20 °C dle teplotního rozsahu daného výrobcem filamentu. Při tahové zkoušce byl na vyrobených vzorcích následně zkoumán vliv teploty tisku na tahové vlastnosti. U všech testovaných materiálů bylo prokázáno, že zvyšující se teplota tisku zvyšuje pevnost v tahu vyrobených vzorků.

Podmínky 3D tisku významně ovlivňují kvalitu povrchu tištěných vzorků. Jak je uvedeno v [20], drsnost povrchu vzorků z materiálu PLA se obecně zvyšuje s tloušťkou vrstvy, zatímco teplota a rychlost tisku mají na drsnost minimální vliv. Změna drsnosti povrchu má významný vliv na světelně technické vlastnosti materiálů.

1.1.3 Skleněné výplně oken a dveří

V článku [21] věnovaném navrhování rozměru oken potřebného ke splnění požadavků na osvětlenost místností je konstatováno, že při předběžném návrhu výplní otvorů je nutné vycházet z faktu, že v současných oknech velkou část plochy zabírají okenní rámy. V minulosti byl přítom tento prvek daleko subtilnější, a to především z toho důvodu, že často nesl pouze jednu až dvě tabule skla. V současných oknech, osazených většinou dvojskly nebo trojskly, dosahuje plocha rámu až 25 % z celkové plochy okna. Tím, že se s přibývajícím počtem zasklení snižuje hodnota činitele denní osvětlenosti v interiéru, se musí pro zachování světelných podmínek nutně zvětšit plocha nového okna oproti oknu stávajícímu, osazenému jedním až dvěma skly. V článku je pomocí matematických simulací prokázáno, že při nahrazení stávajícího okna s jednoduchým zasklením novým oknem s dvojsklem, by se musela pro zachování činitele denní osvětlenosti zvětšit plocha okna o 20 %. V případě

nahrazení okna s jedním sklem novým oknem s trojsklem by se plocha okna musela zvětšit dokonce o 40%.

Autoři v článku však počítají s prostupem světla pro jednu tabuli skla 85%, což znamená činitel prostupu světla $\tau = 0,85$. V tomto článku přitom není uvedeno, s jakou hodnotou činitele prostupu světla je počítáno u dvojskla a trojskla. Vše přitom nasvědčuje tomu, že jsou v těchto simulacích jednoduše řazena 2 či 3 stejná skla za sebou, což však neodpovídá skutečnému složení dvojskel a trojskel. Reálná dvojskla a trojskla jsou totiž složena z více druhů skel, jejichž hlavním úkolem je zajistit lepší tepelně izolační vlastnosti. Pro tento účel jsou skla opatřena pokovenou vrstvou, která jim dodává tmavší nádech a zároveň snižuje jejich světelnou propustnost. Lze tedy říci, že výsledky této studie nemohou být přesné a nelze je úspěšně použít v praxi.

V článku věnovaném dennímu osvětlení ve školách [22] jsou k posouzení kvality denního osvětlení vybrány 2 různé učebny ve stejné škole. Pro hodnocení byly vybrány místnosti rozdílných ploch a s rozdílnou velikostí oken. Taktéž barevné provedení povrchů s činitelem odrazu světla bylo odlišné. Okna v učebnách byla osazena dvojskly, jejichž činitel prostupu světla je v této studii uváděn $\tau_{s,norm} = 0,92$ pro jedno sklo. Kvalita denního osvětlení ve zkoumaných učebnách byla hodnocena na základě dvou různých výpočtů, a to podle normy ČSN EN 17037 a následně dle ČSN 73 0580-3. Na základě výpočtů došla studie k závěru, že prostory jsou z hlediska denní osvětlenosti buď zcela nevyhovující, nebo jsou vyhovující jen částečně. Vyhovující osvětlenost přitom vykazovala pouhá polovina pracovních míst, a to pouze místa v lavicích blíže k oknu. Autor dokonce uvádí, že se tento problém týká současných škol všeobecně. Studie však vycházela pouze z výsledků teoretických výpočtů, nikoli z reálných měření v posuzovaných místnostech. Ve výpočtech je přitom uvažováno s poměrně vysokou hodnotou činitele prostupu světla sklem, a i v této studii autor předpokládá, že izolační dvojsklo je složeno ze dvou stejných tabulí skla. Lze proto očekávat, že skutečná osvětlenost místností se liší od výsledků získaných výpočtem.

1.1.4 Kompozity na bázi polymer/ovčí vlna

Ovčí vlna byla dosud považována za vedlejší produkt chovu ovcí, a to nejen pro svou nízkou kvalitu, ale také pro nízké ceny. Odhaduje se, že v Evropské unii se ročně vyrobí nejméně 200 000 tun nekvalitní vlny. Důsledkem je, že ovčí vlna

je často spalována nebo posílána na skládky, což jsou neudržitelné a k životnímu prostředí zcela nešetrné postupy [23-25].

Ovčí vlna je přitom se svými unikátními vlastnostmi jedním z nejkvalitnějších, nejčistších a nejekologičtějších izolačních materiálů na světě. Vlněná vlákna, která nedráždí oči, pokožku ani plíce, nepředstavují žádné nebezpečí pro lidské zdraví. Vyznačují se absorpcí a desorpcí vlhkosti, prodyšností, vysokou odolností, dobrými tepelnými, vibračními a zvukově izolačními vlastnostmi a odolností vůči ohni [26-31].

V souvislosti s rostoucím zájmem o udržitelné využívání přírodních zdrojů byla vlna přehodnocena jako dosud podceňovaný a nedostatečně využívaný obnovitelný zdroj, který si zaslouží daleko efektivnější využití [32].

Obecně byla zkoumána možnost využití ovčí vlny jako složky v různých kompozitních materiálech, včetně cementu na bázi ovčí vlny, polymerních a pryskyřičných kompozitů či sendvičových panelů s tepelně izolačními vlastnostmi a schopností pohlcovat zvuk [33].

Výsledky studií ukázaly, že tyto kompozity mohou být díky své nízké hmotnosti, snížené tepelné vodivosti a lepším mechanickým vlastnostem použity jako izolační stavební prvky [34].

Cílem začlenění přírodních vláken do polymerů je vytvořit kompozitní materiály, které jsou nejen šetrné k životnímu prostředí, ale také nákladově efektivní, se sníženou hustotou, a přitom mechanicky odolné, se specifickými vlastnostmi přizpůsobenými různým aplikacím [35,36].

V článku věnovaném epoxidovým pryskyřicím [37] jsou uvedeny různé průmyslové aplikace, jakými jsou desky s laminovanými obvody, zapouzdření elektronických součástek, povrchové vrstvy, vyztužení vlákna a lepidla. To vše je umožněno díky univerzální charakteristice epoxidu a jeho rozmanitosti. Možnosti využití epoxidů ve vysoce výkonných oborech jsou však omezeny kvůli delaminaci a nízké odolnosti vůči nárazu či křehkosti. Využití epoxidu pro širší průmyslové aplikace tedy vyžaduje další začlenění a úpravu. Modifikované epoxidové pryskyřice jsou používány při výrobě kompozitů zpevněných přírodními vlákny a při výrobě nejrůznějších průmyslových produktů, a to především díky velmi dobrým mechanickým, tepelným a elektrickým vlastnostem.

2. KRITICKÉ ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

V praxi se ukazuje, že světelné vlastnosti používaných světelně činných materiálů nejsou řádně prozkoumány, popsány a experimentálně ověřeny. Z těchto důvodů ani nemohou být při stavebním projektu správně zohledněny. Nejedná se jen o skleněné výplně oken a dveří, ale o veškeré světelně činné materiály, které se v místnostech podílejí na distribuci světla. Matematické výpočty a simulace kvality denního osvětlení pracují s neúplnými či zkreslenými údaji o propustnosti světla a jejich výsledky neodpovídají realitě.

Jelikož projektant před samotnou realizací stavby při matematických simulacích často vychází z nepřesných dat a přibližných odhadů či mylných předpokladů, tak po realizaci nemůže dojít k očekávanému výsledku a osvětlenost uvnitř místnosti neodpovídá normám a stává se tak nevyhovující. Tím, že jsou na každou místnost kladeny jiné požadavky, je zapotřebí také použít vhodný typ skla. Záměrně, který si však chce správně vybrat a porovnat si přitom skleněné výplně podle prostupu světla, nemá zpravidla k dispozici ucelený a ověřený přehled těchto parametrů. Skleněným výplním jsou často mylně nebo i zcela záměrně přisuzovány vlastnosti, které ve skutečnosti nesplňují a po technické stránce ani splňovat nemohou. Údaje o propustnosti světla jsou často zkreslené, jindy tyto údaje nejsou k dispozici vůbec [38,39].

Dojde-li k výměně oken do stejných stavebních otvorů, potom s novými okny obvykle dochází ke zhoršení denní osvětlenosti v místnosti. Stává se tak především z důvodu zmenšení prosklené plochy oken, jelikož se u nových oken zvětšuje podíl rámu na úkor skla v porovnání s okny starými [21].

Opomíjeným faktem však je, že moderní tepelně izolační zasklení vykazuje výrazně nižší propustnost světla než původní okna se starými a často jednoduchými skly. Složení dvojskel a trojskel se liší od představ řady projektantů, kteří z neznalosti mylně uvažují o dvou či třech stejných tabulích skla řazených za sebou [21,22].

Chybí seriózní studie prostupu světla u okenních výplní, která by přispěla k tomu, aby opravdová denní osvětlenost po realizaci stavby lépe odpovídala matematickým simulacím prováděným ještě ve fázi projektu. K tomu, aby mohly být splněny platné normy, však musí být prakticky ověřeno, jaké jsou skutečné a nezkreslené hodnoty propustnosti nového zasklení.

Dalším problémem je, že matematické simulace pro hodnocení kvality denní osvětlenosti v případě odrazu světla světelně činných ploch zohledňují především barevné provedení jednotlivých povrchů v místnosti. Odraz světla však není jen otázkou barevného provedení, ale také tvaru či struktury materiálu a řady dalších

faktorů, mezi nimiž hraje významnou roli především tvar a struktura povrchu. Při procesu odrazu světla se navíc světelně činný povrch stává sekundárním zdrojem světla, což v praxi významně ovlivňuje výsledek.

Většina běžně používaných programů pro světelně technické účely nepracuje se skutečnými, ale pouze s idealizovanými modely odrazu světla. Skutečné odrazné vlastnosti materiálů nejsou doposud ve světě odborných technických výpočtů dostatečně zohledňovány [40].

Ovčí vlna je jedním z nejčistších a nejekologičtějších izolačních materiálů na světě, a přesto je často spalována nebo posílána na skládky. Dobře známé je využití ovčí vlny v textilní výrobě, ale pro tyto účely jsou vybírána pouze nekvalitnější vlákna. Přitom však nekvalitní ovčí vlnu, tento nedostatečně využívaný obnovitelný zdroj, lze používat jako izolační materiál pro zateplení pláště budov. Zkoumána již byla možnost využití ovčí vlny jako složky v různých kompozitních materiálech s tepelně izolačními vlastnostmi a schopností pohlcovat zvuk. Tyto kompozity mohou díky své nízké hmotnosti a snížené tepelné vodivosti sloužit jako izolační stavební prvek a zároveň také jako prosvětlovací otvor. Zatímco sklo je křehký materiál a ve větších formátech jej lze instalovat pouze ve svislé poloze, kompozit ve složení polymer/ovčí vlna lze díky jeho dobrým mechanickým vlastnostem instalovat v jakékoli poloze.

Dosavadní výzkum kompozitů polymer/ovčí vlna se soustředil především na mechanické vlastnosti, tepelně izolační vlastnosti, schopnosti pohlcovat zvuk či odolnost proti ohni. Aby však kompozity s ovčí vlnou mohly sloužit jako prosvětlovací otvor, bylo nutné se ještě zaměřit na prostup světla, a právě na tuto problematiku se podle autorových informací dosud nikdo nesoustředil.

3D tisk je široce rozšířenou a dostupnou aditivní technologií, která je využívána především pro výrobu prototypů. Masivnějšímu rozšíření této technologie a většímu podílu na standardní výrobě brání řada problémů. Jedná se především o soudržnost mezi jednotlivými vrstvami, pórovitost struktury, rozměrovou stabilitu a další. V této souvislosti byl již prozkoumán vliv různých parametrů 3D tisku, jakými jsou průměr trysky, orientace výplně, výška vrstvy a teplota tisku, na mechanické vlastnosti výrobků či drsnost povrchu.

Pokud je však autorovi známo, nebyla dosud publikována studie o vlivu parametrů FDM 3D tisku na světelně technické vlastnosti polymerních materiálů. Zatím tedy bohužel není možné optimalizovat parametry pro zvýšení efektivity se zaměřením na světelné vlastnosti. Desky z průsvitných polymerních materiálů, vyrobené 3D tiskem, by mohly sloužit jako prosvětlovací otvory, přičemž na rozdíl od křehkých skel, mohou být instalovány v jakékoli poloze.

3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Otestovat možnosti využití technologie 3D tisku pro výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur s důrazem na schopnosti pohlcování nežádoucího světla.
- Prozkoumat vliv geometrie a povrchového rozložení otvorů na světelné absorpční vlastnosti 3D-tištěných materiálů.
- Prozkoumat vliv změny parametrů 3D tisku na prostup světla transparentních polymerních materiálů.
- Porovnat prostup světla skleněných materiálů, které se běžně používají jako okenní a dveřní výplně v obytných budovách.
- Vyhodnotit různé faktory ovlivňující prostup světla skleněných materiálů jako jsou zbarvení, tvar povrchu, tloušťka a vícevrstvé struktury.
- Pomocí matematických simulací ilustrovat, jak propustnost světla zkoumaných skel ovlivňuje kvalitu denního osvětlení v simulované obytné místnosti.
- Provéřit možnost využití kompozitů polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace, jako jsou světelně činné izolační materiály.
- Prozkoumat vliv koncentrace ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích na prostup světla.
- Pomocí matematických simulací ilustrovat, jak propustnost světla spojená s koncentrací ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích ovlivňuje kvalitu denního osvětlení v simulované obytné místnosti.

4. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část je rozdělena na dvě dílčí části. První část je zaměřena na základní pojmy, jako je světlo a osvětlení, s důrazem na světelné vlastnosti materiálu, jako je prostup či odraz světla a s tím spojené veličiny. Druhá část je věnována zkoumaným materiálům a technologiím jejich výroby.

4.1 Světelné vlastnosti materiálů

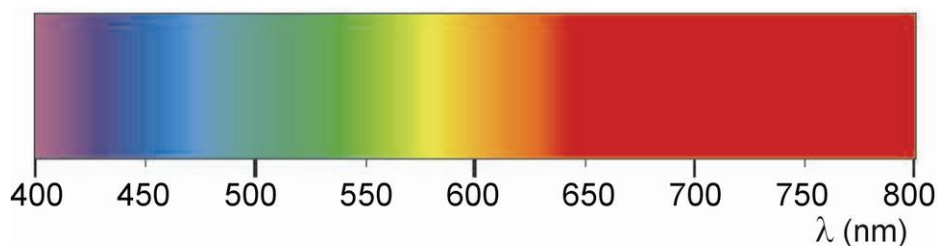
Nejprve je nutné vymezit pojmy, jako je světlo, osvětlenost a osvětlení. Poté bude vysvětlena problematika světelného toku a jeho energetické bilance.

4.1.1 Světlo

Světlo je elektromagnetické záření o určité vlnové délce λ [nm]. Existují tři druhy světla, z nichž pouze jedno je pro člověka viditelné. Mezi světla pro člověka neviditelná patří ultrafialové záření o vlnové délce (100 – 400) nm a infračervené záření s vlnovou délkou (780 – 10⁶) nm.

Viditelné světlo

U viditelného světla nabývá vlnová délka hodnot v rozsahu (380 – 780) nm, přičemž příslušné vlnové délce světla odpovídá zbarvení, např. fialová barva světla se vyskytuje v rozsahu vlnových délek (380 – 450) nm, žlutá barva v rozsahu (560 – 590) nm.



Obr. 1 Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného světla [41]

4.1.2 Osvětlenost

Osvětlenost je označována také jako intenzita osvětlení E [lx] a je dána poměrem dopadajícího světelného toku ϕ [lm] na elementární plochu S [m²], k velikosti této plochy:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (1)$$

Tab. 1 Požadavky na osvětlenost pro místnosti, úkoly a činnosti [42]

Druh prostoru, úkolu nebo činnosti	\bar{E}_m [lx]
Komunikační prostory a chodby, skladiště	100
Schodiště, eskalátory	150
Šatny, umývárny, koupelny, toalety	200
Vstupní haly (ve školách)	200
Psaní, čtení, zpracování dat	500
Technické kreslírny	750
Pracovní stanice CAD	500
Přednáškové haly, konferenční a zasedací	500
Tabule	500
Počítačové učebny	300
Učebny, konzultační místnosti, místnosti	300
Učebny pro večerní studium a vzdělávání	500
Jazykové laboratoře	300
Místnosti pro ruční práce, učební dílny	500
Místnosti pro praktickou výuku a laboratoře	500
Školní jídelny	200
Kuchyně	500
Knihovny – místa pro čtení	500
Recepce, zakládání dokumentů, kopírování	300

V tab. 1 jsou uvedeny příklady vnitřních prostor s hodnotami udržované osvětlenosti \bar{E}_m (hodnotami průměrné osvětlenosti) pro určité činnosti, pod kterou nesmí osvětlenost klesnout.

4.1.3 Osvětlení

Osvětlení rozdělujeme do tří základních skupin:

- denní osvětlení – jedná se o přímé využití sluneční energie.
- umělé osvětlení – světlo získané transformací jiného druhu energie (žárovka, zářivka).
- sdružené osvětlení – kombinuje denní a umělé osvětlení.

Denní osvětlení

Je nutné dávat přednost dennímu osvětlení před umělým, a to ze dvou hlavních důvodů:

- hygienický důvod – při dlouhodobém působení na člověka má denní osvětlení příznivější účinky ve srovnání s osvětlením umělým (např. je tím ovlivněna funkce orgánů lidského těla).
- ekonomický důvod – umělým osvětlením dochází ke zvyšování nákladů, neboť k jeho provozu je nutné využívat elektrickou energii [36].

Denní osvětlení je přirozené osvětlení dané sluncem s přímým využitím sluneční energie. Efektivní využití denního osvětlení snižuje náklady, protože maximálně využívá sluneční energie bez nutnosti transformace a akumulace. Jedná se o nestálý zdroj světla, jehož množství je však omezeno přirozenými faktory, jako jsou oblačnost, roční období [42].

Z hygienického hlediska jsou prostory bez denního osvětlení nevhodné pro trvalý pobyt osob. Pokud se přesto v takových prostorech musí vykonávat nezbytné činnosti, a to zejména z technologických důvodů, musí být organizačně zajištěno, aby pracovníci z těchto prostorů měli možnost každodenního kontaktu s denním světlem. K tomuto účelu se používají zejména následující opatření [41,43]:

- přestávky v práci 2 až 3 hodiny
- zkrácená pracovní doba
- práce obden
- cyklické směnování

Při návrhu denního osvětlení uvnitř budov je nutné zachovat zrakovou pohodu člověka, a to nejen při silném slunečním světle za jasné oblohy, ale také při polojasné a zatažené obloze. Zraková pohoda člověka je dána kvantitativními a kvalitativními kritérii [42].

Kvantitativní kritérium denního osvětlení

Kvantitativní kritérium denního osvětlení je definováno činitelem denní osvětlenosti D [%]:

$$D = \frac{E}{E_h} \cdot 100 \quad (2)$$

kde: E [lx] - je osvětlenost naměřená v kontrolním bodě dané roviny v interiéru.

E_h [lx] - osvětlenost venkovní nestíněné vodorovné roviny.

Hodnota činitele denní osvětlenosti v kontrolním bodě se mění v závislosti na oblačnosti, ročním období a na čase mezi východem a západem slunce. V praxi zpravidla postačí stanovit hodnotu činitele denní osvětlenosti D [%] při nejméně příznivém venkovním osvětlení, což představuje zimní období a při zatažené obloze [42].

Kvalitativní kritéria denního osvětlení

Potřebné světlo musí na dané místo dopadat nejen v dostatečném množství, ale i v příslušné kvalitě. Důležitým kvalitativním kritériem je rovnoměrnost denního osvětlení r [-]:

$$r = \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \quad (3)$$

Rovnoměrnost denního osvětlení je tedy dána poměrem minimální hodnoty D_{\min} [%] k maximální hodnotě D_{\max} [%] činitele denní osvětlenosti naměřené na pracovní rovině v interiéru [42].

Mezi další kvalitativní kritéria patří:

- rozložení světelného toku – v praxi se dává přednost osvětlení zleva nebo zleva a zepředu.
- rozložení jasu ploch v zorném poli – snahou je odstranit rušivé kontrasty a jasy v zorném poli pozorovatele z důvodu lepšího soustředění se na předmět zrakové práce.
- zábrana oslnění – jak pro případ zatažené oblohy, tak i v případě přímého slunečního světla. Osvětlovací otvor není vhodné umístit v zorném poli pozorovatele, aby nedošlo k oslnění. Nabízí se také použití pevného nebo pohyblivého zařízení pro omezení přímého slunečního záření (např. žaluzie, slunolamy).
- barevné podání ploch v interiéru – barva povrchu má zásadní vliv na odrazivost a tím i na množství světla v místnosti. Známým faktem je vliv barvy povrchu místnosti na chování a pocity člověka (teplo, smutek, chlad, vzrušení apod.).

Požadavky na denní osvětlení

Zrakové činnosti jsou rozděleny do sedmi tříd dle zrakové obtížnosti. Požadavky na hodnotu činitele denní osvětlenosti pro každou třídu jsou uvedeny v tab. 2. Minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti musí být splněny ve všech kontrolních bodech interiéru, či jeho funkčně vymezené části [42].

Moderní architektura využívá co nejvíce denního osvětlení a zároveň klade důraz na jeho optimalizaci spolu s prevencí možného oslnění [44].

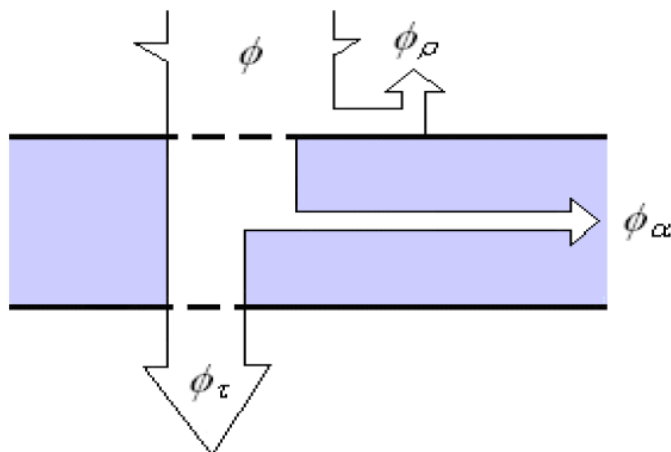
Pokud je vnitřní prostor určen pro různé zrakové činnosti, musí denní osvětlenost vyhovovat činnostem, které mají na osvětlení nejvyšší požadavek [41].

Tab. 2 Třídění zrakových činností s hodnotami činitele denní osvětlenosti [42]

Třída zrakové činnosti	Zraková činnost	Příklady zrakových činností	Činitel denní osvětlenosti	
			D_{min}	D_{max}
I	Mimořádně přesná	Nejpřesnější zraková činnost s omezenou možností použití zvětšení	3,5	10
II	Velmi přesná	Velmi přesné rýsování, velmi jemné umělecké práce	2,5	7
III	Přesná	Přesná výroba a kontrola, technické kreslení, jemné šití a vyšívání	2	6
IV	Středně přesná	Čtení, psaní, žehlení, příprava jídel, obsluha strojů	1,5	5
V	Hrubší	Manipulace s předměty a materiálem, konzumace jídel, oddechové činnosti	1	3
VI	Velmi hrubá	Chůze po komunikacích přístupných veřejnosti, převlékání	0,5	2
VII	Celková orientace	Celkový dohled, chůze, skladování hrubého materiálu	0,25	1

4.1.4 Světelný tok a jeho energetická bilance

Energetická bilance šíření světelného toku přes světelně činnou látku je znázorněna na obr. 2.



Obr. 2 Energetická bilance světelného toku [42]

Dopadající světelný tok je součtem jednotlivých světelných toků:

$$\Phi = \Phi_{\rho} + \Phi_{\alpha} + \Phi_{\tau} \quad (4)$$

kde: Φ – Dopadající světelný tok.

Φ_{ρ} – Světelný tok odražený.

Φ_{α} – Světelný tok pohlcený (při pohlcení dochází k zahřátí látky).

Φ_{τ} – Světelný tok, který prošel přes látku.

Světelný tok Φ , jehož jednotkou je 1 lumen [lm], vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakové vnímání. Pro přepočítání zářivých veličin na fotometrické a naopak se používají následující rovnice [42]:

$$1 \text{ lm} = 147 \cdot 10^{-5} \text{ W} \quad (5)$$

$$1 \text{ W} = 680 \text{ lm} \quad (6)$$

Světelní činitelé

Na základě energetické bilance jsou definováni následující světelní činitelé:

Činitel odrazu světla ρ [–] je dán poměrem odraženého světelného toku od povrchu látky k dopadajícímu světelnému toku na povrch této látky:

$$\rho = \frac{\phi_{\rho}}{\phi} \quad (7)$$

Činitel pohltivosti světla α [–] je dán poměrem světelného toku pohlceného látkou k dopadajícímu světelnému toku na povrch látky:

$$\alpha = \frac{\phi_{\alpha}}{\phi} \quad (8)$$

Činitel prostupu světla τ [–] je dán poměrem světelného toku prošlého přes látku k dopadajícímu světelnému toku na povrch látky:

$$\tau = \frac{\phi_{\tau}}{\phi} \quad (9)$$

V souladu se zákonem zachování energie platí vztah:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (10)$$

4.1.5 Prostup světla

Pokud by byl světelný tok prošlý přes látku roven světelnému toku dopadajícímu, pak by činitel prostupu světla byl roven 1, průchod světla by tak probíhal beze ztrát, tj. $\phi_{\tau} = \phi \Rightarrow \tau = 1$. V praxi však při šíření světla přes osvětlovací otvor ztráty vznikají, proto je činitel prostupu světla $\tau < 1$. Činitel prostupu světla τ [–] je tedy veličinou charakterizující světelné ztráty při průchodu světla [42].

Velikost světelných ztrát při průchodu světla osvětlovacím otvorem je ovlivněna především těmito faktory:

- Množstvím neprůsvitných částí a částečným stíněním (např. rám okna, žaluzie).
- Znečištěním na obou stranách okna

- Druhem materiálu zasklení
- Počtem vrstev (např. dvojsklo, trojsklo)
- Úhlem dopadu světla na osvětlovací otvor
- Tvarem a drsností povrchu

Hodnoty činitele prostupu světla pro vybrané materiály jsou uvedeny v tab. 3. Vzhledem k tomu, že činitel prostupu světla je závislý také na úhlu dopadu světla, jsou hodnoty činitele prostupu světla uváděny při kolmém dopadu $\tau_{s,nor}$ [-].

Tab. 3 Hodnoty činitele prostupu světla při kolmém dopadu na materiál [42]

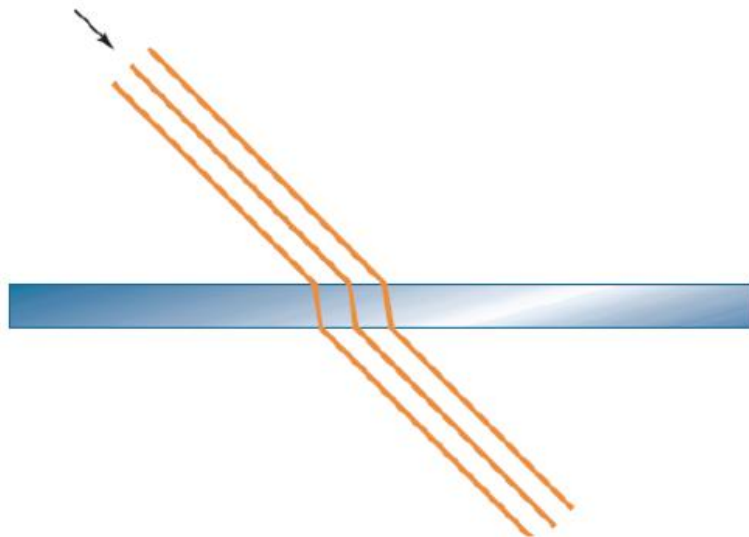
Druh materiálu		Činitel prostupu světla $\tau_{s,nor}$ [-]
Čiré tabulové sklo tl. 3 až 4 mm		0,92
Surové sklo (nevzorované)		0,88
Vzorované sklo		0,85 až 0,90
Drátové sklo tl. 6 až 7 mm		0,60 až 0,86
Mdlené sklo		0,75 až 0,80
Laminát se skelným vláknem		0,35 až 0,85
Akrylát	Čirý	0,85 až 0,92
	Rozptýlený	0,60 až 0,80
Netermální skla		0,35 až 0,70
Reflexní skla		0,55 až 0,65
Skleněné tvárnice	Jednovrstvé	0,85 až 0,89
	Dvouvrstvé	0,55 až 0,62
Skleněné příčky z tvárníc copilit	Jednovrstvé	0,86
	Dvouvrstvé	0,80
Záclony		0,50 až 0,75

Je zřejmé, že uváděné hodnoty činitele prostupu světla pro jednotlivé materiály jsou pouze orientační a jejich zahrnutí do matematických simulací je problematické. Za pozornost stojí, že činitel prostupu světla je v případě čirého tabulového skla popsán jedinou hodnotou $\tau_{s,nor} = 0,92$, a to pro rozsah tloušťek skla od 3 do 4 mm. Vliv tloušťky materiálu na prostup světla je přitom zcela zásadní.

Prostup světla je relativně složitým procesem, který závisí na mnoha faktorech. Tuto problematiku bude nutné popsat podrobněji. V praxi totiž rozeznáváme odlišné způsoby prostupu světla.

Přímý prostup

U čirých materiálů, jako je voda, dochází k prostupu světelného záření takovým způsobem, že úhel dopadu se rovná úhlu, pod kterým záření z materiálu vystupuje, zároveň však přitom dochází k určitému posunutí, jak je znázorněno na obr. 3 [41].

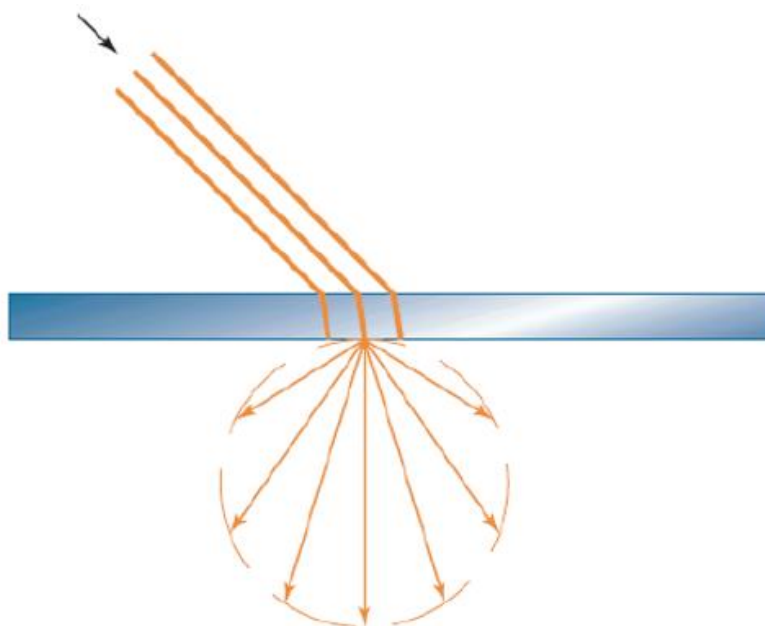


Obr. 3 Přímý prostup světelného záření [41]

Difuzní prostup

U některých materiálů, které se označují jako dokonale rozptylující, dochází k difuznímu rozptylu (viz obr. 4) [41].

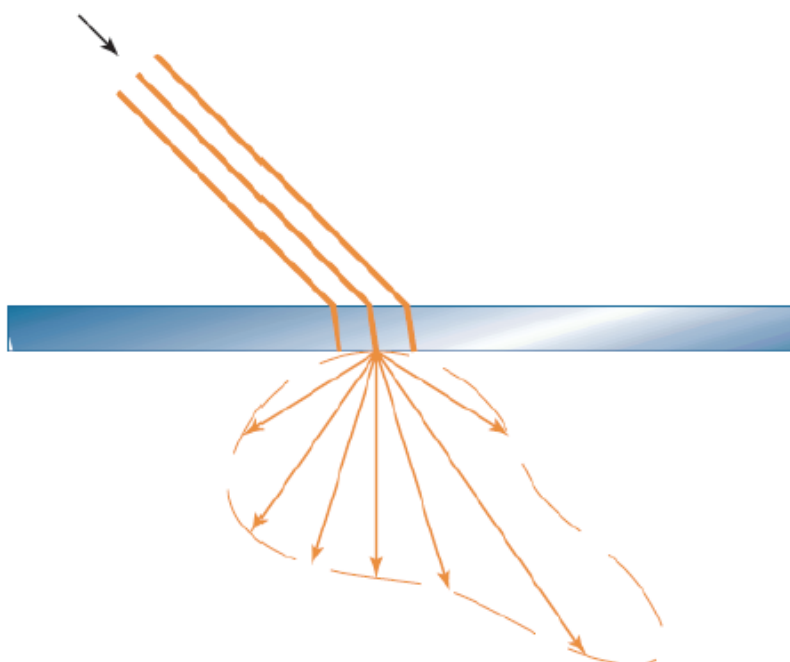
Příkladem dokonale rozptylujícího materiálu je mléčné sklo. Difuzní prostup světla lze pozorovat při zcela zatažené obloze.



Obr. 4 Difuzní prostup světelného záření [41]

Smišený prostup

V praxi však nejčastěji dochází ke smíšenému prostupu, který se skládá jak z části difuzní, tak z přímého prostupu (viz obr. 5) [41].



Obr. 5 Smíšený prostup světelného záření [41]

Schopnost materiálu propouštět světlo závisí nejen na typu materiálu, ale také na řadě dalších faktorů, jako je barva, vnitřní struktura, tvar povrchu, znečištění, tloušťka a hustota materiálu, teplota, index lomu, vlnová délka a úhel dopadu světla [45–48].

4.1.6 Odraz a lom světla

Odraz světla souvisí s činitelem odrazu světla ρ [–], který je definován jako poměr odraženého zářivého (či světelného) toku od daného povrchu a dopadajícího toku na tento povrch. Směrné hodnoty činitele odrazu světla běžných povrchů jsou uvedeny v tab. 4. Tyto hodnoty jsou průměrné a platí pro čisté a rozptýlné povrchy, pokud není uvedeno jinak [42].

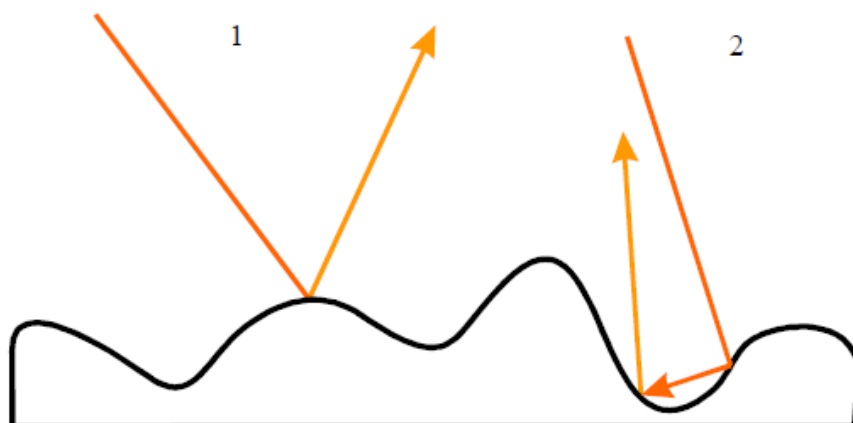
Uvedené hodnoty činitele odrazu světla jsou pouze orientační. Pro odraz světla není důležité jen barevné provedení povrchu, ale také jeho tvar či struktura materiálu a řada dalších faktorů.

Tab. 4 Činitelé odrazu světla běžných povrchů [42]

Druh povrchu		Činitel odrazu světla ρ [-]
Povrch konstrukce	Bílý	0,75 až 0,80
	Krémový, béžový	0,60 až 0,70
	Světle žlutý	0,60 až 0,70
	Tmavě žlutý	0,50 až 0,60
	Světle červený	0,40 až 0,50
	Tmavě červený	0,15 až 0,30
	Světle zelený	0,45 až 0,65
	Tmavě zelený	0,05 až 0,20
	Světle modrý	0,40 až 0,60
	Tmavě modrý	0,05 až 0,20
	Hnědý	0,12 až 0,25
	Světle šedý	0,40 až 0,60
	Tmavě šedý	0,15 až 0,20
	Černý	0,01 až 0,03
Cihla (Červená, pálená hlína)		0,25
Písek světlý		0,50
Sádra bílá		0,80 až 0,92
Mramor bílý		0,55 až 0,80
Žula		0,40 až 0,50
Dřevo	Světlé	0,30 až 0,50
	Tmavé	0,10 až 0,25
Zeleň, tráva		0,05 až 0,10
Živičný povrch		0,10
Betonová dlažba		0,30
Zemina		0,08 až 0,20
Ocel		0,28
Hliník eloxovaný nebo leštěný		0,75 až 0,85
Zrcadlo skleněné (zrcadlový odraz)		0,80 až 0,90
Okno	S čirým sklem (z vnější strany)	0,10
	S čirým sklem a bílou záclonou	0,30 až 0,40

Významným faktorem ovlivňujícím odraz světla je tedy povrch tělesa, který zpravidla není dokonale hladký. Při zvětšení vypadá povrch tělesa přibližně jako na obr. 6. Tvoří jej drobné nerovnosti, takže při procesu odrazu světla od světelně činného povrchu dochází ke změně směru šíření světelného toku v prostoru, přičemž se jednotlivé paprsky mohou odrazit dvěma způsoby. Buď se paprsky

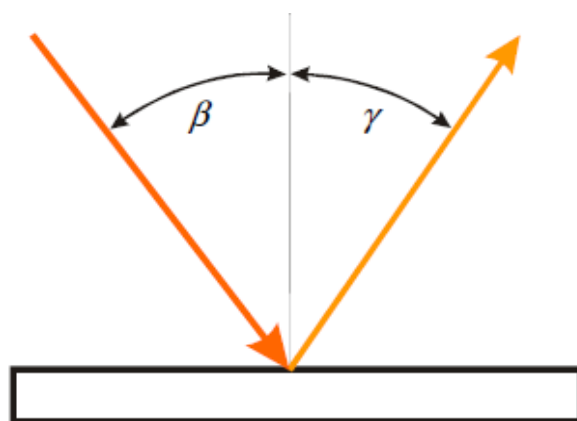
odrazí jednorázově (paprsek vlevo s označením 1), nebo je paprsek podroben vícenásobnému odrazu a případnému lomu (paprsek vpravo s označením 2) [40].



Obr. 6 Odraz světla na mikroskopické úrovni [40]

Ideální zrcadlový odraz

Charakteristickou vlastností zrcadlového odrazu je směrovost, která je tím vyšší, čím jsou plošky na povrchu více uspořádané, tedy jinými slovy, čím je povrch hladší. Světelný paprsek (obr. 7) se odrazí od povrchu pod stejným úhlem, pod kterým na povrch dopadl, platí tedy $\beta = \gamma$.

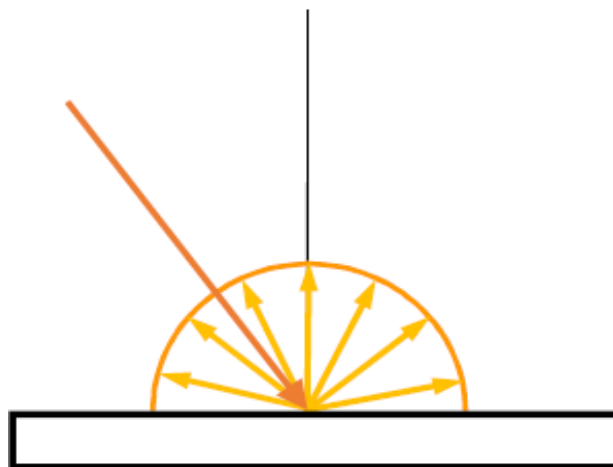


Obr. 7 Ideální zrcadlový odraz světla [40]

Ideální zrcadlový odraz vykazuje jas jen ve směru odraženého paprsku. Zrcadlová složka je zároveň příčinou vzniku odlesků na zobrazovaném tělese. Právě vlastnosti ideálně zrcadlové plochy jsou předpokládány ve výpočtech při návrhu reflektorů [40].

Ideální difuzní odraz

Při difuzním odrazu (obr. 8) se odražený světelný tok rovnoměrně rozptýlí v prostoru a povrch látky vykazuje ve všech směrech konstantní jas [40].

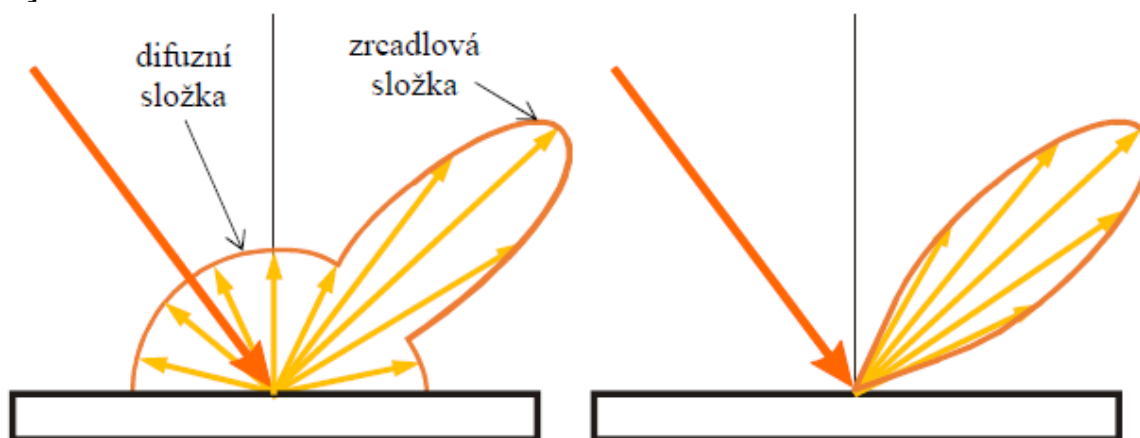


Obr. 8 Ideální difuzní odraz světla [40]

Difuzní světelně činné materiály, které mění rozložení světelného toku rozptylem, se nazývají rozptylovače. Při světelně technických výpočtech se pro zjednodušení téměř výhradně využívá vlastností ideálně difuzní plochy [40,49].

Smíšené odrazy

Většina povrchů materiálů v praxi nevykazuje ani ideálně zrcadlový, ani ideálně difuzní odraz. Jedná se tedy o smíšené odrazy. Matné povrchy mají většinou lesklá místa, a naopak u zrcadlově odrážejících povrchů je jas odražené složky pozorovatelný nejen pod úhlem zrcadlového odrazu, ale i v blízkém okolí [40].



Obr. 9 Difuzní odraz se zrcadlovou složkou (vlevo) a zrcadlový odraz s rozptýlenou složkou [40]

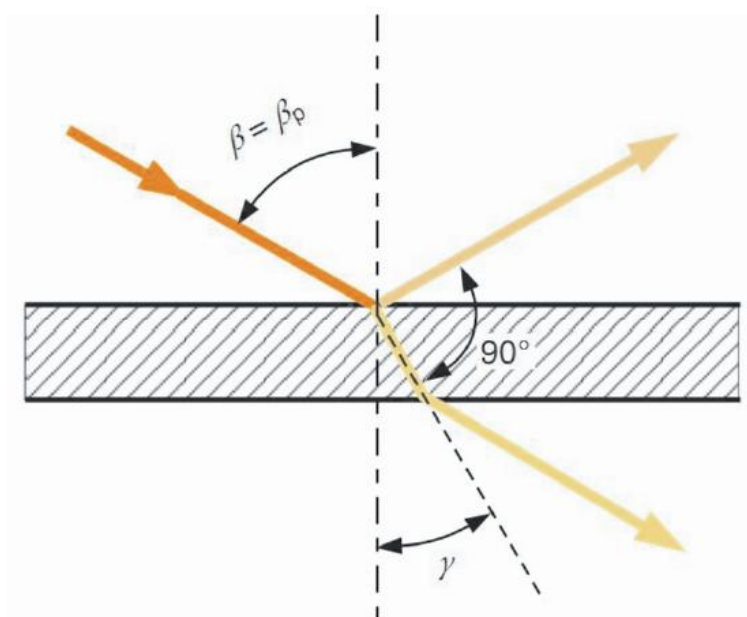
Většina běžně používaných světelně technických programů pracuje pouze s idealizovanými modely odrazu světla. Skutečné odrazné vlastnosti materiálů bohužel nejsou v technických výpočtech dostatečně zohledňovány [40].

Mnohonásobné odrazy

Světelný tok dopadá na jednotlivé světelně činné plochy, které se v místnosti vyskytují. Strop, stěna i podlaha v místnosti vykazují určité odrazné vlastnosti, které musí být zohledněny. V důsledku odrazu světla od těchto ploch dochází k novému rozložení světelných toků v prostoru. Tím, že na sledované plochy opakovaně dopadají a odrážejí se nové dílčí světelné toky, probíhá proces mnohonásobných odrazů. Plochy obklopující sledovaný prostor je tedy nutné chápat jako sekundární zdroje světla, které svým vyzářeným světelným tokem ovlivňují rozložení světelného toku v místnosti. Protože činitel odrazu světla je vždy nižší než jedna, dochází k postupnému poklesu odražených světelných toků, až se stane jejich vliv zcela zanedbatelným [49].

Lom světla

V praxi dochází k částečnému odrazu světelného záření a také k jeho lomu. U tenkých vrstev skel lze odraz s lomem ztotožnit, ale s rostoucí tloušťkou skla se odraz i lom světla budou od sebe lišit [41].



Obr. 10 Odraz a lom paprsku světla [41]

Index lomu n [–] je v tomto případě určen podle vzorce [41]:

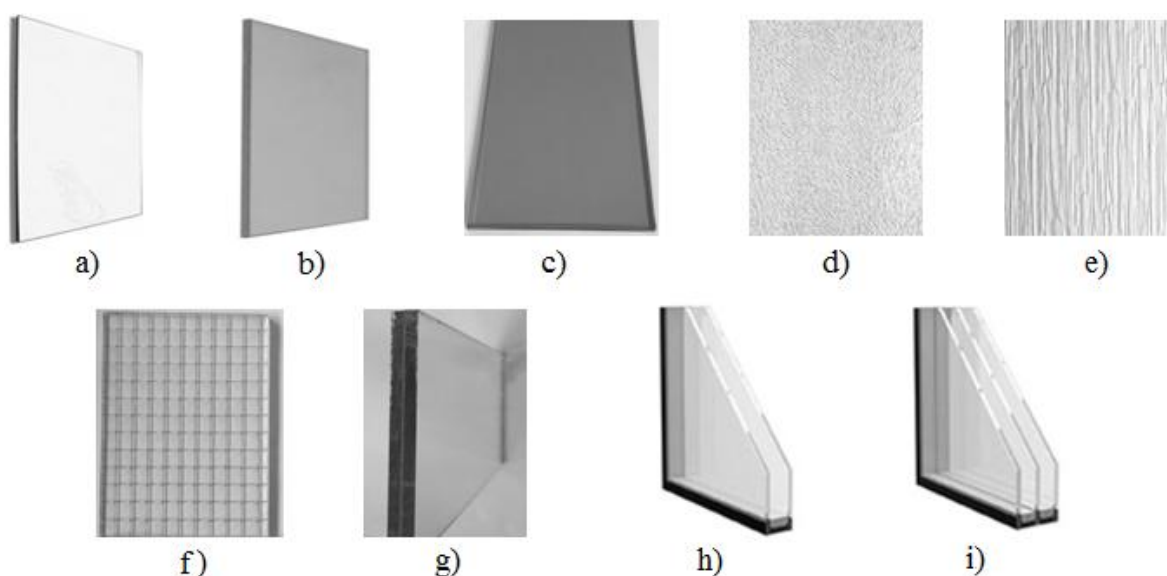
$$n = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \quad (11)$$

4.2 Materiály a technologie

V každé provedené studii byl zkoumán jiný druh materiálu, proto je každému druhu materiálu a technologii jeho výroby věnována samostatná kapitola.

4.2.1 Výroba a vlastnosti skla pro okenní a dveřní výplně

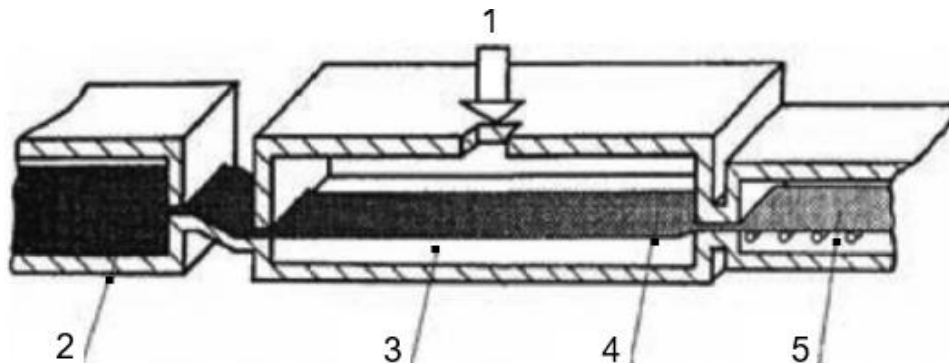
Ve studii věnované propustnosti světla lehkého aktivního skla byly zkoumány vzorky skla běžně používaného v okenních a dveřních výplních. Každý druh skla se vyrábí odlišnou výrobní technologií, proto je nutné si tyto technologie podrobně představit.



Obr. 11 Zkoumané vzorky skla: Základní čiré sklo Float (a), sklo s nízkou emisivitou LowE (b), reflexní bronzové sklo Stopsol (c), dekorativní sklo s čirou činčilou (d), a čirou kůrou (e), drátěné sklo (f), vrstvené sklo (g), dvojsklo (h), trojsklo (i)

Float

Float je základní ploché, průhledné sklo, jehož výroba probíhá kontinuálním litím roztavené skloviny na hladině taveniny cínu. Během tohoto procesu vznikají tabule skla požadovaného formátu, určené především k dalšímu zpracování [50].



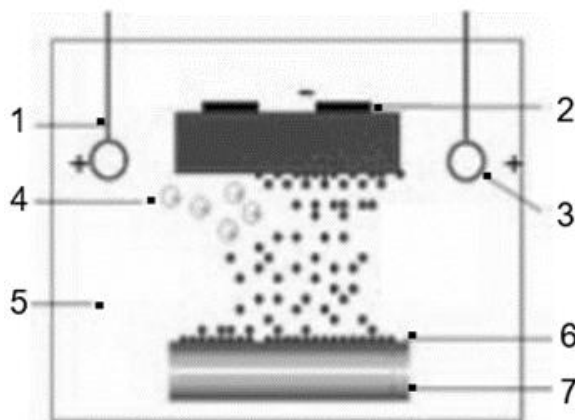
Obr. 12 Schéma výroby čirého skla Float

1 - definovaná atmosféra; 2 - tavící pec; 3 - roztavený cín; 4 - pás skla; 5 - chladicí pec [50]

Vstupní surovina se nazývá sklářský kmen a má následující složení: písek – 58,84 %, soda – 18,05 %, dolomit – 15,66 %, vápenec – 4,78 %, sulfát – 0,95 %, znělec (fonolit) – 1,73 %. Ke sklářskému kmenu se přidávají skleněné střepy, a to v rozsahu 20–30 % za účelem usnadnění tavení [50].

LowE

Sklo LowE je charakteristické nízkou emisivitou a je také nazýváno sklem s tepelně izolační funkcí. Toto sklo je na jedné ploše opatřeno povlakem, nanášeným v magnetronu. Při tomto procesu je ve vakuu pomocí katodového rozprašování na povrch skla nanesena vrstva atomů stříbra a oxidů kovů. Tato vrstva je citlivá na poškození, proto lze sklo LowE použít pouze v izolačních dvojsklech a trojsklech, kde je citlivá vrstva orientována směrem do meziskelního prostoru [50].

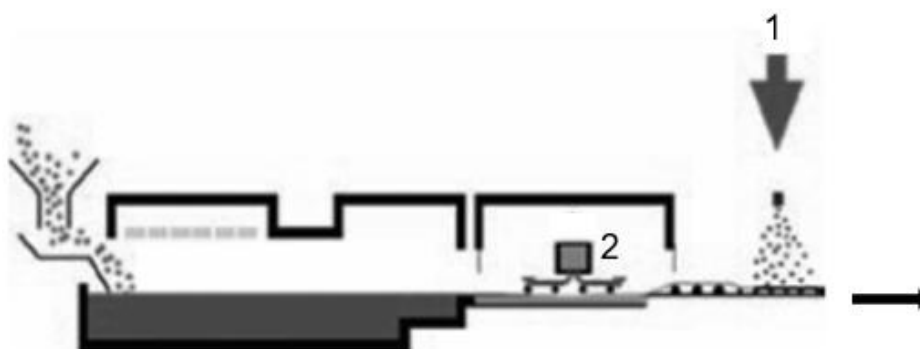


Obr. 13 Schéma magnetronového naprašování

1 - katoda; 2 - magnety; 3 - anoda; 4 - ionizovaný plyn; 5 - plyn; 6 - vytvořená vrstva; 7 - tabule skla (substrát) [50]

Stopsol bronz

Sklo Stopsol bronz je monolitické sklo s pyrolyticky nanesenou transparentní vrstvou kovových prvků na povrchu skla v podobě tenkého povlaku oxidu ciničitého. Tato skla se využívají k ochraně před slunečním zářením především v letním období. Skla Stopsol bronz fungují na principu odrazu viditelné složky spektra v kombinaci s absorpcí skla probarveného ve hmotě během tavícího procesu. Pyrolytický povlak je nanášen v průběhu procesu výroby plochého skla float a získaná vrstva je velmi odolná vůči mechanickému poškození i klimatickým vlivům. To umožňuje využití skel Stopsol bronz pro monolitické zasklení [38,50].

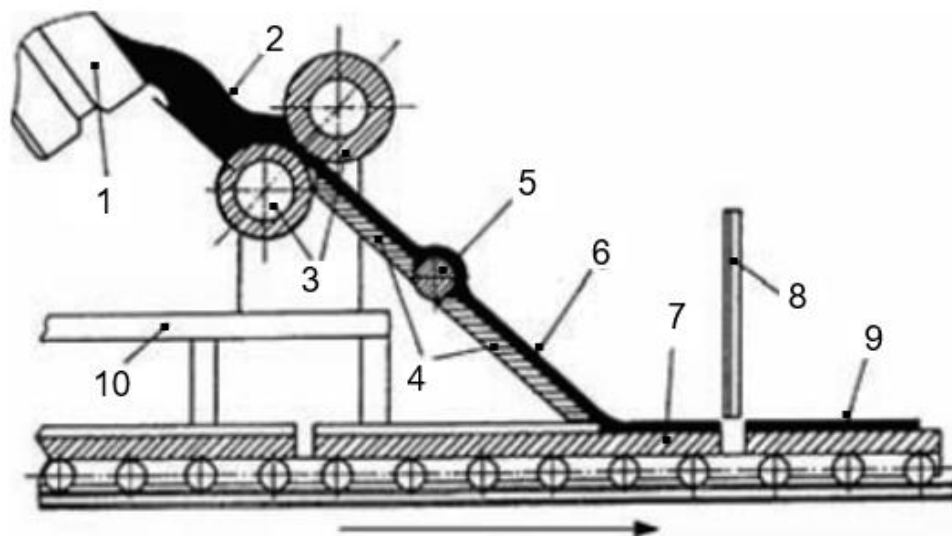


Obr. 14 Schéma vytváření pyrolytického povlaku

1 – nanášení pomocí spreje; 2 – nanášení metodou CVD [50]

Činčila čirá, Kůra čirá

Skla Činčila a Kůra jsou ornamentní, vzorovaná skla, opatřená dekorem na jedné ploše. Ornamentní skla se vyrábí litím skloviny mezi dva válce. Dekor se vytváří v průběhu tvarování otiskem upraveného povrchu tvarovacího válce do povrchu skla [50].



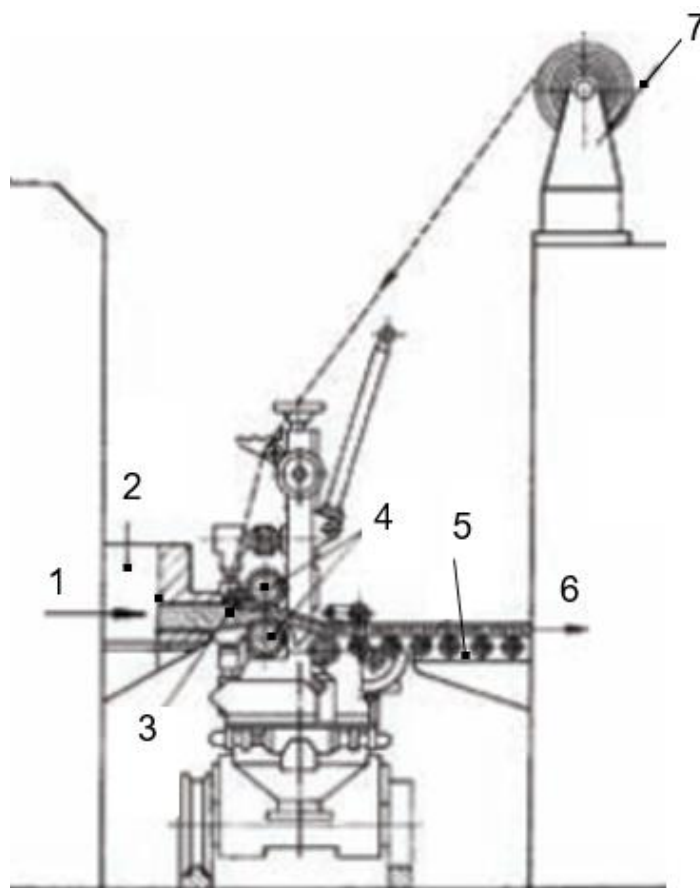
Obr. 15 Přeřezané lití skla způsobem Bicheroux [50]

Na obr. 15 jsou podle jednotlivých pozic znázorněny následující části zařízení a výrobního procesu: pánev (1); sklovina (2); tvarovací válce (3); vodou chlazený skluz (4); pomocný válec (5); vytvarovaný pás skla (6); transportní stůl (7); nůžky (8); odříznutá tabule skla (9); pracovní plošina (10).

Drátěné sklo

Drátěné sklo se po případném rozbití nevysype, ale zůstává pohromadě díky pomocnému materiálu ve formě drátu uvnitř skla. Důležitou výhodou tohoto bezpečnostního skla je schopnost zpomalit šíření plamenů. Vyrábí se litím skloviny mezi válce, do níž je v průběhu tvarování zalisována drátěná vložka v podobě pravoúhlé, čtvercové mřížky [38,50].

Proces výroby drátěného skla je popsán na obr. 16. Sklovina přitéká z vanové pece žlabem (2) mezi líčí válce (4). Válec (3) zatlačuje drátěnou vložku do skloviny. Skleněný pás je následně veden přes válečkovou dráhu (5) do chladičí pece (6). Zásobník (7) je naplněn drátěným pletivem [50].



Obr. 16 Licí stroj pro výrobu drátěného skla [50]

Vrstvené bezpečnostní sklo

Bezpečnostní vrstvené sklo (viz obr. 17) je tvořeno dvěma skleněnými tabulkami, spojenými houževnatou a pružnou mezivrstvou ve formě polyvinylbutyralové fólie (PVB), která je vysoce odolná proti roztržení. Při poškození vrstveného bezpečnostního skla je většina úlomků zachycena na fólii [38,50,51,52].

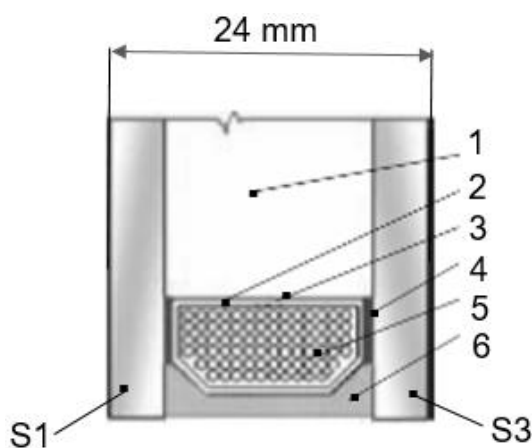


Obr. 17 Vrstvené bezpečnostní sklo poškozené úderem [52]

Dvojsklo

Dvojsklo bylo tvořeno dvěma tabulkami skla, jejichž vzdálenost byla vymezena distančním rámečkem. První tabulka byla z čirého skla Float tloušťky 4 mm, druhá tabulka byla z nízkoemisního skla LowE. Celková tloušťka izolačního dvojskla činila 24 mm.

Složení zkoumaného dvojskla je znázorněno na obr. 18. Podle jednotlivých pozic jsou znázorněny následující části dvojskla: sklo Float tl. 4 mm (S1); sklo s měkkým pokovením LowE (S3); vzduchová mezera (1); distanční profil (2); perforace (3); primární tmel (4); vysoušedlo (5); sekundární (vnější) tmel (6) [50].

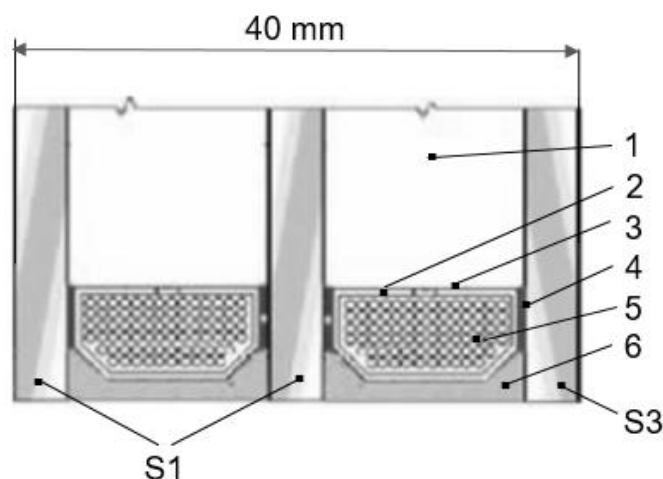


Obr. 18 Zkoumané dvojsklo a jeho složení

Trojsklo

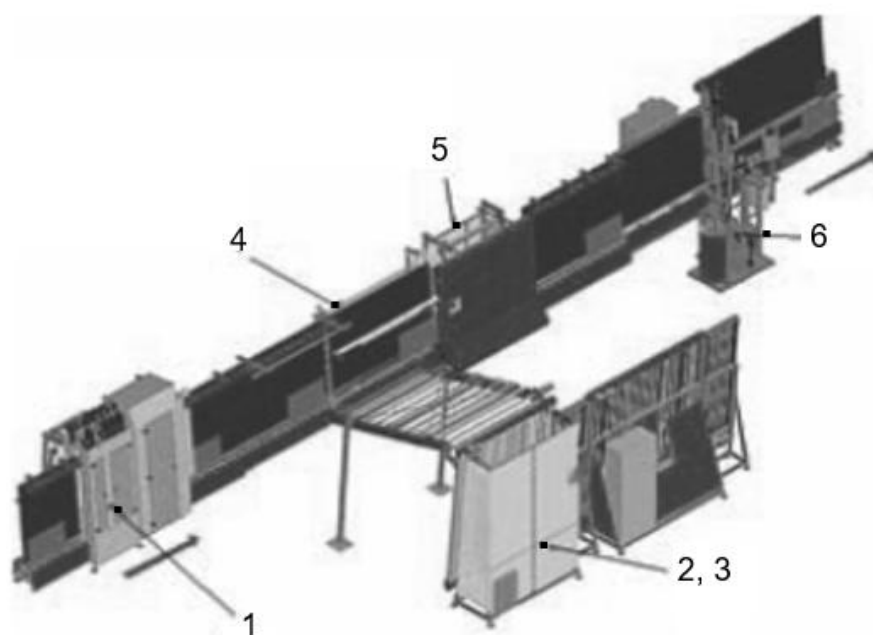
Zkoumané trojsklo bylo tvořeno třemi tabulkami skla oddělenými dvěma distančními rámečky. První dvě tabulky byly z čirého skla Float tl. 4 mm. Třetí tabulka byla z nízkoemisního skla LowE.

Celková tloušťka izolačního trojskla činila 40 mm. Složení zkoumaného dvojskla je znázorněno na obr. 19. Podle jednotlivých pozic jsou znázorněny následující části trojskla: Sklo Float tl. 4 mm (S1); Sklo s měkkým pokovením LowE (S3); vzduchová mezera (1); distanční profil (2); perforace (3); primární tmel (4); vysoušedlo (5); sekundární (vnější) tmel (6) [50].



Obr. 19 Zkoumané trojsklo a jeho složení

Schéma linky na výrobu izolačních dvojskel a trojskel je na obr. 20. Podle jednotlivých pozic jsou znázorněny následující části zařízení a výrobního procesu: myčka (1); montáž distančního profilu (2,3); automatická montáž (4); lisování (5); dávkovač plastického tmelu (6) [50].



Obr. 20 Schéma linky na výrobu izolačních skel

První operací na lince je mytí skel v myčce. Aby nedošlo k poškození měkce pokovené vrstvy skla, jsou při mytí používány speciální kartáče. Po umytí a osušení skel demineralizovanou vodou jsou v následující sekci skla připravena ke skládání. K přichycení distančního profilu ke sklu se používá vrstva

polyizobutylenu, která po zahřátí dobře přilne ke spojovanému sklu. Po počátečním lehkém přitisknutí musí být provedeno důkladné rozlisování tmele. Tím je vytvořeno plynotěsné spojení po obvodu dvojskla či trojskla. Následuje nanesení vnější vrstvy tmele nejčastěji na bázi polyuretanu, silikonu nebo polysulfidu, což zajistí mechanickou stabilitu a zabraňuje pronikání vlhkosti do prostoru mezi skly [50].

4.2.2 Kompozity plněné ovčí vlnou

Kompozitní materiály jsou surovinou, tzv. stavebním prvkem, skládajícím se z určitého množství vyztužujících vláken, orientovaných přednostně v určitých směrech, a matrice neboli pojiva. Kompozit ve tvaru plošného výrobku z jednotlivých vrstev, který vzniká spojením vláken a pryskyřice nezávisle na formě konstrukčního prvku nebo stavu výroby se nazývá laminát, z latinského výrazu lamina = vrstva. Podle orientace vláken rozeznáváme lamináty jednosměrné, jež obsahují vyztužující vlákna orientovaná pouze v jednom směru nebo vícevrstvé, což je kompozitní vrstva skládající se z rozdílných nebo různě orientovaných vrstev [53].

Vlákna

Vlákna se podle délky dělí na krátká s délkou od 0,1 mm do 5 mm a vlákna dlouhá od délky 5 mm. Využívají se jak vlákna přírodního, tak chemického původu. Výhodou přírodních vláken je obnovitelnost, což platí jak pro vlákna rostlinná, tak i živočišná. Mezi živočišná vlákna patří ovčí vlna, srst kašmírské kozy (kašmír) nebo hedvábí [53].

Vlastnosti ovčí vlny a její praktické využití

Široce rozšířené je využití ovčí vlny v textilní výrobě, pro kterou jsou však vybírána jen ta nejkvalitnější vlákna, méně kvalitní vlákna bývají chovateli likvidována. Nekvalitní ovčí vlnu lze přitom použít jako izolační materiál pro zateplení pláštěů budov. Ve stavebnictví je ovčí vlna využívána pro velmi dobré izolační vlastnosti, navíc vyniká nehořlavostí, je samozhášivá a při teplotě nad 560 °C se pouze škvaří a doutná. [54].

Srovnání tepelně izolačních vlastností používaných materiálů je v tab. 5. Platí, že čím je součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$] nižší, tím lepší jsou tepelně izolační vlastnosti materiálu [55].

Tab. 5 Tepelně izolační vlastnosti přírodních a polymerních materiálů [55]

Materiál	λ [$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$]
Ovčí vlna	0,04
Sláma	0,052 až 0,08
Konopí	0,035 až 0,05
Dřevovláknité desky	0,038 až 0,05
Skelná vata	0,030 až 0,035
Minerální vlna	0,035 až 0,042
Pěnové sklo	0,041 až 0,048
Pěnový polyuretan PUR	0,03
Extrudovaný polystyren	0,034
Šedý polystyren	0,033
Pěnový polystyren - EPS	0,035 až 0,04

4.2.3 Technologie 3D tisku

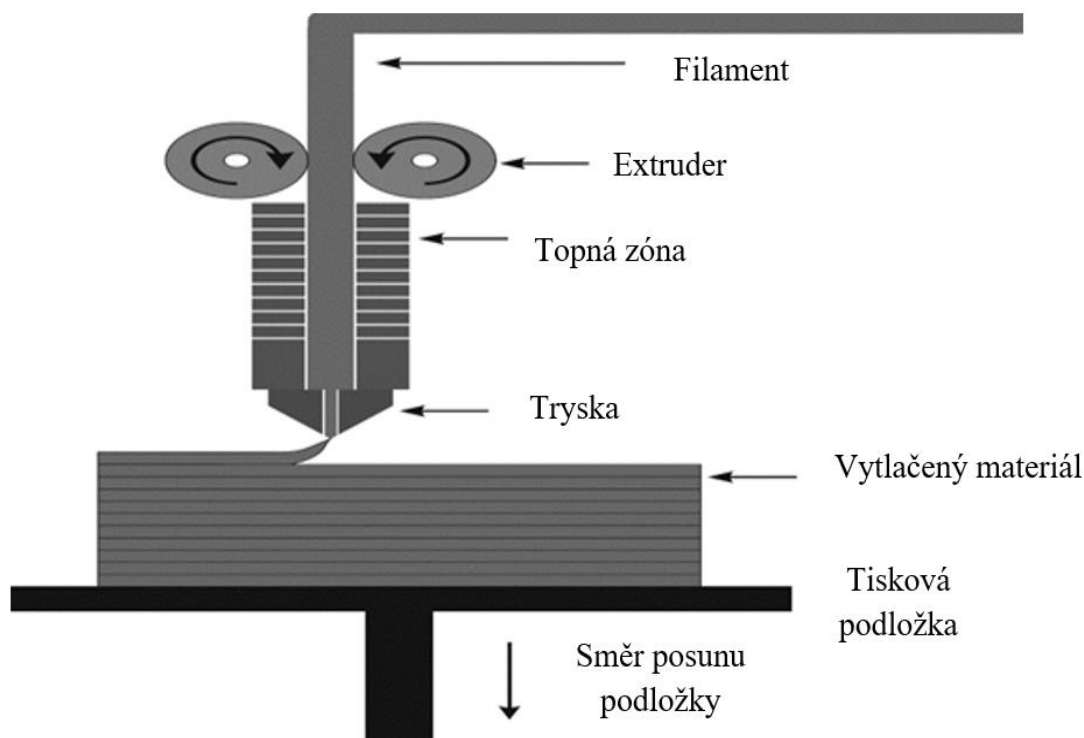
Aditivní technologie, známá též pod pojmem 3D tisk, představuje inovativní přístup k výrobě objektů. Na rozdíl od tradičních způsobů obrábění, které jsou typické odebráním materiálu z polotovaru, aditivní technologie funguje na principu postupného nanášení vrstev materiálu a vytváření objektu podle dat z digitálního modelu. Aditivní technologie umožňuje tvořit složité a organické tvary, které vedou k efektivnějším strukturám snižující hmotnost výsledného objektu při zachování mechanických vlastností a odolnosti. Mezi další výhody aditivní technologie patří rychlost výroby prototypů. Pro výrobu prototypů mohou být tradiční metody časově náročné a hlavně nákladné. 3D tisk umožňuje téměř okamžité získání fyzického prototypu, což výrazně zkracuje vývojový cyklus a umožňuje rychlou adaptaci [56].

Mezi nejpoužívanější technologie aditivní výroby patří stereolitografie (SLA), modelování tavené depozice (FDM), selektivní laserové sinterování (SLS) a digitální zpracování světla (DLP).

FDM

Fused Deposition Modeling (FDM) je cenově dostupnou technologií 3D tisku, vhodnou pro tvorbu prototypových a malosériových dílů. FDM je metoda postupného pokládání roztaveného materiálu, která využívá termoplastický

filament, jenž se roztaví a vytlačí tryskou do požadovaného tvaru a dokončí objekt vrstvu po vrstvě. Po vytlačení tryskou se materiál pokládá nejdříve na tiskovou podložku, která může být i vyhřívána. Na tiskové podložce materiál dále tuhne na okolní teplotu. V další vrstvě se už materiál pokládá na vrstvu předchozí [57].



Obr. 21 Schéma technologie FDM [57]

Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny zejména nastavením procesních parametrů jako je šířka a výška vrstvy, orientace modelu a rychlost tisku. FDM je nejrozšířenější technologií 3D tisku díky své poměrně nízké ceně a snadnému použití. Ve srovnání s ostatními technologiemi však mají díly z FDM nižší rozlišení a kvalitu povrchu. Technologie FDM se běžně používá ve výrobě předmětů pro domácnost, prototypů a přípravků na podporu výroby [57].

PETG

Polyethylentereftalát glykol (PETG) je termoplastický polyester. Tento materiál je pro technologii FDM velmi často používán, což umožňuje úprava výchozího polyethylentereftalátu PET, usnadňující zpracování technologií 3D tisku. PETG je modifikovanou formou PET, do níž se během polymerace přidává glykol a vytváří se tak nepravidelná molekulární struktura. Tato modifikace zabraňuje krystalizačním efektům a tím zlepšuje zpracovatelnost materiálu. Díky tomu se tiskne snadněji než s PET [58-60].

Chemická struktura PETG je podobná struktuře PET a skládá se z opakujících se jednotek kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Přídavek dalšího glykolu, obvykle cyklohexadienmethanolu (CHDM), vede k ještě amorfnější struktuře s nižším bodem tání a lepší houževnatostí [60].

Pro své dobré mechanické vlastnosti, dobrou zpracovatelnost a dostupnost je PETG vhodný jak pro funkční prototypy, tak pro mechanicky namáhané díly [58,61].

PLA

Polylactic Acid, kyselina polylactonová (PLA), je biologicky odbouratelný a obnovitelný termoplast, který je vyroben z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny. V technologii FDM je hojně využíván pro jeho nízkou cenu, snadné použití a šetrnost k životnímu prostředí. Výhodou je také skutečnost, že jej lze tisknout při poměrně nízkých teplotách 190–220 °C a při nižší teplotě tiskové podložky 50–60 °C [62-64].

PLA má relativně nízkou viskozitu, což usnadňuje vytlačování taveniny tryskou FDM tiskárny, avšak příliš nízká viskozita může vést k problémům jako je tzv. stringování (odkapávání), kdy zůstávají na vytištěném modelu drobné nitky filamentu, nebo ke špatné přilnavosti vrstev. Reologické chování filamentů na bázi PLA je však možné upravit přidáním plniv nebo změkčovadel [62-64].

Díky své biologické rozložitelnosti, nízké toxicitě a snadnému zpracování je PLA vhodným materiálem pro výrobu hraček a předmětů pro domácnost [63].

PMMA

Polymethylmethakrylát (PMMA) poměrně výrazně absorbuje vodu, což ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti při používání a činí tento materiál náchylným k selhání při cyklickém zatížení. Molekuly vody také působí jako změkčovadlo. Navíc molekuly proniklé vody vedou k expanzi PMMA, což ovlivňuje rozměrovou stabilitu [65-68].

Absorpce vody skrze FDM 3D tisk je výrazně vyšší než při jiných technologických procesech, takže se tištěný rozměr liší od referenčních hodnot. Problém hydrolyzy PMMA je řešen optimalizačním procesem při sušení filamentů a realizací během příznivých klimatických podmínek, přičemž je vhodné preferovat tisk během nejteplejších měsíců [69-73].

5. VÝROBA A PŘÍPRAVA TESTOVANÝCH VZORKŮ

Pro účely testování světelných vlastností byly použity vzorky z rozdílných materiálů, vyráběné odlišnou technologií výroby. Jednalo se o vzorky skleněné, polymery zhotovené technologií 3D tisku a kompozity plněné ovčí vlnou.

5.1 Skleněné vzorky pro měření prostupu světla

V této studii bylo hodnoceno celkem 12 vzorků světelně aktivního skla lišících se tloušťkou, tvarem povrchu, počtem vrstev skel atd. Jednotlivé druhy skla a technologie jejich výroby jsou popsány v kapitole 4.2.1. Skleněné vzorky pro měření prostupu světla měly rozměry 250 mm × 250 mm. Přehled vzorků, jejich označení, popis, celková tloušťka a počet jednotlivých skel v daných zasklívacích jednotkách jsou uvedeny v tab. 6.

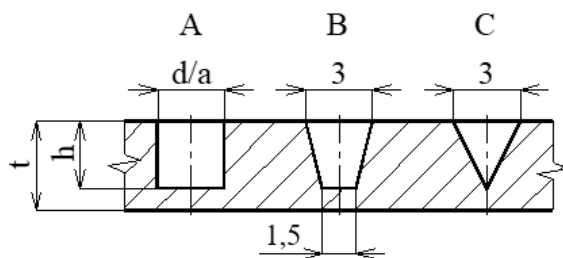
Tab. 6 Specifikace zkoumaných vzorků skla

Označení vzorků	Název vzorku	Tloušťka (mm)	Počet skel [ks]
S1	Základní ploché sklo Float	4	1
S2	Základní ploché sklo Float	6	1
S3	Sklo s nízkou emisivitou LowE	3,8	1
S4	Reflexní bronzové sklo Stopsol	3,8	1
S5	Reflexní bronzové sklo Stopsol	5,9	1
S6	Dekoratívni sklo s činčilou čirou	3,8	1
S7	Dekoratívni sklo s kůrou čirou	4,0	1
S8	Drátěné sklo	6,0	1
S9	Vrstvené bezpečnostní sklo VSG 33.1	6,1	1
S10	Vrstvené bezpečnostní sklo VSG 33.2	6,6	1
S11	Dvojsklo	24	2
S12	Trojsklo	40	3

5.2 Polymerní vzorky pro měření světelné pohltivosti

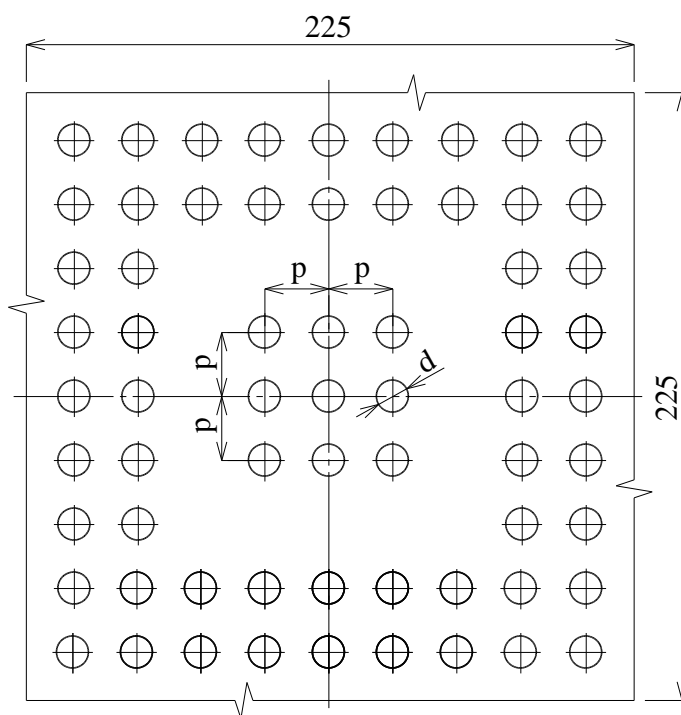
Absorpce světla byla zkoumána na 3D tištěných vzorcích z materiálu PET-G. Vzorky byly navrženy pomocí CAD softwaru SolidWorks 2015. Následně byly vytištěny na tiskárně Creality CR-5 PRO založené na technologii FDM (Fused Deposition modelling).

Proces tisku byl prováděn při teplotě přibližně $T = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ a rychlosti tisku $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Vzorky byly vyrobeny s různým počtem, tvarem a velikostí povrchových otvorů.



Obr. 22 Zkoumané tvary otvorů (jejich řezy): A – válec/hranol, B - komolý kužel/komolý čtvercový jehlan, C – kužel/čtvercový jehlan

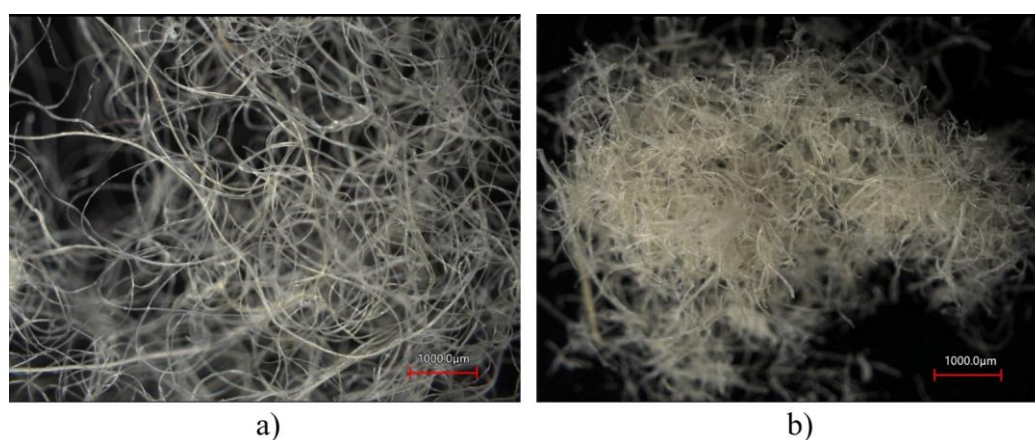
Otvory byly vyrobeny s různými charakteristickými velikostmi d nebo a (tj. 1,5 a 3 mm), hloubky h (tj. 1,5 a 3 mm), rozteče p (tj. 6 a 12 mm) a tvary. Pro účely hodnocení světelných absorpčních vlastností byly technologií 3D tisku vyrobeny čtvercové desky o tloušťce $t = 4 \text{ mm}$ a straně 225 mm.



Obr. 23 Rozměry vzorků s kruhovými otvory pro experimentální měření vlastností absorpce světla

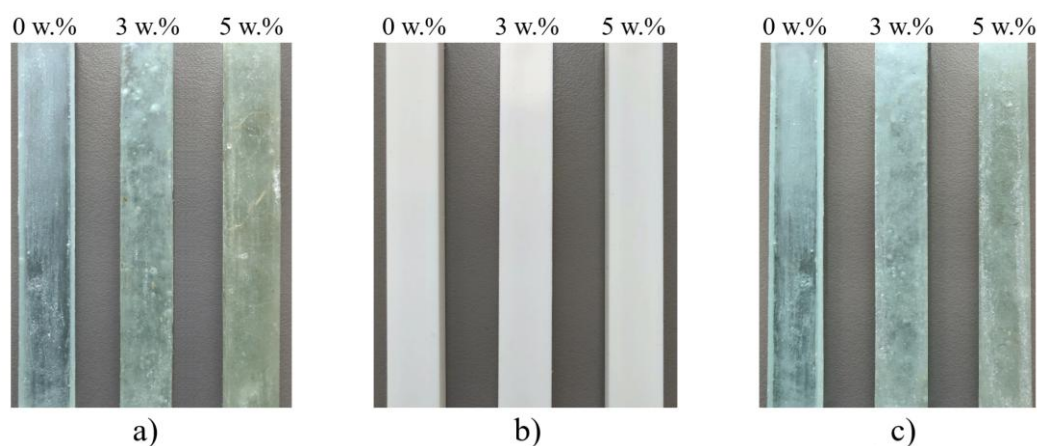
5.3 Kompozity plněné ovčí vlnou pro měření prostupu světla

Jako primární materiál pro výrobu kompozitů polymer/ovčí vlna byl použit izolační pás z ovčího rouna Naturwool A500/P100 od společnosti Naturwool Ltd. (Praha, Česká republika). Izolační pás z ovčího rouna se zpočátku stříhal na menší díly pomocí nůžek. Poté byla ovčí vlákna rozemleta průchodem přes síta o velikosti 3 mm a 1 mm pomocí univerzálního řezacího mlýnu PULVERISETT 19 (FRITSCH GmbH - Milling and Sizing, Weimar, Německo). Struktura ovčích vláken před a po procesu mletí byla hodnocena pomocí laserového skenovacího mikroskopu VK-X3000 (LSM, Keyence Corp., Japonsko), jak je znázorněno na obrázku 24. Bylo zjištěno, že průměr vlákna d byl v rozmezí $(15,9 \div 39,5) \mu\text{m}$.



Obr. 24 Mikroskopické struktury vláken ovčí vlny: (a) před procesem mletí; (b) po procesu mletí

Takto zpracovaná ovčí vlna byla následně použita k výrobě kompozitních materiálů polymer/ovčí vlna. Tři různé pryskyřice, jmenovitě epoxidové (EP), polyuretanové (PU) a polyesterové (PES) pryskyřice, byly v této studii naplněny různými hmotnostními koncentracemi ovčí vlny až do 5 hmotn. %. Příklady zkoumaných vzorků jsou na obr. 25. Protože PU vzorky nejsou průhledné, byly z hlediska propustnosti světla experimentálně hodnoceny pouze vzorky EP a PES. Orientace plniva v polymerních maticích byla náhodná a byla provedena ručně. U studovaných vzorků byla během procesu vytvrzování pozorována tvorba zesíťovaných struktur, přičemž plnivo na bázi ovčí vlny bylo dobře dispergováno v polymerní matici. Proces vytvrzování zahrnoval přidání příslušného tvrdidla do pryskyřice podle doporučení výrobce společností Dawex Chemical Ltd. (Praha, Česká republika).



Obr. 25 Fotografie zkoumaných vzorků polymerů s různými koncentracemi ovčí vlny W_r (v hmotn. %): (a) EP vzorky; (b) PU vzorky; (c) PES vzorky

Vzorky pro měření prostupu světla měly rozměry 60 mm × 60 mm × 4 mm (délka × šířka × tloušťka). Tyto polymerní kompozity vyztužené ovčí vlnou lze v praxi využít jako lehké, ohnivzdorné, ekologické a biologicky rozložitelné materiály.

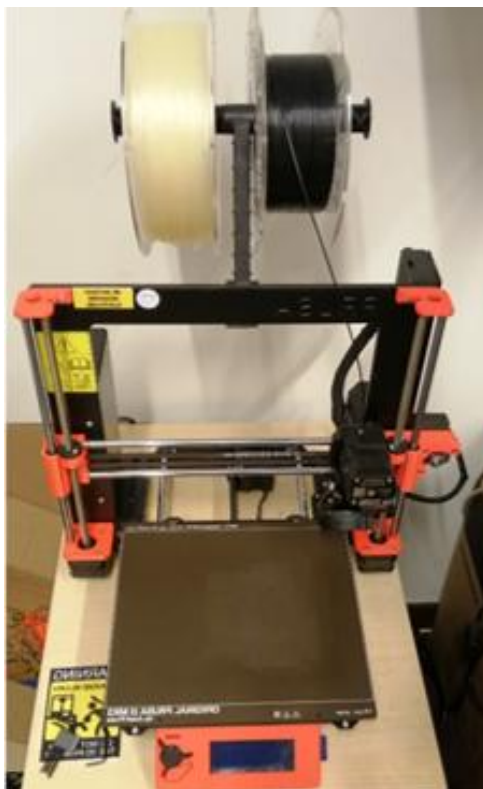
5.4 Polymerní vzorky pro výzkum vlivu parametrů 3D tisku

Pro výrobu 3D tištěných vzorků za účelem zkoumání vlivu nastavených parametrů na fyzikální a mechanické vlastnosti vzorků byly použity filamenty z materiálů polylactic Acid, kyselina polymléčná (PLA), polymethylmethakrylát (PMMA), oba od výrobce REGSHARE s.r.o., Horní Počaply, Česká republika. Filament z polymeru polyethylentereftalát glykol (PETG) byl od výrobce Spectrum Group s.r.o., Polsko. V tab. 7 jsou uvedeny základní parametry použitých filamentů, které vycházejí z katalogového listu výrobce. Jmenovitě se jedná o průměr filamentu d , Youngův modul pružnosti E , hustotu ρ , teplotu tisku T_1 a teplotu podložky T_2 .

Tab. 7 Filamenty použité pro výrobu 3D tištěných vzorků

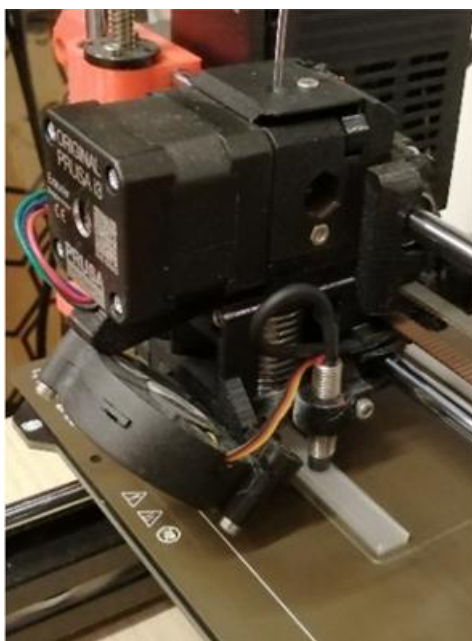
Parametr	Materiál		
	PLA	PMMA	PETG
d (mm)	1,75	1,75	1,75
E (GPa)	3,60	1,80	1,95
ρ (g·cm ⁻³)	1,24	1,19	1,27
T_1 (°C)	205 ÷ 225	225 ÷ 250	230 ÷ 255
T_2 (°C)	40 ÷ 60	80 ÷ 115	60 ÷ 85

Výroba vzorků byla realizována technologií FDM na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3 (Prusa Research a.s., Praha, Česká republika) viz obr. 26.



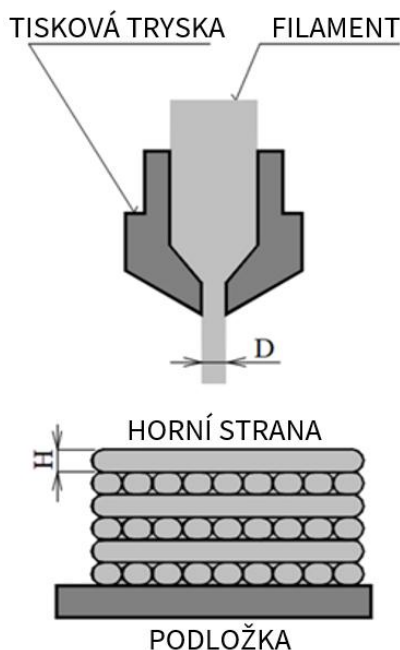
Obr. 26 Fotografie 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3

Detailní pohled na průběh výroby vzorku na 3D tiskárně je znázorněn na obr. 27.



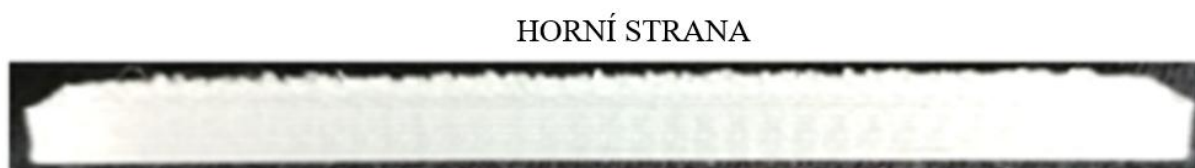
Obr. 27 Pohled na výrobu vzorku na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3

Při výrobě vzorků 3D tiskem byly jednotlivé vrstvy ukládány střídavě, takže každá nanášená vrstva byla pootočená o 90 stupňů vzhledem k předchozí vrstvě. Tímto způsobem byl vytvořen křížový vzor, který je znázorněn na obr. 28.



Obr. 28 Schéma nanášení vrstev během výroby vzorků 3D tiskem

Horní strana vyrobených vzorků vykazovala výrazně větší povrchové nepravidelnosti ve srovnání se spodní stranou. Fotografie 3D tištěného vzorku je na obr. 29.



Obr. 29 Vzorek polymeru vyrobený na 3D tiskárně

K výrobě vzorků byly použity dva různé průměry trysek $D = (0,8 \text{ mm a } 0,4 \text{ mm})$ a dvě různé výšky vrstev $H = (0,4 \text{ mm a } 0,2 \text{ mm})$. U vzorků vyrobených tryskou o průměru $D = 0,4 \text{ mm}$ byly navíc použity dvě různé teploty tisku T_1 . Celkový přehled vyrobených vzorků včetně nastavených parametrů při procesu 3D tisku jsou uvedeny v tabulce 8. Teplota s označením T_2 je teplota podložky.

Tab. 8 Označení a parametry vzorků 3D tištěných polymerů

Označení vzorku	Parametr			
	D [mm]	H [mm]	T_1 [°C]	T_2 [°C]
PLA 0,8/0,4/215	0,8	0,4	215	60
PLA 0,8/0,2/215	0,8	0,2	215	60
PLA 0,4/0,2/215	0,4	0,2	215	60
PLA 0,4/0,2/235	0,4	0,2	235	60
PMMA 0,8/0,4/240	0,8	0,4	240	85
PMMA 0,8/0,2/240	0,8	0,2	240	85
PMMA 0,4/0,2/240	0,4	0,2	240	85
PMMA 0,4/0,2/260	0,4	0,2	260	85
PETG 0,8/0,4/240	0,8	0,4	240	85
PETG 0,8/0,2/240	0,8	0,2	240	85
PETG 0,4/0,2/240	0,4	0,2	240	85
PETG 0,4/0,2/260	0,4	0,2	260	85

Průměr trysky $D = 0,4$ mm byl při výrobě vzorků zvolen jako průměr výchozí, protože se jedná o nejčastěji používanou velikost trysky mezi uživateli, a to především z důvodu přijatelného kompromisu mezi přesností a dobou tisku [74,75]. Následně byl zvolen průměr trysky $D = 0,8$ mm jako varianta pro rychlejší 3D tisk.

V technologii FDM 3D tisku se obvykle používá výšky vrstev v rozmezí $H = (0,1 \text{ až } 0,4)$ mm [76,77]. Použitá výška vrstvy $H = 0,2$ mm je doporučeným standardem pro FDM 3D tisk vzhledem k optimálnímu poměru mezi efektivitou tisku a dosahovanou kvalitou [78,79]. Výška vrstvy $H = 0,4$ mm je variantou určenou k urychlení procesu 3D tisku.

Na základě doporučení výrobce byla pro každý typ polymeru použita výchozí teplota tisku T_1 [°C] uvedená v tabulce 8. Pro zjištění vlivu zvýšení teploty na vlastnosti 3D tisku byla jako varianta zvolena teplota tisku vždy o 20 °C vyšší, než byla teplota výchozí. Záměrem bylo tedy sledovat, jak se zvýšení teploty a s tím související snížení viskozity a zvýšení tekutosti projeví na různých vlastnostech materiálu, včetně jeho světelné propustnosti.

6. METODY TESTOVÁNÍ A JEJICH VÝSLEDKY

Tato kapitola obsahuje především výsledky výzkumné části jednotlivých prací zaměřených na světelně technické vlastnosti zkoumaných materiálů. Jsou zde zároveň popsány také použité přístroje, metodika testování či simulací a spolu s výsledky jsou zde uvedeny i jejich interpretace.

6.1 Studie absorpce světla 3D tištěných vzorků

Vlastnosti absorpce světla studovaných 3D tištěných PETG vzorků byly zkoumány podle normy [ČSN 360001-1 2006]. Zkoumané vzorky byly podrobně popsány již v kapitole 5.2.

6.1.1 Přístroj pro měření absorpce světla

K měření osvětlenosti byl použit digitální přístroj Voltcraft MS-1300 s externím optickým snímačem (viz obr. 30). Osvětlenost je snímána selenovým čidlem a měřené hodnoty se zobrazují přímo na displeji přístroje.



Obr. 30 Digitální luxmetr MS-1300

Podle údajů uvedených výrobcem činí měřicí rozsah 0,1 až 50 000 lx. Přepínač umožňuje nastavení čtyř úrovní měřicího rozsahu. Rozlišitelnost měřidla souvisí s měřicím rozsahem následovně: Měřicímu rozsahu 0,1 až 200 lx odpovídá rozlišitelnost 0,1 lx, měřicímu rozsahu 200 až 2000 lx odpovídá rozlišitelnost 1 lx, měřicímu rozsahu 2000 až 20000 lx odpovídá rozlišitelnost 10 lx, měřicímu rozsahu 20000 až 50000 lx odpovídá rozlišitelnost 100 lx. Dále výrobce uvádí přesnost měření $\pm 5\%$.

6.1.2 Princip měření absorpce světla

V prvním kroku bylo realizováno měření činitele odrazu světla na základě poměru osvětleností. Luxmetrem byla nejprve změřena osvětlenost daného povrchu E_1 [lx], následně byla za stejných podmínek změřena osvětlenost E_2 [lx] a to s čidlem luxmetru obráceným ke zkoumanému povrchu. Hodnota činitele odrazu světla ρ [-] se stanoví z poměru obou naměřených osvětleností:

$$\rho = \frac{E_2}{E_1} \quad (12)$$

Čidlo luxmetru musí být při tomto měření umístěno tak, aby nestínilo zkoumaný povrch a zároveň aby na samotné čidlo nedopadalo světlo z jiných světelných zdrojů. Osvětlenost E_2 se proto měří ve vzdálenosti alespoň pětinásobku průměru měřící hlavice [42].

Experimentální měření obou osvětleností pro každý povrch vzorku byla provedena dvacetkrát, a to za rozptýleného denního světla (tj. bez umělých zdrojů osvětlení).

Absorpce světla α [-] pro zkoumané neprůsvitné materiály byla následně určena ze vzorce:

$$\alpha = 1 - \rho \quad (13)$$

Nakonec byly vyhodnoceny aritmetické průměry a směrodatné odchylky absorpce pro každý ze zkoumaných 3D-tištěných vzorků.

6.1.3 Výsledky měření absorpce světla

V tab. 9 a 10 jsou zaznamenány získané výsledky, které zohledňují různé faktory ovlivňující absorpci světla α [-] zkoumaných 3D tištěných vzorků a jsou porovnány s úplným 3D tištěným PETG vzorkem (F).

Tab. 9 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků s kruhovými otvory

Typ otvoru	d [mm]	p [mm]	h [mm]	α [-]
A	1,5	6	1,5	$0,535 \pm 0,013$
			3,0	$0,540 \pm 0,017$
		12	1,5	$0,524 \pm 0,009$
			3,0	$0,527 \pm 0,012$
	3,0	6	1,5	$0,547 \pm 0,025$
			3,0	$0,549 \pm 0,016$
		12	1,5	$0,534 \pm 0,011$
			3,0	$0,536 \pm 0,018$
B	3,0	6	1,5	$0,541 \pm 0,023$
			3,0	$0,547 \pm 0,019$
		12	1,5	$0,536 \pm 0,020$
			3,0	$0,540 \pm 0,015$
C	3,0	6	1,5	$0,541 \pm 0,017$
			3,0	$0,543 \pm 0,012$
		12	1,5	$0,536 \pm 0,015$
			3,0	$0,539 \pm 0,018$
F	–	–	–	$0,505 \pm 0,019$

Z tab. 9 a 10 je zřejmé, že nejnižší vlastnosti absorpce světla (nebo minimální pohltivosti) byly zjištěny u vzorku z materiálu PETG s hladkým povrchem (tj. bez povrchových otvorů). Naopak maximální absorpce byla zjištěna u vzorku PETG, který byl vyroben s maximálním počtem čtvercových otvorů (tj. $p = 6$ mm) a maximálními rozměry otvorů (tj. $a = h = 3$ mm). To znamená, že se vzorky obsahující otvory vyznačují vyšší schopností absorbovat světlo ve srovnání s plným, hladkým 3D tištěným PETG vzorkem (F). Je to způsobeno vícenásobnými odrazy světla, kdy se světlo šíří uvnitř otvorů a je doprovázeno vyšší přeměnou dopadající světelné energie na teplo. Pohltivost světla se obecně zvyšovala s rostoucím počtem povrchových otvorů (tj. $p = 6$ mm) a jejich rozměrů (tj. $a = d = h = 3$ mm). Další faktory, jako je tvar (tj. čtvercový nebo kruhový) a typ (tj. typ A, B nebo C) otvorů, byly z hlediska absorpce světla zanedbatelné.

Tab. 10 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků se čtvercovými otvory

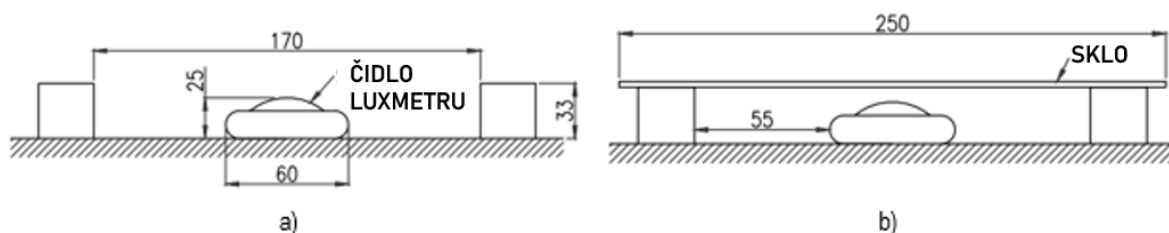
Typ otvoru	a [mm]	p [mm]	h [mm]	α [-]
A	1,5	6	1,5	$0,540 \pm 0,017$
			3,0	$0,542 \pm 0,013$
		12	1,5	$0,532 \pm 0,012$
			3,0	$0,537 \pm 0,019$
	3,0	6	1,5	$0,543 \pm 0,020$
			3,0	$0,545 \pm 0,024$
		12	1,5	$0,538 \pm 0,018$
			3,0	$0,540 \pm 0,023$
B	3,0	6	1,5	$0,541 \pm 0,016$
			3,0	$0,550 \pm 0,027$
		12	1,5	$0,532 \pm 0,018$
			3,0	$0,540 \pm 0,017$
C	3,0	6	1,5	$0,536 \pm 0,026$
			3,0	$0,544 \pm 0,017$
		12	1,5	$0,530 \pm 0,025$
			3,0	$0,533 \pm 0,021$
F	–	–	–	$0,505 \pm 0,019$

6.2 Studie prostupu světla skleněnými vzorky

K měření byl opět použit digitální luxmetr Voltcraft MS-1300, který byl podrobně popsán již v kapitole 6.1.1. Postup výroby jednotlivých skel byl popsán v kapitole 4.2.1. Vzorky pro měření prostupu světla byly nařezány z tabulí těchto skel a měly rozměry 250 mm × 250 mm. Přehled zkoumaných skleněných vzorků byl uveden v kapitole 5.1. v tabulce 6.

6.2.1 Princip měření světelné propustnosti skla

Vlastnosti prostupu světla světelně aktivních materiálů jsou vyjádřeny činitelem prostupu světla τ [-], který byl stanoven dle normy ČSN 36 0011-2. Jak je znázorněno na obr. 31, nejprve byla pomocí luxmetru změřena intenzita dopadajícího světla (osvětlenost) bez vloženého skla E_i [lx] a poté byla změřena intenzita světla s vloženým vzorkem skla E_r [lx].



Obr. 31 Princip měření propustnosti světla skleněných vzorků na základě intenzity dopadajícího světla (a) a intenzity světla za zkoušeným vzorkem skla (b)

Hodnota činitele prostupu světla je rovna podílu obou naměřených osvětleností:

$$\tau = \frac{E_{\tau}}{E_i} \quad (14)$$

Za účelem získání co nejpřesnějších hodnot činitele propustnosti světla byla měření prováděna ve stínu v letních měsících, za jasné oblohy. Vzorky byly zbaveny nečistot. Každé měření se opakovalo desetkrát při okolní teplotě 28 °C. Následně byly vyhodnoceny aritmetické průměry koeficientu propustnosti světla a nejistoty měření.

6.2.2 Výsledky měření propustnosti světla testovaných skel

Získané údaje (viz tab. 11) potvrdily teoretické předpoklady, že činitel prostupu světla τ [–] klesá s těmito faktory:

- s rostoucí tloušťkou materiálu
- se vzrůstajícím počtem zasklívacích jednotek
- s nerovností povrchu materiálu
- s rostoucím zatmavením povrchu

Lze konstatovat, že nejlepší vlastnosti propustnosti světla vykazoval nejtenčí vzorek čirého skla. Silnější skla, ozdobné a bezpečnostní prvky, barevné a metalizované vrstvy, konstrukce z drátěného skla a systémy vícevrstvého zasklení obecně vedly ke snížení propustnosti světla přes zkoumané vzorky skla. Rostoucí tloušťka skla obecně vedla k vyšší absorpci světla a tím také k nižší propustnosti světla přes zkoušené vzorky.

Skla vyrobená s ornamentními a bezpečnostními prvky snižovala propustnost světla jen nepatrně ve srovnání se základními čirými skly.

Tab. 11 Výsledky měření propustnosti světla zkoumaných skel

Označení vzorku	Název vzorku	Tloušťka (mm)	τ [-]
S1	Základní ploché sklo Float	4	0,840 ± 0,001
S2	Základní ploché sklo Float	6	0,823 ± 0,002
S3	Sklo s nízkou emisivitou LowE	3,8	0,762 ± 0,001
S4	Reflexní bronzové sklo Stopsol	3,8	0,238 ± 0,001
S5	Reflexní bronzové sklo Stopsol	5,9	0,185 ± 0,001
S6	Dekoratивní sklo s činčilou čirou	3,8	0,794 ± 0,001
S7	Dekoratивní sklo s kůrou čirou	4,0	0,800 ± 0,001
S8	Drátěné sklo	6,0	0,738 ± 0,002
S9	Vrstvené bezpečnostní sklo VSG 33.1	6,1	0,810 ± 0,002
S10	Vrstvené bezpečnostní sklo VSG 33.2	6,6	0,804 ± 0,001
S11	Dvojsklo	24	0,668 ± 0,001
S12	Trojsklo	40	0,560 ± 0,001

Nižší hodnoty činitele propustnosti světla u vícevrstvých zasklívacích jednotek jsou způsobeny několikanásobnými odrazy světla mezi jednotlivými skleněnými panely, což se projevilo ve vyšší absorpci světla a tím i ve vyšší přeměně světelné energie na teplo. Významnou roli hraje také vrstva stříbra a oxidů kovů nanesená na povrchu skla, což se projevilo již při testování samotného skla LowE.

Nejnižší propustnosti světla byly zjištěny u vzorků reflexních bronzových skel Stopsol v důsledku probarvení a tenké vrstvy oxidu ciničitého na jejich povrchu. Tato potažená a tónovaná skla tedy odrážejí či absorbují většinu dopadající světelné energie, a jsou proto aplikována za účelem ochrany před slunečním zářením během letní sezóny.

6.3 Studie propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou

Experimentální měření prostupu světla testovaných polymerních kompozitů byla provedena pomocí stejné metody dle normy ČSN 36 0011-2 a také pomocí stejného měřicího přístroje digitálního luxmetru Voltcraft MS-1300 jako v případě měření světelné propustnosti lehkého aktivního skla popsané v kapitole 6.2.1. Za účelem získání co nejpřesnějších hodnot koeficientu propustnosti světla byla měření prováděna ve stínu v letních měsících, za jasné oblohy. Každé měření bylo opakováno dvacetkrát při okolní teplotě 25 °C. Následně byly vyhodnoceny aritmetické průměry a směrodatné odchylky koeficientu propustnosti světla.

6.3.1 Výsledky měření propustnosti světla kompozitů plněných ovčí vlnou

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.3, byly vlastnosti prostupu světla experimentálně stanoveny pro polymerní kompozity EP/ovčí vlna a PES/ovčí vlna (viz tab. 12). Veličina W_r [hmotn. %] vyjadřuje hmotnostní koncentraci naplnění vzorků ovčí vlnou.

Tab. 12 Činitel prostupu světla τ [-] kompozitů EP/ovčí vlna a PES/ovčí vlna

Typ materiálu	W_r [hmotn. %]	τ [-]
EP	0	$0,69 \pm 0,03$
	1	$0,60 \pm 0,03$
	2	$0,51 \pm 0,03$
	3	$0,43 \pm 0,02$
	4	$0,41 \pm 0,02$
	5	$0,37 \pm 0,02$
PES	0	$0,72 \pm 0,04$
	1	$0,64 \pm 0,03$
	2	$0,61 \pm 0,03$
	3	$0,58 \pm 0,03$
	4	$0,55 \pm 0,02$
	5	$0,53 \pm 0,03$

Tato studie prokázala, že vlákna ovčí vlny významně snížila propustnost světla testovaných transparentních kompozitů epoxid/ovčí vlna a polyester/ovčí vlna. Prostup světla testovaných polymerních kompozitů významně klesal se zvyšující se koncentrací ovčí vlny.

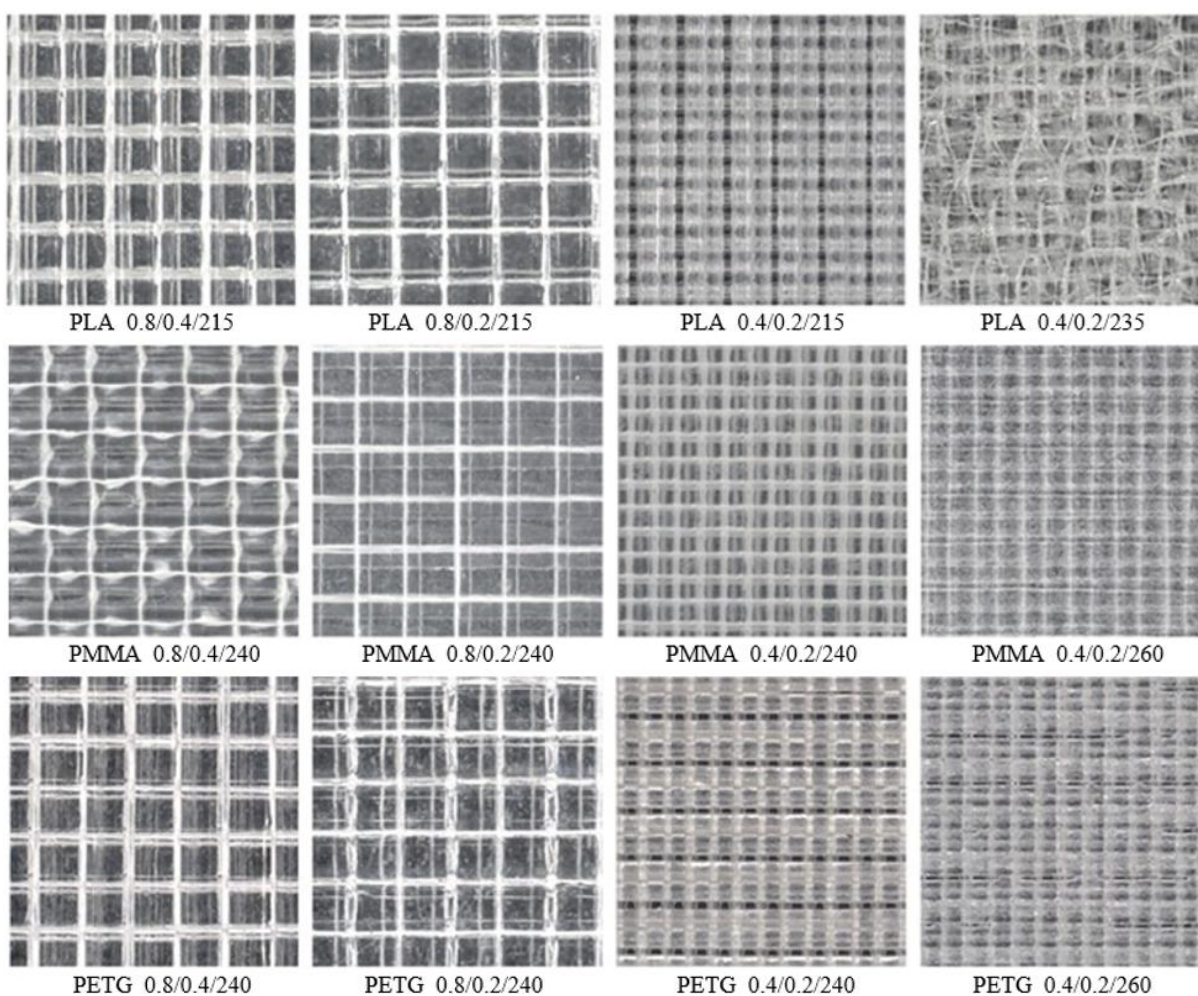
6.4 Studie vlivu parametrů 3D tisku na prostup světla

Prostup světla testovaných polymerních vzorků vyrobených 3D tiskem byl testován pomocí stejné metody dle normy ČSN 36 0011-2 a také pomocí stejného měřicího přístroje digitálního luxmetru Voltcraft MS-1300 jako tomu bylo v případě měření světelné propustnosti skleněných vzorků a polymerních kompozitů. Všechna měření byla prováděna při šíření rozptýleného denního světla zkoumanými vzorky. Za účelem získání co nejpřesnějších hodnot koeficientu propustnosti světla byla měření prováděna během léta, kolem poledne, ve stínu pod jasnou oblohou.

Zkušební vzorky měly rozměry 60 mm × 60 mm × 2 mm (délka × šířka × tloušťka). Každé měření bylo opakováno dvacetkrát při okolní teplotě 24 °C. Poté byly stanoveny aritmetické průměry a směrodatné odchylky prostupu světla. Kromě měření prostupu světla byla také provedena mikroskopická analýza vzorků, která měla ozřejmit souvislost mezi tvarem i strukturou povrchu polymerních vzorků a jejich světelnými vlastnostmi.

6.4.1 Mikroskopická analýza vzorků polymerů vyrobených 3D tiskem

Pro analýzu povrchu 3D tištěných vzorků a mikrotomových řezů byl použit digitální mikroskop Keyence VHX-7100 (Keyence Corporation, Osaka, Japonsko). Mikrotomové řezy byly připraveny pomocí rotačního mikrotomu Leica RM2255 o tloušťce 40 mikronů (Leica Microsystems, Wetzlar, Německo). Mikroskopická analýza byla provedena při zvětšení 80×.

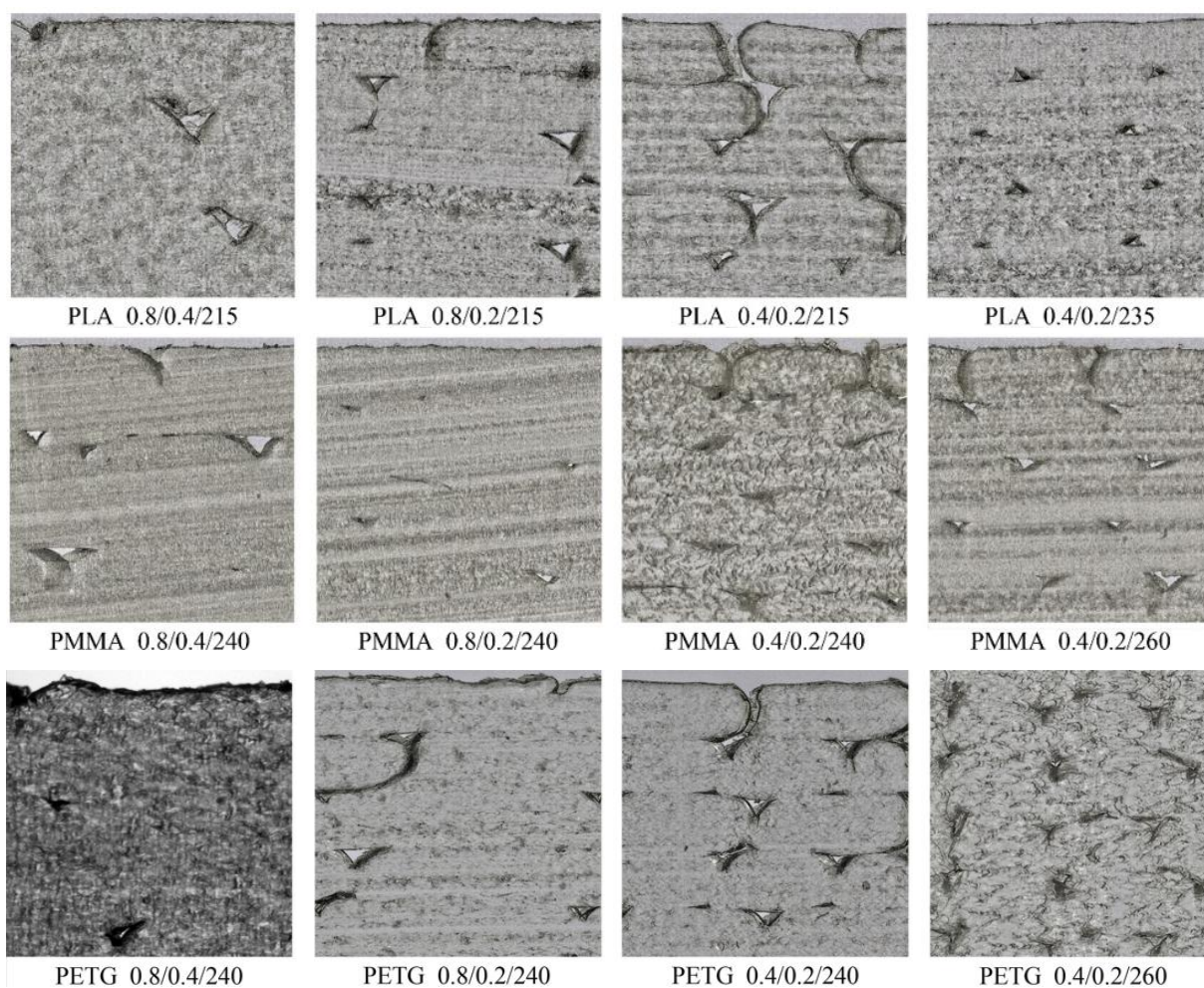


Obr. 32 Mikroskopické snímky povrchových tvarů zkoumaných polymerních vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 5 mm × 5 mm

Tvary povrchů 3D tištěných polymerních vzorků, vyrobených různými průměry trysek, výškami vrstev a teplotami tisku, jsou znázorněny na mikroskopických snímcích s půdorysnými rozměry 5 mm × 5 mm na obr. 32.

Na snímcích je patrné střídavé ukládání jednotlivých vrstev během 3D tisku se vzájemným pootočením jednotlivých vrstev o 90 stupňů, jak již bylo vysvětleno v kapitole 5.4. Z těchto snímků je rovněž patrné, jak podmínky 3D tisku ovlivnily tvar i strukturu povrchu polymerních vzorků, což se také projevuje na jejich světelných vlastnostech.

Vzorky vyrobené s průměrem trysky $D = 0,4$ mm výrazněji rozptylovaly světlo, což vytvářelo zamlžený nebo zakalený vzhled objektů viděných přes tyto materiály. Naproti tomu polymerní vzorky vyrobené 3D tiskem s průměrem trysky $D = 0,8$ mm propouštěly světlo s menším rozptylem, takže objekty za nimi vypadaly jasně a ostře. Míra zakalení či mléčnosti materiálu z pohledu průchodu světla byla tedy vyšší u vzorků vyrobených s průměrem trysky $D = 0,4$ mm.



Obrázek 33 Mikroskopické snímky strukturálních řezů zkoumaných polymerních vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 1 mm × 1 mm

Pro účely hlubšího mikroskopického zkoumání vzorků 3D tištěných polymerů byly vytvořeny sekce mikrotomů, tedy tenké strukturní řezy materiálu. Mikroskopické snímky těchto strukturních řezů jsou znázorněny na obr. 33.

Vyšší přítomnost vnitřních dutin vykazovaly vzorky s menší výškou vrstvy. Tenčí vrstvy materiálu se totiž nemusí spojit efektivně a dochází tak ke zvýšené tvorbě dutin. Větší průměry trysek a silnější vrstvy měly za následek větší rozměry vnitřních dutin u vyrobených vzorků, ale celkové množství dutin bylo nižší než u vzorků s tenčími vrstvami a menším průměrem trysky.

Větší průměr trysky a silnější vrstva tedy snižují množství dutin. Zlepšená přilnavost vrstev byla pozorována při zvýšené teplotě tisku, silnější tiskové vrstvě a větším průměru trysky. Při stejném průměru trysky a stejné výšce vrstvy mělo zvýšení teploty tisku pozitivní vliv na přilnavost vrstev a zároveň se také snížil celkový počet vnitřních dutin.

6.4.2 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů

Střední hodnoty propustnosti světla zkoumaných 3D tištěných polymerů v závislosti na podmínkách tisku jsou zaznamenány v tab. 13. Hodnoty prostupu světla vyjádřené činitelem prostupu světla τ [-] jsou uváděny spolu se směrodatnými odchylkami.

Tab. 13 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů

Označení vzorku	τ [-]
PLA 0,8/0,4/215	0,67 ± 0,02
PLA 0,8/0,2/215	0,66 ± 0,02
PLA 0,4/0,2/215	0,52 ± 0,02
PLA 0,4/0,2/235	0,64 ± 0,02
PMMA 0,8/0,4/240	0,78 ± 0,03
PMMA 0,8/0,2/240	0,74 ± 0,03
PMMA 0,4/0,2/240	0,54 ± 0,02
PMMA 0,4/0,2/260	0,58 ± 0,02
PETG 0,8/0,4/240	0,65 ± 0,02
PETG 0,8/0,2/240	0,59 ± 0,02
PETG 0,4/0,2/240	0,37 ± 0,01
PETG 0,4/0,2/260	0,44 ± 0,01

Propustnost denního difuzního světla u zkoumaných vzorků závisela na typu filamentu a podmínkách 3D tisku. U testovaných 3D tištěných vzorků se činitel prostupu světla τ [-] zvyšoval v souvislosti s větším průměrem trysky D [mm] a vyšší vrstvou H [mm], což platilo u všech typů materiálu. Použité podmínky při procesu 3D tisku měly výrazný vliv na tvar povrchu a strukturu zkoumaných vzorků. Větší průměr trysky a také větší výška vrstvy vedly ke zvýšení povrchových nerovností 3D tištěných vzorků, což se projevilo zlepšením propustnosti světla. U vzorků vyrobených s průměrem trysky $D = 0,4$ mm a výškou vrstvy $H = 0,2$ mm vedlo zvýšení teploty tisku rovněž ke zlepšení propustnosti světla. Lepší spojení vrstev se zde projevilo snížením počtu mikroskopických mezer a nepřesností. Homogennější struktura materiálu způsobená zvýšením teploty 3D tisku tak zlepšuje prostup světla. Hodnoty prostupu světla vyjádřené činitelem prostupu světla τ [-] byly v souladu s tvary a strukturami materiálu zachycenými na mikroskopických snímcích 3D tištěných vzorků, které jsou v kapitole 6.4.1 zachyceny na obr. 32 a 33.

6.5 Matematické simulace kvality denního osvětlení

Projektanti využívají počítačových simulací při návrhu budov nebo před jejich rekonstrukcí. Díky těmto simulacím lze matematicky modelovat vliv prostupu světla okenní výplní na kvalitu denního světla v referenční místnosti. Získané výpočty činitele prostupu světla τ [-] umožňují vzájemně porovnat používané výplně z hlediska propustnosti světla. Pro lepší představu je možno použít i procentuální vyjádření, např. výsledný činitel prostupu světla pro běžné sklo Float tl. 4 mm (tj. vzorek S1) má vypočtenou hodnotu $\tau = 0,840 \pm 0,001$, což v procentuálním vyjádření znamená, že toto sklo propustí 84 % světla. Tento údaj však nabízí pouze omezenou představu o tom, jak se tato hodnota, případně její změna projeví na úrovni osvětlenosti v místnosti. Pro tyto účely bylo použito programu Wdls 5.0, který úspěšně využívají projektanti především za účelem uspokojení potřeb uživatelů stavby v rámci dodržování platných norem. Uvažovány byly čisté (neznečištěné) vzorky.

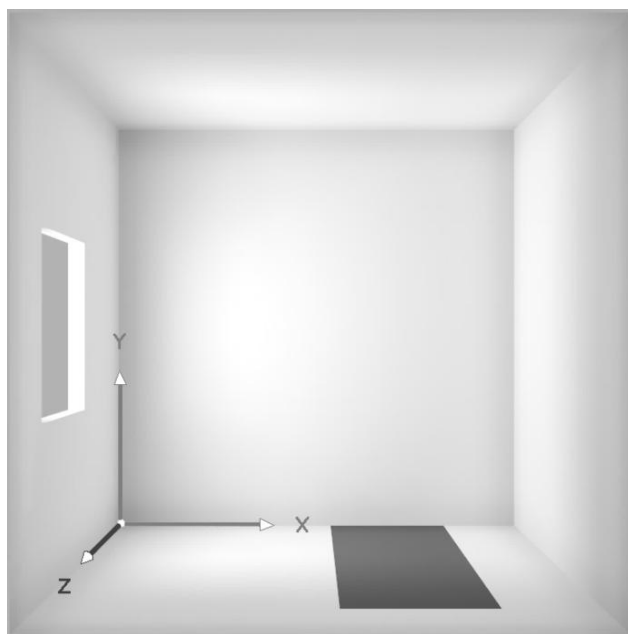
6.5.1 Princip programu Wdls 5.0

Program Wdls 5.0 od společnosti Astra MS Software umožňuje výpočet osvětlení v místnosti nebo na zvolené ploše, přičemž výsledky lze zobrazit liniemi

čar, které spojují body o stejné osvětlenosti. Osvětlenost místnosti je dána činitelem denní osvětlenosti D [%]. Postupně je možno vytvořit model místnosti či domu s rozměry, nastavením odraznosti, resp. činitele odrazu světla ρ [-] jednotlivých povrchů, tedy stěn, podlah, stropů a osvětlovacích otvorů. Široká je možnost nastavení druhu výplně okna s jeho rozměrem a umístěním ve stěně.

6.5.2 Simulace kvality denního osvětlení pro vzorky skla

Matematické simulace činitele denní osvětlenosti byly provedeny pomocí softwaru Wdls 5.0 na základě vícenásobných odrazů světla v referenční místnosti (viz obr. 34), která má rozměry 2,8 m × 2,8 m × 2,4 m (délka × šířka × výška). Místnost je vybavena dveřmi o rozměrech 0,8 m × 2 m (šířka × výška) a proskleným oknem o rozměrech 1 m × 0,9 m (šířka × výška). Jak je znázorněno na obr. 34, skleněné okno (vlevo) je umístěno nad podlahou referenční místnosti, v tomto případě ve výšce 1 m.



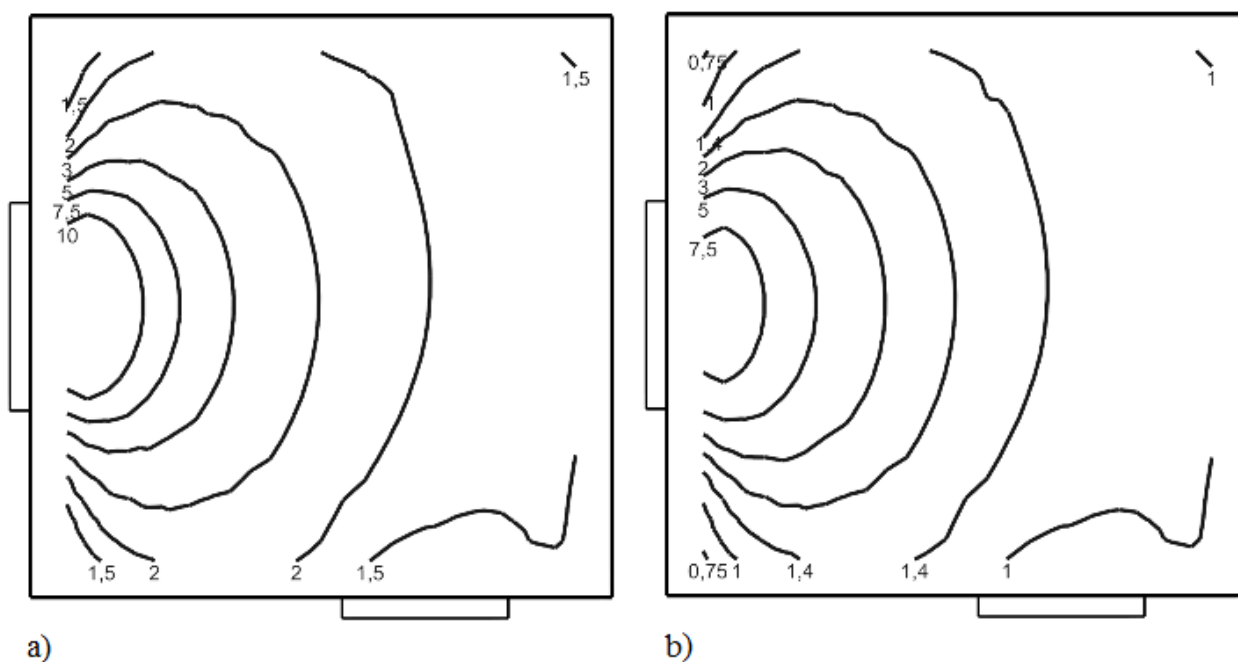
Obr. 34 Referenční místnost pro matematické simulace denního osvětlení

Šíření denního světla v referenční místnosti je také ovlivněno odrazy světla od povrchů v místnosti. Hodnoty činitele odrazu světla ρ [-] pro jednotlivé povrchy jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Činitele odrazu světla jednotlivých ploch při testování skleněných výplní

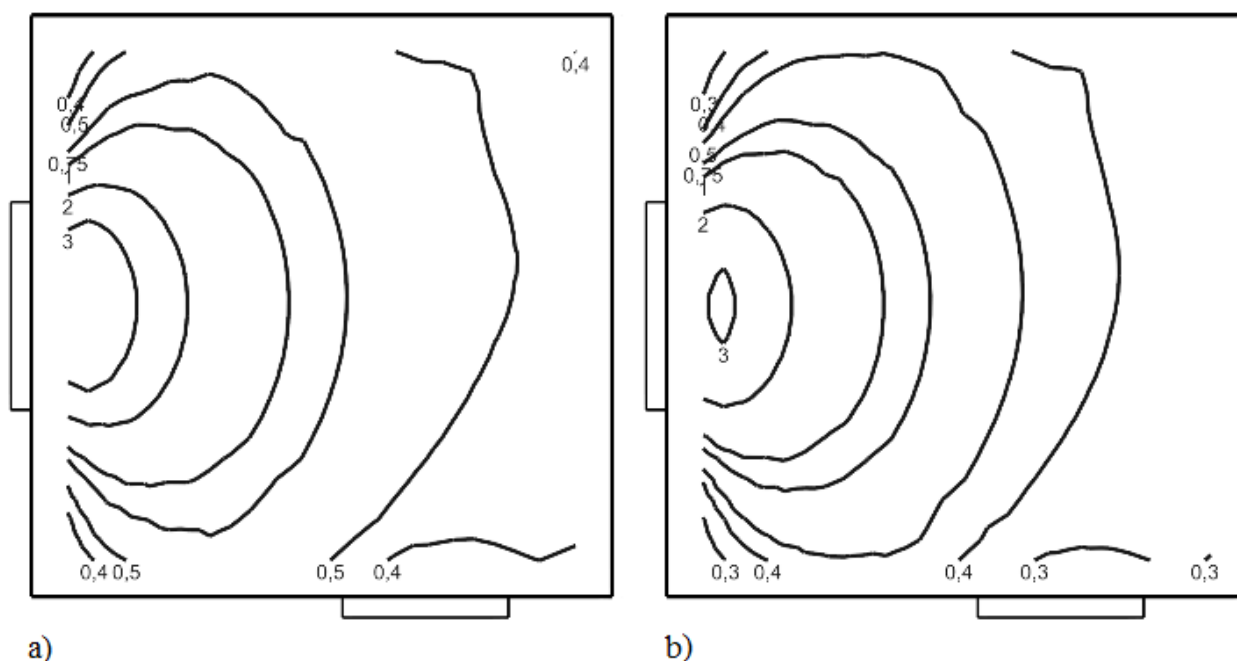
Povrch	Zed'	Strop	Podlaha	Dveře
ρ [-]	0,91	0,91	0,72	0,14

Vliv činitele prostupu světla skleněnými okny τ [-] na rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] v referenční místnosti na pracovní rovině, která je ve výšce 0,85 m nad podlahou místnosti, je znázorněn na obr. 35 a 36. Jak je patrné z obr. 35a, nejvyšší hodnoty faktoru denní osvětlenosti, a tedy i nejlepší kvalita denního světla v referenční místnosti, byly zjištěny u nejtenčího čirého skla (tj. vzorku S1), které se vyznačuje maximální hodnotou činitele prostupu světla (tj. $\tau = 0,84$). Je také zřejmé, že hodnoty činitele denní osvětlenosti v daném místě obecně klesaly spolu s klesajícím činitelem prostupu světla.



Obr. 35 Rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] ve výšce 0,85 m nad podlahou místnosti při činiteli prostupu světla $\tau = 0,84$ (a) a $\tau = 0,56$ (b) skleněným oknem

Nejhůrší podmínky denní osvětlenosti byly pozorovány u reflexního bronzového skla (vzorek S5), které se vyznačuje minimální hodnotou koeficientu prostupu světla ($\tau = 0,185$), jak je znázorněno na obr. 36b. Proto se tento typ skla používá především k ochraně před slunečním zářením.



Obr. 36 Rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] ve výšce 0,85 m nad podlahou místnosti při činiteli prostupu světla $\tau = 0,238$ (a); $\tau = 0,185$ (b) skleněným oknem

Výše uvedené závěry jsou v souladu s minimálními (D_{min}), středními (D_m) a maximálními (D_{max}) hodnotami činitele denní osvětlenosti, které byly získány matematickými simulacemi a jsou zaznamenány v tab. 15.

Tab. 15 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti u testovaných skel

Název vzorku	τ [-]	D_{min} [%]	D_m [%]	D_{max} [%]
Float tl. 4 mm	$0,840 \pm 0,001$	1,1	3,3	14,3
Float tl. 6 mm	$0,823 \pm 0,002$	1,0	3,2	14,0
LowE tl. 3,8 mm	$0,762 \pm 0,001$	1,0	3,0	13,0
Stopsol tl. 3,8 mm	$0,238 \pm 0,001$	0,3	0,9	4,1
Stopsol tl. 5,9 mm	$0,185 \pm 0,001$	0,2	0,7	3,2
Činčila čirá tl. 3,8 mm	$0,794 \pm 0,001$	1,0	3,1	13,5
Kůra čirá tl. 4 mm	$0,800 \pm 0,001$	1,0	3,1	13,6
Drátěné sklo tl. 6 mm	$0,738 \pm 0,002$	0,9	2,9	12,6
VSG 33.1 tl. 6,1 mm	$0,810 \pm 0,002$	1,0	3,2	13,8
VSG 33.2 tl. 6,6 mm	$0,804 \pm 0,001$	1,0	3,2	13,7
Dvojsklo tl. 24 mm	$0,668 \pm 0,001$	0,8	2,6	11,4
Trojsklo tl. 40 mm	$0,560 \pm 0,001$	0,7	2,2	9,5

Na základě matematických simulací kvality denního osvětlení pomocí softwaru Wdls 5.0 bylo prokázáno, že nižší propustnost světla zkoumaných skel byla doprovázena nižšími hodnotami činitele denní osvětlenosti referenční místnosti. Získané hodnoty činitele denní osvětlenosti v tab. 15 je důležité porovnat s požadavky na hodnotu činitele denní osvětlenosti pro třídy zrakové činnosti uvedenými již v tabulce 2 (viz kapitola 4.1.3). Při návrhu skleněné výplně a následného dispozičního rozdělení místnosti musí být vždy zohledněno, jaký druh činnosti má být v dané místnosti vykonáván a zároveň vybráno i vhodné místo k této činnosti. V místnostech, kde by měla být vykonávána velmi přesná zraková činnost jako např. rýsování, je nutné nejen zvolit výplň s vysokým činitelem prostupu světla, ale zároveň také dbát na správné umístění pracoviště v blízkosti osvětlovacího otvoru. V místnostech určených ke skladování může být větší množství světla naopak nežádoucí, proto se v těchto případech volí sklo s nízkou světelnou propustností.

6.5.3 Simulace kvality denního osvětlení pro polymerní kompozity

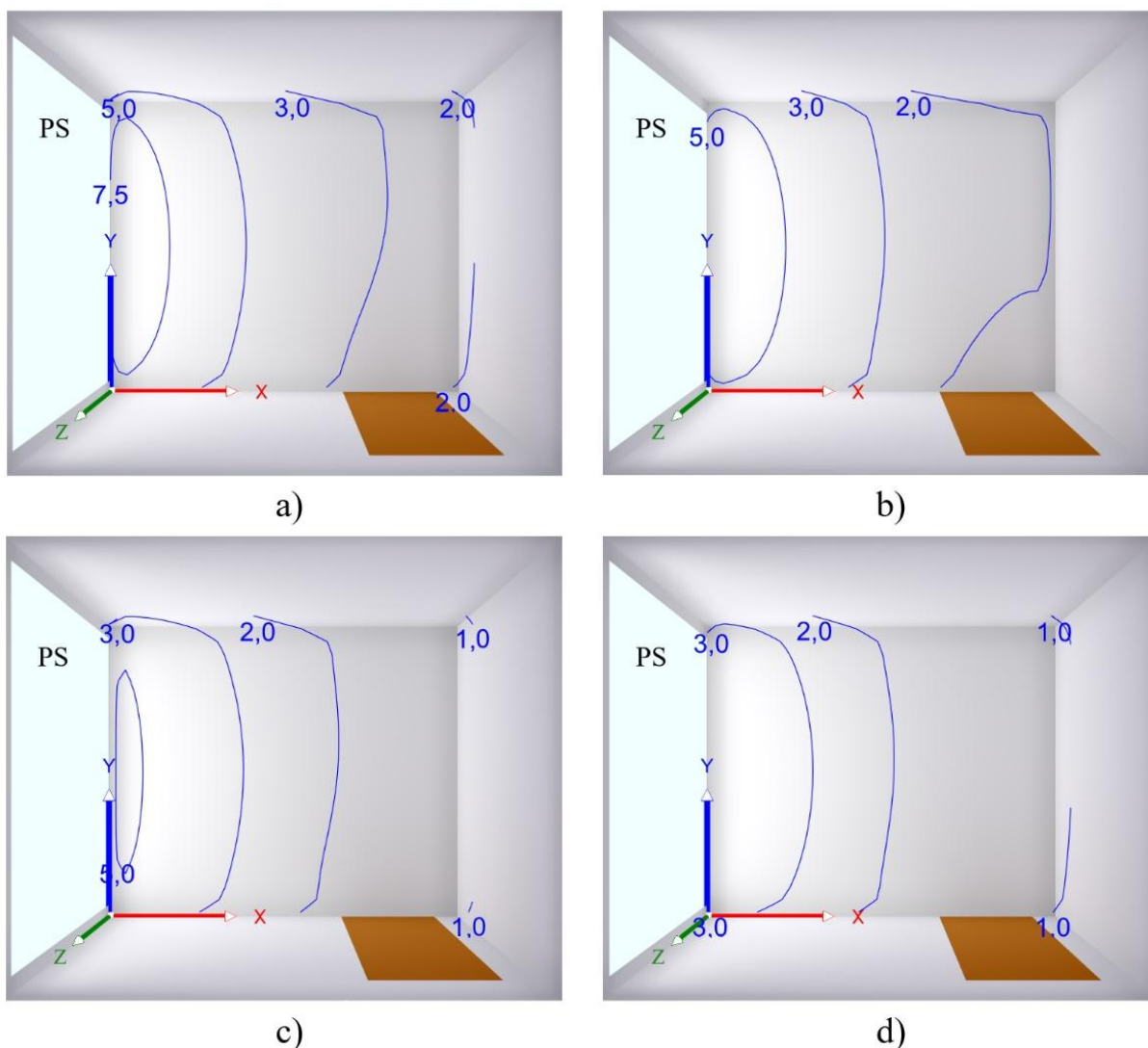
Pomocí softwaru Wdls 5.0 byl také matematicky simulován vliv prostupu světla vybranými polymerními kompozity plněnými vlákny z ovčí vlny na kvalitu denního světla v referenční místnosti. Hodnocen byl v tomto případě vliv koncentrace ovčí vlny. Tyto simulace byly založeny na vícenásobných odrazech světla v referenční místnosti o rozměrech 3 m × 2,5 m × 2,4 m (délka × šířka × výška), jak je znázorněno na obr. 37. Hodnoty odrazivosti světla pro jednotlivé povrchy v referenční místnosti jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Činitelé odrazu světla jednotlivých ploch při testování polymerních kompozitů

Povrch	Zed'	Strop	Podlaha	Dveře
ρ [-]	0,94	0,94	0,65	0,16

Testovaný vzorek polymerního kompozitu (PS) měl rozměry 2300 mm × 2300 mm × 4 mm (délka × výška × tloušťka) a byl zapuštěn do levé stěny referenční místnosti (viz obr. 37). V tomto případě byly hodnoty činitele denní osvětlenosti zaznamenány v rovině umístěné 0,75 m nad podlahou místnosti. Matematické simulace denního osvětlení ukazují, že vzorek PES bez ovčí vlny

vykazoval nejvyšší hodnoty činitele denní osvětlenosti (viz obr. 37a), a tedy nejlepší kvalitu denního osvětlení v referenční místnosti. Dále je zřejmé, že osvětlenost vyjádřená hodnotou činitele denního osvětlení v daném bodě obecně klesala spolu s poklesem činitele prostupu světla. To bylo dáno zvýšením koncentrace ovčí vlny v testovaných kompozitech polymer/ovčí vlna (viz obr. 37b - 37d). Nejhorší podmínky denního osvětlení byly pozorovány u kompozitu EP/ovčí vlny s koncentrací ovčí vlny $W_r = 5 \text{ hm. } \%$, který je charakterizován minimální hodnotou koeficientu prostupu světla ($\tau = 0,37$), jak je znázorněno na obr. 37d.



Obr. 37 Rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] ve výšce 0,75 m nad podlahou místnosti v závislosti na koeficientu prostupu světla τ [-] zkoušených polymerních vzorků (PS): (a) $\tau = 0,72$; (b) $\tau = 0,58$; (c) $\tau = 0,43$; (d) $\tau = 0,37$

Výše uvedené závěry jsou v souladu s minimálními (D_{min}), středními (D_m) a maximálními (D_{max}) hodnotami činitele denní osvětlenosti, které byly získány matematickými simulacemi a jsou zaznamenány v tab. 17 jako funkce koncentrace ovčí vlny W_r ve studovaných polymerních vzorcích.

Tab. 17 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti v referenční místnosti pro vybrané vzorky kompozitů

Typ materiálu	W_r [hm. %]	τ [-]	D_{min} [%]	D_m [%]	D_{max} [%]
EP	0	$0,69 \pm 0,03$	1,5	4,4	8,8
	3	$0,43 \pm 0,02$	0,9	2,7	5,3
	5	$0,37 \pm 0,02$	0,8	2,3	4,5
PES	0	$0,72 \pm 0,04$	1,4	4,3	8,5
	3	$0,58 \pm 0,03$	1,2	3,6	7,1
	5	$0,53 \pm 0,03$	1,1	3,3	6,5

S rostoucí koncentrací ovčí vlny prokazatelně klesá prostup světla kompozitem a následně klesá i osvětlenost místnosti.

6.5.4 Simulace vlivu odraznosti ploch na denní osvětlenost

V následujících simulacích byl zkoumán vliv změny odraznosti, tedy činitele odrazu světla ρ [-] povrchů stěn a stropu na denní osvětlenost místnosti. Byla uvažována referenční místnost, v níž jsou umístěny dveře, jejichž odraznost byla v obou případech stejná. Lze totiž předpokládat, že uživatel častěji přemaluje pokoj na jinou barvu, než si vymění dveře.

V obou simulacích byla navržena stejná místnost o půdorysu 5m x 5 m; rozměr okna 2m x 1,5 m; rozměr dveří 1m x 2 m; odraznost osvětlovacího otvoru $\rho = 0,05$; odraznost dveří $\rho = 0,3$ a odraznost podlahy $\rho = 0,3$. V obou případech bylo ve výplni okna použito sklo se součinitelem prostupu světla $\tau = 0,83$.

Obě simulace se lišily pouze odrazností, tedy hodnotou činitele odrazu světla ρ [-] povrchů stěn a stropu. V prvním případě byla zvolena odraznost stěn $\rho = 0,3$ a odraznost stropu $\rho = 0,75$.

Ve druhém případě byla uvažována odraznost stěn $\rho = 0,9$ a odraznost stropu $\rho = 0,9$. Vyšších hodnot odraznosti lze v praxi dosáhnout světlejší barvou, případně hladší strukturou povrchu. Srovnání výsledků obou simulací je znázorněno v tab. 18.

Tab. 18 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti referenční místnosti při různých hodnotách činitele odrazu stěn a stropu

Stěny ρ [-]	Strop ρ [-]	D_{min} [%]	D_m [%]	D_{max} [%]
0,3	0,75	1,2	3,1	10
0,9	0,9	3,0	5,9	10

Srovnání výsledků simulací ukázalo, jakým způsobem ovlivňuje změna odraznosti stropu a stěn hodnotu činitele denní osvětlenosti D [%] v referenční místnosti. Je zřejmé, že díky vyšší odraznosti stěn a stropů lze dosáhnout vyšší osvětlenosti. Odraz světla má totiž přímý vliv na šíření světla v místnosti. Maximální denní osvětlenost se nachází vždy u osvětlovacího otvoru, tedy u okna. Směrem od okna, hlouběji do místnosti osvětlenost klesá a její hodnota je závislá na odrazu světla od jednotlivých povrchů v místnosti.

7. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

V této práci byla testována široká škála materiálů, zhotovených odlišnými technologiemi výroby, a to se zaměřením na světelně technické vlastnosti, jakými jsou světelná propustnost, odraz a pohlcování světla. Předkládané výsledky práce lze shrnout do následujících bodů:

- Zpracoval jsem přehled světelných vlastností běžně používaných výplní oken a dveří. Provedl jsem sérii měření a výpočtů, které umožnili vzájemné porovnání propustnosti světla skleněných materiálů při stejných podmínkách.
- Vyhodnotil jsem různé faktory ovlivňující prostup světla skleněnými materiály jako jsou zbarvení, tvar povrchu, tloušťka či vícevrstvá struktura.
- Ověřil jsem možnosti využití technologie 3D tisku pro výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur s důrazem na schopnosti pohlcování nežádoucího světla, což je možné využít např. při filmových projekcích v kinech.
- Prozkoumal jsem vliv geometrie a povrchového rozložení otvorů na světelné absorpční vlastnosti 3D-tištěných materiálů.
- Otestoval jsem vliv změny parametrů 3D tisku na prostup světla transparentních polymerních materiálů. Prokázalo se, že parametry 3D tisku, jako jsou průměr trysky, výška vrstvy a teplota tisku, mají významný vliv na prostup světla.
- Ověřil jsem možnosti využití kompozitů polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace, jako jsou světelně aktivní izolační materiály. Prozkoumal jsem vliv koncentrace ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích na prostup světla.
- Pomocí programu WDLS jsem provedl sérii simulací, na nichž jsem názorně ilustroval, jak činitel prostupu světla osvětlovacími otvory a také činitel odrazu světla od světelně činných materiálů ovlivňují osvětlenost místnosti. Na základě těchto simulací lze optimalizovat kvalitu osvětlení pro daný zrakový úkol v daném místě.

Z výsledků této práce mohou těžit nejen projektanti či technologové, ale i zájemci z řad veřejnosti. Za všechny je možné jmenovat:

- Projektanti i veřejnost se mohou seznámit nejen se světelnými vlastnostmi dosud běžně používaných skleněných výplní oken a dveří, ale také s novými polymerními materiály, které mohou být pro tyto účely používány.
- Projektanti mají možnost využít předložené údaje o prostupu světla a mohou se navíc seznámit se skutečným složením dvojskel a trojskel i s technologií jejich výroby. Zpřesnění vstupních dat do výpočetních programů a matematických simulací pomůže zlepšit dosud nevyhovující kvalitu denního osvětlení nejen ve školách, ale také v obytných místnostech.
- Projektanti, stavebníci i široká veřejnost mohou při návrhu interiérů využít předložených poznatků o schopnostech materiálů odrážet či pohlcovat světlo a tím předcházet riziku nežádoucího oslnění.
- Matematické simulace provedené v této práci ukazují i zájemcům z řad veřejnosti vliv prostupu a odrazu světla na kvalitu denního osvětlení v místnosti. Osvojené znalosti umožňují správně navrhnout nejen osvětlovací otvory, ale i provedení a rozvržení interiéru dle konkrétních potřeb uživatelů. Těmito opatřeními lze výrazně zvýšit zrakovou pohodu a kvalitu života.
- Projektanti, stavebníci, chovatelé ovcí a ekologové mohou využít odpadní ovčí vlnu k výrobě kompozitů na bázi polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace, jako jsou světelně činné izolační materiály. Tato práce tedy přispívá k udržitelnosti životního prostředí, neboť účelné využívání odpadní ovčí vlny ušetří přírodní zdroje a sníží objem odpadu.
- Technologové výroby mohou úspěšně optimalizovat parametry 3D tisku, jako jsou průměr trysky, výška vrstvy a teplota tisku, pro dosažení požadovaných výsledků a zlepšení kvality výrobků.

Úkolem do budoucna je zkoumat u polymerů vyrobených technologií 3D tisku vliv dodatečného tepelného zpracování na světelně technické vlastnosti.

8. ZÁVĚR

Tato práce vznikla především jako reakce na nedostatek informací o světelně technických vlastnostech materiálů podílejících se na šíření světla v interiéru. U zkoumaných materiálů byly v minulosti zmapovány především mechanické či tepelně izolační vlastnosti, ale jejich světelně technické vlastnosti byly až dosud opomíjeny. Všechny tyto materiály se přitom podílejí, nebo se díky svým unikátním vlastnostem mohou úspěšně podílet, na přenosu a distribuci světla v interiéru i exteriéru. Jelikož světelně technické vlastnosti těchto materiálů nebyly dosud řádně prozkoumány či ověřeny, nemohly být ani správně zahrnuty v matematických simulacích používaných projektanty při návrhu budov. Zájemce, který si chtěl vybrat vhodná skla pro okna a dveře, neměl dosud k dispozici ověřený a ucelený přehled propustnosti světla skleněných materiálů. Z této práce navíc vyplývá, že pro osvětlovací otvory lze použít i nové a netradiční materiály, jejichž použití umožňují ověřené mechanické či tepelně izolační vlastnosti a nyní i nově otestované vlastnosti světelně technické.

Odraz a pohltivost světla materiálů stojí většinou na okraji zájmu běžného uživatele. Při výběru barev a povrchu stěn či nábytku v interiéru jsou málokdy zohledněny jejich světelné vlastnosti. Odrazu a pohltivosti světla je přitom nutné věnovat zvýšenou pozornost, neboť spolu s prostupností světla významně ovlivňují zrakovou pohodu člověka.

Studie absorpce světla 3D tištěných vzorků se zaměřila na struktury vytvořené technologií 3D tisku s ohledem na možnosti jejich využití v uzavřených místnostech, jako podhledů nebo lehkých stěn či obložení. 3D tisk je perspektivní technologií, která nachází uplatnění v mnoha oblastech našeho života, proto se studie zaměřila i na tuto slibně se rozvíjející oblast průmyslu. Bylo prokázáno, že technologie 3D tisku umožňuje výrobu lehkých materiálů různých tvarů a struktur, což vede k úspoře času, materiálu a energie. Pomocí technologie 3D tisku je možné vyvinout pokročilé 3D tištěné struktury lehkých materiálů pro pohlcování nežádoucího světla s vyloučením oslnění odraženým světlem, což vede ke zlepšení lidského pohodlí. Materiály zabraňující oslnění lze v praxi využít například při prezentacích v přednáškových sálech a místnostech, při filmových projekcích v kinech atp. Kromě toho mohou nově vyvinuté 3D tištěné tvary a struktury velmi dobře plnit i estetickou funkci.

V této studii byly vyhodnoceny různé faktory ovlivňující schopnost materiálu absorbovat světlo. Zkoumané vzorky byly vyrobeny se dvěma typy otvorů, a to s otvory kruhového a čtvercového tvaru. Kromě toho byly otvory vytištěny s různými rozměry, hloubkami, tvary a rozestupy otvorů. Ve studii byly

pojmenovány různé faktory ovlivňující absorpci světla zkoumaných 3D tištěných vzorků a zároveň porovnány s úplným 3D tištěným PETG vzorkem. Studie jednoznačně prokázala, že vzorky obsahující otvory se vyznačují vyšší schopností absorbovat světlo ve srovnání s plným tvarem 3D tištěného PETG vzorku. Bylo navíc prokázáno, že geometrie a počet otvorů na zkoumaných vzorcích má významný vliv na jejich světelnou absorpci.

Ve studii věnované propustnosti světla sklem byly porovnány světelné vlastnosti skleněných materiálů, které se používají jako okenní a dveřní výplně v obytných budovách. Provedené série měření a výpočtu činitele prostupu světla umožňují vzájemné porovnání uvedených vlastností při stejných podmínkách. Byly vyhodnoceny různé faktory ovlivňující tyto vlastnosti (např. zbarvení, tvar povrchu, tloušťka, vícevrstvá struktura). Bylo prokázáno, že rostoucí tloušťka skel, dekorativní a bezpečnostní prvky, barevné a metalizované vrstvy, konstrukce z drátěného skla a systémy vícevrstvého zasklení snižují propustnost světla u zkoumaných vzorků skel. Na základě matematických simulací kvality denního osvětlení pomocí softwaru Wdls bylo potvrzeno, že nižší propustnost světla zkoumaných skel je doprovázena snížením kvality denního osvětlení v místnosti. Osvětlenost a její rozložení v místě zřakového úkolu a v jeho bezprostředním okolí má přitom významný vliv na to, jak rychle, bezpečně a pohodlně osoba vnímá a vykonává zřakový úkol. Zároveň je nutné dávat přednost dennímu osvětlení před umělým, a to jak z ekonomických, tak především z hygienických důvodů. Poznatky, které tato práce předkládá, mohou uspořit náklady za energii při umělém osvětlení a zároveň dodržet hygienické požadavky, což zvýší kvalitu života obyvatel, jejich zdraví a psychickou pohodu.

Studie zabývající se polymerními kompozity plněnými ovčí vlnou přispívá k efektivnějšímu využití ovčí vlny, která je doposud podceňovaným a nedostatečně využívaným obnovitelným zdrojem. Ovčí vlna je přitom se svými vynikajícími vlastnostmi jedním z nejkvalitnějších, nejčistších a nejekologičtějších izolačních materiálů na světě. Mnoho výzkumníků se zabývalo různými vlastnostmi kompozitů na bázi ovčí vlny, včetně mechanických vlastností, tepelné odolnosti, hořlavosti a odolnosti proti vlhkosti. Tato studie však rozšiřuje výzkum o další fyzikální vlastnost kompozitů na bázi pryskyřice/ovčí vlna. Cílem této práce totiž bylo prozkoumat vliv ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích na prostup světla. Na základě matematických simulací kvality denního osvětlení pomocí softwaru Wdls bylo také potvrzeno, že nižší propustnost světla, spojená s vyšší koncentrací ovčí vlny v epoxidových a polyesterových pryskyřicích, je doprovázena snížením kvality denního osvětlení v simulované obytné místnosti. Tyto polymerní kompozity vyztužené ovčí vlnou lze přitom využít jako lehké,

ohnivzdorné, ekologické a biologicky rozložitelné materiály. Výsledky prezentované v této studii mohou pomoci při vývoji kompozitů polymer/ovčí vlna pro praktické aplikace, jako jsou světelné izolační materiály, a tím prospívat našemu životnímu prostředí. Tyto kompozitní materiály mohou nahradit stávající prosvětlovací skleněné tvárnice nebo skleněné příčky, které vykazují velmi špatné tepelně izolační vlastnosti. Kromě toho mohou být průsvitné kompozity na bázi polymer/ovčí vlna instalovány v jakékoli poloze, zatímco křehké sklo je určeno pro instalaci v poloze svislé.

Popularita technologie 3D tisku s sebou přináší také potřebu zkoumat vliv podmínek 3D tisku na fyzikální a mechanické vlastnosti výrobků. Světelně technickým vlastnostem nebyla dosud věnována odpovídající pozornost. Bylo prokázáno, že parametry 3D tisku, jako je průměr trysky, výška vrstvy a teplota tisku mají nesporný vliv na mechanické vlastnosti materiálů, v této práci však bylo ověřeno, že uvedené parametry mají významný vliv také na světelně technické vlastnosti materiálů. Optimalizace teploty tisku je důležitá pro zvýšení kvality tištěného materiálu. Větší průměry trysek i silnější tiskové vrstvy přispívají k lepší přilnavosti vrstev. Úprava těchto parametrů tedy může výrazně ovlivnit strukturální integritu tištěných vzorků a tím i propustnost světla.

Seznam použité literatury

1. BÍLEK, O.; VAŠINA, M. CNC milling and manufacturing of groove shapes for light reflection measurement. *Manufacturing Technology*, 2014, 14.4: 516-522. Dostupné také z: <https://publikace.k.utb.cz/handle/10563/1004267>
2. DUELL, M.; EBERT, M.; MULLER, M.; LI, B.; KOCH, M.; CHRISTIAN, T.; DOBLE, D. M. Impact of structured glass on light transmission, temperature and power of PV modules. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (No. 6-10 September 2010, p. 6). Dostupné také z: <https://www.researchgate.net/publication/266012250>
3. ARIF, Z.U; KHALID, M.Y.; ZOLFAGHARIAN, A.; BODAGHI, M. 4D bioprinting of smart polymers for biomedical applications: recent progress, challenges, and future perspectives. Online. *Reactive and Functional Polymers*. 2022, roč. 179. ISSN 13815148. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105374>
4. YOUSEFI, A.; JOLAIY, S.; LALEGANI DEZAKI, M.; ZOLFAGHARIAN, A.; SERJOUEI, A. 3D-Printed Soft and Hard Meta-Structures with Supreme Energy Absorption and Dissipation Capacities in Cyclic Loading Conditions. Online. *Advanced Engineering Materials*. 2023, roč. 25, č. 4. ISSN 1438-1656. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1002/adem.202201189>
5. ZOLFAGHARIAN, A.; LAKHI, M.; RANJBAR, S.; TADESSE, Y.; BODAGHI, M. 3D printing non-assembly compliant joints for soft robotics. Online. *Results in Engineering*. 2022, roč. 15. ISSN 25901230. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100558>
6. DUDEK, P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. Online. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013, roč. 58, č. 4, s. 1415-1418. ISSN 1733-3490. Dostupné také z: <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>
7. MAQSOOD, N.; RIMAŠAUSKAS, M. Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling.

- Online. *Composites Part C: Open Access*. 2021, roč. 4. ISSN 26666820. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100112>
8. MONKOVA, K.; VASINA, M.; MONKA, P.P.; VANCA, J.; KOZAK, D. Effect of 3D-Printed PLA Structure on Sound Reflection Properties. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 3. ISSN 2073-4360. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3390/polym14030413>
 9. NING, F.; CONG, W.; QIU, J.; WEI, J.; WANG, S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Online. *Composites Part B: Engineering*. 2015, roč. 80, s. 369-378. ISSN 13598368. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
 10. KÁMÁN, A.; BALOGH, L.; TARCSAY, B.L.; JAKAB, M.; MESZLÉNYI, A.; TURCSÁN, T.; EGEDY, A. Glass Fibre-Reinforced Extrusion 3D printed Composites: Experimental and Numerical Study of Mechanical Properties. *Polymers* 2024, 16, 212. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/2/212>
 11. SHERGILL, K.; CHEN, Y.; BULL, S. What controls layer thickness effects on the mechanical properties of additive manufactured polymers. *Surf. Coat. Technol.* 2023, 475, 130131. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897223009064>
 12. FARASHI, S.; VAFAEE, F. Effect of printing parameters on the tensile strength of FDM 3D samples: A meta-analysis focusing on layer thickness and sample orientation. *Prog. Addit. Manuf.* 2022, 7, 565–582. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-021-00247-6>
 13. GONABADI, H.; YADAV, A.; BULL, S.J. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 111, 695–709. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-06138-4>

14. CHACÓN, J.M.; CAMINERO, M.A.; GARCÍA-PLAZA, E.; Núñez, P.J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater. Des.* 2017, 124, 143–157. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517303143>
15. HASAN, A.; FAHAD, M.; KHAN, M.A. Effect of print parameters on the tensile strength and built time of FDM-printed PLA parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2024, 132, 3047–3065. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-13506-x>
16. AZADI, M.; DADASHI, A.; DEZIANIAN, S.; KIANIFAR, M.; TORHAMAN, S.; CHIYANI, M. High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing. *Forces Mech.* 2021, 3, 100016. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266635972100007X>
17. BEHZADNASAB, M.; YOUSEFI, A.A.; EBRAHIMIBAGHA, D.; Nasiri, F. Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts. *Rapid Prototyp. J.* 2020, 26, 381–389. Dostupné také z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rpj-02-2019-0048/full/html>
18. FERNANDES, J.; DEUS, A. M.; REIS, L.; VAZ, M. F.; LEITE, M. Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA. Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018), 547-552. doi:10.25341/D4988C Dostupné také z: <https://dr.ntu.edu.sg/handle/10356/88677>
19. PERNICA, J.; ŠUSTR, M.; DOSTAL, P.; BRABEC, M.; DOBROCKY, D. Tensile testing of 3D printed materials made by different temperature. *Manufacturing Technology.* 2021. 21(3), 398-404. Dostupné také z: <https://journalmt.com/pdfs/mft/2021/03/04.pdf>

20. BAKARDZHIEV, V.; SABEV, S.; KASABOV, P. Research on the impact of extrusion temperature, printing speed, and layer thickness in 3D printing using material deposition technology. *In Proceedings of the 11th International Scientific Conference “TECHSYS 2022” — Engineering, Technologies and Systems*, Plovdiv, Bulgaria, 26–28 May 2022. Dostupné také z: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2980/1/060004/3105896/Research-on-the-impact-of-extrusion-temperature>
21. LABUDEK, J.; MICHNOVÁ, L. Empirický nástroj pro předběžný návrh potřebné plochy okna na splnění normových požadavků pro vnitřní osvětlení obytných místností. Online. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební*. 2011, roč. 11, č. 1, s. 255-262. ISSN 1213-1962. Dostupné také z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/89833>
22. ČERMÁK, M. Denní osvětlení ve školách podle ČSN EN 17037. *SVĚTLO. Praha: FCC Public*, 2020, 23: 4-5. Dostupné také z: <https://www.udrzitelne-projekty.cz/05-odborne-clanky/Denni%20osvteleni%20ve%20skolach.pdf>
23. CHEREJI, B.D.; MUNTEANU, F.D. The Impact of Sheep Wool Waste on the Environment. *Sci. Pap. Ser. E-Land Reclam. Earth Obs. Surv. Environ. Eng.* 2022, 11, 458–463. Dostupné také z: <https://landreclamationjournal.usamv.ro/pdf/2022/Art57.pdf>
24. SENTHILKUMAR, N.; CHOWDHURY, S.; SANPUI, P. Extraction of Keratin from Keratinous Wastes: Current Status and Future Directions. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2023, 25, 1–16. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-022-01492-9>
25. PETEK, B.; LOGAR, R.M. Management of Waste Sheep Wool as Valuable Organic Substrate in European Union Countries. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2021, 23, 44–54. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-020-01121-3>

26. ALTIN, M.; YILDIRIM, G. Investigation of Usability of Boron Doped Sheep Wool as Insulation Material and Comparison with Existing Insulation Materials. *Constr. Build. Mater.* 2022, 331, 127303.
Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822009837>
27. KORJENIC, A.; KLARIĆ, S.; HADŽIĆ, A.; KORJENIC, S. Sheep Wool as a Construction Material for Energy Efficiency Improvement. *Energies* 2015, 8, 5765–5781. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/6/5765>
28. HEGYI, A.; BULACU, C.; SZILAGYI, H.; Lăzărescu, A.-V.; Meitã, V.; Vizureanu, P.; Mihaela Sandu, M. Improving Indoor Air Quality by Using Sheep Wool Thermal Insulation. *Materials* 2021, 14, 2443.
Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/9/2443>
29. WANI, I.A.; KUMAR, R.U.R. Experimental Investigation on Using Sheep Wool as Fiber Reinforcement in Concrete Giving Increment in Overall Strength. *Mater. Today Proc.* 2021, 45, 4405–4409. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320396140>
30. BRANIŠA, J.; JOMOVÁ, K.; LAPČÍK, Ľ.; PORUBSKÁ, M. Testing of Electron Beam Irradiated Sheep Wool for Adsorption of Cr (III) and Co(II) of Higher Concentrations. *Polym. Test.* 2021, 99, 107191.
Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941821001410>
31. HETIMY, S.; MEGAHED, N.; ELEINEN, O. A.; ELGHEZNAWY, D. Exploring the Potential of Sheep Wool as an Eco-Friendly Insulation Material: A Comprehensive Review and Analytical Ranking. *Sustain. Mater. Technol.* 2024, 39, e00812. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214993723002476>

32. RAJABINEJAD, H.; BUcișcanu, I.-I.; MAIER, S.S. Current Approaches for Raw Wool Waste Management and Unconventional Valorization: A review. *Environ. Eng. Manag. J.* 2019, 18, 1439–1456. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/profile/Hossein-Rajabinejad/publication/324866415_Current_Approaches_For_Raw_Wool_Waste_Management_And_Unconventional_Valorization_A_Review/links/5dc9a60692851c818046a789/Current-Approaches-For-Raw-Wool-Waste-Management-And-Unconventional-Valorization-A-Review.pdf
33. FIORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. Effect of Sheep Wool Fibers on Thermal Insulation and Mechanical Properties of Cement-Based Composites. *J. Nat. Fibers* 2019, 17, 1532–1543. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/10.1080/15440478.2019.1584075>
34. SHARMA, Y. K.; MEENA, A.; SAHU, M.; DALAI, A. (2023). Experimental Investigation on Mechanical and Thermal Characteristics of Waste Sheep Wool Fiber-Filled Epoxy Composites. 2023, *Mater. Today: Proc.* Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323002213>
35. THAPLIYAL, D.; VERMA, S.; SEN, P.; KUMAR, R.; THAKUR, A.; TIWARI, A.K.; SINGH, D.; VERROS, G.D.; ARYA, R.K. Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges. *J. Compos. Sci.* 2023, 7, 506. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2504-477X/7/12/506>
36. THOMAS, J.; PATIL, R.S.; JOHN, J.; PATIL, M. A Comprehensive Outlook of Scope within Exterior Automotive Plastic Substrates and Its Coatings. *Coatings* 2023, 13, 1569. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/9/1569>
37. SABA, Naheed et al., 2015. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 35(6), 447-470. DOI: 10.1177/0731684415618459. ISSN 0731-6844. Dostupné také z: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684415618459>

38. Skleněné materiály. Dostupné z: <https://sklenarstvinonstop.cz>
39. Skleněné materiály. Dostupné z:
[srovnani-dvojsklo-vs-trojtklo_4.pdf \(saint-gobain-glass.cz\)](#)
40. BÁLSKÝ, M., Analýza procesu mnohonásobných odrazů. (Disertační práce). ČVUT v Praze 2014. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/60866/Disertace_Balsky_2014.pdf?sequence=1
41. SOKANSKÝ, K.; NOVÁK, T.; BÁLSKÝ, M.; BLÁHA, Z.; CARBOL, Z. *Světelná technika*. ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9
42. Environmentální fyzika. Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB. Dostupné z: <http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika>
43. ČSN EN 12464-1 *Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Český normalizační institut, (2004).
44. KÖSTER, Helmut., *Dynamika denního osvětlení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. ISBN 978-80-247-3049-3
45. WANG, S.; ZHANG, J.; LUO, D.; GU, G.; TANG, D.; DONG, Z.; TAN, G.; QUE, W.; ZHANG, T.; LI, S.; et al. Transparent ceramics: Processing, materials and applications. *Prog. Solid State Chem.* 2013, 41, 20–54. Dostupné také z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079678612000416>
46. ČEJKA, Č.; ARDAN, T.; ŠIRC, J.; MICHÁLEK, J.; BRŮNOVÁ, B.; ČEJKOVÁ, J. The influence of various toxic effects on the cornea and changes in corneal light transmission. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 2010, 248, 1749–1756. Dostupné také z:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00417-010-1438-2>

47. GHOSH, S.S.; BISWAS, P.K.; NEOGI, S. Effect of solar radiation at various incident angles on transparent conducting antimony doped indium oxide (IAO) film developed by sol-gel method on glass substrate as heat absorbing window glass fenestration. *Sol. Energy* 2014, 109, 54–60. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X14003971>
48. KEANEY, E.; SHEARER, J.; PANWAR, A.; MEAD, J. Refractive index matching for high light transmission composite systems. *J. Compos. Mater.* 2018, 52, 3299–3307. Dostupné také z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998318764787>
49. HABEL, J., *Světlo a osvětlování*, Praha: FCC Public, 2013
50. POPOVIČ, Š. (2009). *Výroba a zpracování plochého skla*, p. 256. Grada Publishing. Prague. ISBN 978-80-247-3154-4.
51. Skleněné materiály. Dostupné z: <https://www.agc-processing.cz/produkty-stratobel-vrstvena-bezpecnostni-skla/>
52. Skleněné materiály. Dostupné z: <https://www.janosik.cz/technicka-knihovna/bezpecnostni-sklo/>
53. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
54. HUDEC, Mojmír, 2012. Pasivní domy z přírodních materiálů [online]. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-7939-3. Dostupné z: https://scholar.google.cz/scholar?hl=cs&as_sdt=0%2C5&q=HUDEC%2C+Mojm%3ADr%2C+2012.+Pasivn%3AD+domy+z+p%2C5%99%3ADrodn%3ADch+materi%3A11%2C5%AF+&btnG=
55. Tepelně izolační vlastnosti izolačních materiálů a jejich porovnání, In: *Izolant.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.izolant.cz/tepelneizolacni-vlastnosti-izolacnich-materialu-a-jejich-porovnani/>

56. INNOMIA. *Topologická optimalizace dílů a 3D tisk*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.innomia.cz/novinky/topologicka-optimalizace-dilu-a-3d-tisk>.
57. GROSS, B.C.; ERKAL, J.L.; LOCKWOOD, S.Y.; CHEN, Ch.; SPENCE, D.M. Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. Online. *Analytical Chemistry*. 2014, roč. 86, č. 7, s. 3240-3253. ISSN 0003-2700. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1021/ac403397r>.
58. VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; TZOUNIS, L.; GRAMMATIKOS, S.A.; PORFYRAKIS, E. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyethylene Terephthalate Glycol over Multiple Recycling Processes. Online. *Materials*. 2021, roč. 14, č. 5. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3390/ma14051162>.
59. LAIRD PLASTICS. *What is PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)*. Online. Dostupné z: <https://lairdplastics.com/resources/what-is-petg-polyethylene-terephthalate-glycol/>
60. HUANG, P.; PITCHER, J.; MUSHING, A.; LOURENÇO, F.; SHAVER, M.P. Chemical recycling of multi-materials from glycol-modified poly(ethylene terephthalate). Online. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023, roč. 190. ISSN 09213449. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922006863?via%3Dihub>
61. LUKIANCHUK, L.; TULASHVILI, Y.; PODOLYAK, V.; КОБАЛІЧУК a HORBARIUK, B. Principles Of Education Students 3D-printing. Online. Č. 2020, s. 443. Dostupné také z: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.7.54>
62. ZONG, H.; REN, H.; KE, X.; WANG, S.; HAO, G. Rheological and printability evaluation of melt-cast explosives for fused deposition modeling (FDM) 3D printing. Online. *FirePhysChem*. 2023. ISSN 26671344. Dostupné také z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667134423000329?via%3Dihub>

63. ARRIGO, R.; FRACHE, A. FDM Printability of PLA Based-Materials: The Key Role of the Rheological Behavior. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 9. ISSN 2073-4360. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/9/1754>
64. MAHARANA, T.; MOHANTY, B. a NEGI, Y.S. Melt–solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability. Online. *Progress in Polymer Science*. 2009, roč. 34, č. 1, s. 99-124. ISSN 00796700. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S007967000800097X?via%3Dihub>
65. SASAKI, H.; HAMANAKA, I.; TAKAHASHI, Y.; KAWAGUCHI, T. Effect of long-term water immersion or thermal shock on mechanical properties of high-impact acrylic denture base resins. *Dental Materials Journals* 2016, 35, 204–209. Dostupné také z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/dmj/35/2/35_2015-291/_article/-char/ja/
66. TAKAHASHI, Y.; HAMANAKA, I.; SHIMIZU, H. Flexural properties of denture base resins subjected to long-term water immersion. *Acta Odontologica Scandinavica*, 2013, 71.3-4: 716-720. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/00016357.2012.715196>
67. NARVA, Katja K.; LASSILA, L.V.; VALLITTU, P.K. The static strength and modulus of fiber reinforced denture base polymer. *Dental Materials*, 2005, 21.5: 421-428. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0109564104001265>
68. MIETTINEN, V.M.; VALLITTU, P.K. Water sorption and solubility of glass fiber-reinforced denture polymethyl methacrylate resin. *The Journal of prosthetic dentistry*, 1997, 77.5: 531-534.

69. AYRILMIS, N.; KARIZ, M.; KWON, J.H.; KITEK KUZMAN, M. Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102: 2195-2200. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03299-9>
70. SONNLEITNER, K.; HUBER, C.; TELIBAN, I. 3D printing of polymer-bonded anisotropic magnets in an external magnetic field and by a modified production process. *Applied Physics Letters*, 2020, 116.9. Dostupné také z: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article/116/9/092403/38518>
71. ECKER, J. V.; HAIDER, A.; BURZIC, I.; HUBER, A.; EDER, G.; HILD, S. Mechanical properties and water absorption behaviour of PLA and PLA/wood composites prepared by 3D printing and injection moulding. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(4), 672-678. Dostupné také z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rpj-06-2018-0149/full/html>
72. N'DIAYE, M.; PASCARETTI-GRIZON F.; MASSIN P. Water absorption of poly (methyl methacrylate) measured by vertical interference Microscopy. *Langmuir*, 2012, 28.31: 11609-11614. Dostupné také z: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la302260a>
73. KHATOON, S.; KHANDELWAL, A.; RAJ, A.; AHMAD, G. Fabrication of FFF 3D-printed surfaces for PMMA-based biomedical device employing the pre-processing optimization to eliminate the post-processing steps. *Progress in Additive Manufacturing*, 2024, 9.4: 1003-1014. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-023-00497-6>
74. ERMOLAI, V.; IRIMIA, A. Influence of nozzle parameters in 3D printing under the manufacturing time. *Bull. Polytech. Inst. Iași Mach. Constr. Sect.* 2021, 67, 63–72. Dostupné také z: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/bipcm-2021-0017>

75. FINNES, T. High Definition 3D Printing-Comparing SLA and FDM Printing Technologies. *J. Undergrad. Res.* 2015, 13, 10–26. Dostupné také z: <https://openprairie.sdstate.edu/jur/vol13/iss1/3/>
76. ALTAN, M.; ERYILDIZ, M.; GUMUS, B.; KAHRAMAN, Y. Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): Surface roughness and tensile strength. *Mater. Test.* 2018, 60, 471–477. Dostupné také z: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/120.111178/html>
77. SZCZECH, M.; SIKORA, W. The Influence of Printing Parameters on Leakage and Strength of Fused Deposition Modelling 3D Printed Parts. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2024, 18, 195–201. Dostupné také z: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-00f6f599-befb-4631-8642-a05f1e809343>
78. TAO, Y.; LI, P.; PAN, L. Improving Tensile Properties of Polylactic Acid Parts by Adjusting Printing Parameters of Open Source 3D Printers. *Medziagotyra* 2020, 26, 83–87. Dostupné také z: <https://www.matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/20952>
79. PATIL, J.S.; SATHISH, T.; MAKKI, E.; GIRI, J. Experimental study on mechanical properties of FDM 3D printed polylactic acid fabricated parts using response surface methodology. *AIP Adv.* 2024, 14, 035125. Dostupné také z: <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/14/3/035125/3270875>

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného světla [41]	19
Obr. 2 Energetická bilance světelného toku [42]	24
Obr. 3 Přímý prostup světelného záření [41]	27
Obr. 4 Difuzní prostup světelného záření [41]	27
Obr. 5 Smíšený prostup světelného záření [41]	28
Obr. 6 Odraz světla na mikroskopické úrovni [40]	30
Obr. 7 Ideální zrcadlový odraz světla [40]	30
Obr. 8 Ideální difuzní odraz světla [40]	31
Obr. 9 Difuzní odraz se zrcadlovou složkou (vlevo) a zrcadlový odraz s rozptýlenou složkou [40]	31
Obr. 10 Odraz a lom paprsku světla [41]	32
Obr. 11 Zkoumané vzorky skla: Základní čiré sklo Float (a), sklo s nízkou emisivitou LowE (b), reflexní bronzové sklo Stopsol (c), dekorativní sklo s čirou činčilou (d), a čirou kůrou (e), drátěné sklo (f), vrstvené sklo (g), dvojsklo (h), trojsklo (i).	33
Obr. 12 Schéma výroby čirého skla Float; 1 - definovaná atmosféra; 2 - tavící pec; 3 - roztavený cín; 4 - pás skla; 5 - chladící pec [50]	34
Obr. 13 Schéma magnetronového naprašování; 1 - katoda; 2 - magnety; 3 - anoda; 4 - ionizovaný plyn; 5 - plyn; 6 - vytvořená vrstva; 7 - tabule skla (substrát) [50].	35
Obr. 14 Schéma vytváření pyrolitického povlaku 1 – nanášení pomocí spreje; 2 – nanášení metodou CVD [50]	35
Obr. 15 Přetržité lití skla způsobem Bicheroux [50]	36
Obr. 16 Licí stroj pro výrobu drátěného skla [50]	37
Obr. 17 Vrstvené bezpečnostní sklo poškozené úderem [52]	37
Obr. 18 Zkoumané dvojsklo a jeho složení [50].	38
Obr. 19 Zkoumané trojsklo a jeho složení [50]	39
Obr. 20 Schéma linky na výrobu izolačních skel [50]	39
Obr. 21 Schéma technologie FDM [57]	42
Obr. 22 Zkoumané tvary otvorů (jejich řezy): A – válec/hranol, B - komolý kužel/komolý čtvercový jehlan, C – kužel/čtvercový jehlan.	45
Obr. 23 Rozměry vzorků s kruhovými otvory pro experimentální měření vlastností absorpce světla.	45
Obr. 24 Mikroskopické struktury vláken ovčí vlny: (a) před procesem mletí; (b) po procesu mletí	46

Obr. 25 Fotografie zkoumaných vzorků polymerů s různými koncentracemi ovčí vlny W_r (v hmotn. %): (a) EP vzorky; (b) PU vzorky; (c) PES vzorky.	47
Obr. 26 Fotografie 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3	48
Obr. 27 Pohled na výrobu vzorku na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3.....	48
Obr. 28 Schéma nanášení vrstev během výroby vzorků 3D tiskem	49
Obr. 29 Vzorek polymeru vyrobený na 3D tiskárně.....	49
Obr. 30 Digitální luxmetr MS-1300.....	51
Obr. 31 Princip měření propustnosti světla skleněných vzorků na základě intenzity dopadajícího světla (a) a intenzity světla za zkoušeným vzorkem skla (b).....	55
Obr. 32 Mikroskopické snímky povrchových tvarů zkoumaných polymerních vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 5 mm × 5 mm	58
Obr. 33 Mikroskopické snímky strukturních řezů zkoumaných polymerních vzorků vyrobených 3D tiskem s půdorysnými rozměry 1 mm × 1 mm	59
Obr. 34 Referenční místnost pro matematické simulace denního osvětlení.....	62
Obr. 35 Rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] ve výšce 0,85 m nad podlahou místnosti při činiteli prostupu světla $\tau = 0,84$ (a) a $\tau = 0,56$ (b) skleněným oknem.....	63
Obr. 36 Rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] ve výšce 0,85 m nad podlahou místnosti při činiteli prostupu světla $\tau = 0,238$ (a); $\tau = 0,185$ (b) skleněným oknem.....	64
Obr. 37 Rozložení činitele denní osvětlenosti D [%] ve výšce 0,75 m nad podlahou místnosti v závislosti na koeficientu prostupu světla τ [-] zkoušených polymerních vzorků (PS): (a) $\tau = 0,72$; (b) $\tau = 0,58$; (c) $\tau = 0,43$; (d) $\tau = 0,37$	66

Seznam tabulek

Tab. 1 Požadavky na osvětlenost pro místnosti, úkoly a činnosti [42]	20
Tab. 2 Třídění zrakových činností s hodnotami činitele denní osvětlenosti [42]	23
Tab. 3 Hodnoty činitele prostupu světla při kolmém dopadu na materiál [42]...	26
Tab. 4 Činitelé odrazu světla běžných povrchů [42].....	29
Tab. 5 Tepelně izolační vlastnosti přírodních a polymerních materiálů [55]	41
Tab. 6 Specifikace zkoumaných vzorků skla	44
Tab. 7 Filamenty použité pro výrobu 3D tištěných vzorků.....	47
Tab. 8 Označení a parametry vzorků 3D tištěných polymerů.....	50
Tab. 9 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků s kruhovými otvory.....	53
Tab. 10 Naměřené hodnoty absorpce světla u 3D tištěných vzorků se čtvercovými otvory.....	54
Tab. 11 Výsledky měření propustnosti světla zkoumaných skel... ..	56
Tab. 12 Činitel prostupu světla τ [-] kompozitů EP/ovčí vlna a PES/ovčí vlna.	57
Tab. 13 Výsledky měření propustnosti světla 3D tištěných polymerů... ..	60
Tab. 14 Činitelé odrazu světla jednotlivých ploch při testování skleněných výplní... ..	63
Tab. 15 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti u testovaných skel... ..	64
Tab. 16 Činitelé odrazu světla jednotlivých ploch při testování polymerních kompozitů... ..	65
Tab. 17 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti v referenční místnosti pro vybrané vzorky kompozitů.....	67
Tab. 18 Simulované hodnoty činitele denní osvětlenosti referenční místnosti při různých hodnotách činitele odrazu stěn a stropu.....	68

Seznam použitých symbolů a zkratek

d	[mm]	Průměr vlákna.
d	[mm]	Průměr filamentu.
D	[mm]	Průměr trysky.
D	[%]	Činitel denní osvětlenosti.
D_{min}	[%]	Minimální hodnota činitele denní osvětlenosti.
D_{max}	[%]	Maximální hodnota činitele denní osvětlenosti.
E	[-]	Osvětlenost (nebo také intenzita osvětlení).
\bar{E}_m	[-]	Udržovaná osvětlenost.
E_h	[-]	Osvětlenost venkovní nestíněné vodorovné roviny.
E_τ	[-]	Osvětlenost naměřená za sklem.
E_i	[-]	Osvětlenost naměřená bez skla.
h	[mm]	Hloubka otvoru.
H	[mm]	Výška vrstvy.
n	[-]	Index lomu světla
p	[mm]	Rozteč otvorů.
r	[-]	Rovnoměrnost denního osvětlení.
S	[m ²]	Plocha.
t	[mm]	Tloušťka.
T	[°C]	Teplota.
v	[mm · s ⁻¹]	Rychlost tisku.
W_r	[hmotn. %]	Koncentrace naplnění vzorků ovčí vlnou.
α	[-]	Činitel pohltivosti světla.
ϕ	[lm]	Světelný tok dopadající.
ϕ_ρ	[lm]	Světelný tok odražený.
ϕ_α	[lm]	Světelný tok pohlcený.
ϕ_τ	[lm]	Světelný tok, který prošel přes látku.
λ	[nm]	Vlnová délka.
λ	[W · (m ² · K) ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti.
ρ	[lm]	Činitel odrazu světla.
τ	[-]	Činitel prostupu světla.
$\tau_{s,nor}$	[-]	Činitel prostupu světla při kolmém dopadu.

Publikační aktivity autora

1. NEVŘELA, M.; VAŠINA, M.; HRBÁČEK, P.; DEKYS, V. Effect of geometry and surface distribution of holes on sound and light absorption properties of 3D-printed PETG materials. *MM Science Journal*. 2023. Dostupné také z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/october-2023/articles/effect-of-geometry-and-surface-distribution-of-holes-on-sound-and-light-absorption-properties-of-3d-printed-petg-materials>

Ocenění článku: Čestná cena Inženýrské akademie ČR za nejlepší příspěvek *MM Science Journal* v akademickém roce 2023/2024.

2. HRBÁČEK, P.; VAŠINA, M. Study of light transmission and noise attenuation properties of light active glass materials. *Manufacturing Technology*. 2022, vol. 22, iss. 5, s. 542-549. ISSN 1213-2489. Dostupné z: <https://journalmt.com/pdfs/mft/2022/05/02.pdf>.
3. VAŠINA, M.; STRÁŽNICKÝ, P.; HRBÁČEK, P.; RUSNÁKOVÁ, S.; BOSÁK, O.; KUBLIHA, M. Investigation of Physical Properties of Polymer Composites Filled with Sheep Wool. *Polymers*. 2024, 16.5: 690. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/5/690>
4. BENÍČEK, L.; VAŠINA, M.; HRBÁČEK, P. Influence of 3D Printing Conditions on Physical–Mechanical Properties of Polymer Materials. *Polymers*. 2025, 17.1: 43. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/1/43>

Odborný životopis autora

Jméno: Ing. Pavel Hrbáček
Narozen: 18. 5. 1975 v Prostějově

Vzdělání

2020 – dosud Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav fyziky a materiálového inženýrství.
Doktorský studijní program: Nástroje a procesy
Téma disertační práce: Vliv technologie výroby materiálů na jejich světelně technické vlastnosti.

2018 – 2020 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
Magisterský studijní program: Procesní inženýrství.
Studijní obor: Výrobní inženýrství.
Závěrečná práce: Hydraulické systémy pro zvedání a spouštění hmotné zátěže.

Práce získala *Cenu ředitelky Ústavu výrobního inženýrství*.

2014 - 2017 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
Bakalářský studijní program: Procesní inženýrství.
Studijní obor: Technologická zařízení.
Závěrečná práce: Zvukově izolační a světelné vlastnosti okenních a dveřních výplní.

1992 - 1994 SOU strojírenské Prostějov,
Studijní obor: Strojírenství (maturitní zkouška).

1989 - 1992 SOU strojírenské Prostějov,
Učební obor: Strojní mechanik (učňovská zkouška).

Zahraniční stáž

2023 (leden – únor) DT – Slovenská výhybkáreň, s.r.o.
Nové Mesto nad Váhom, Slovensko.

Pracovní zkušenosti:

- 2023 – dosud Učitel odborných předmětů na SOŠ průmyslové a SOU strojírenském v Prostějově. Vyučované předměty: mechanika, strojírenská technologie, stroje a zařízení, strojnictví, technické kreslení, technologie.
- 2021 – 2023 Servisní technik ve strojírenství.
- 2017 – 2021 Technolog přípravy výroby ve strojírenství.
- 2003 - 2017 Servisní technik a přípravář výroby plastových a hliníkových oken.
- 1997 - 2003 Technolog výroby a normovač ve strojírenství.
- 1995 - 1997 Pracovník technické kontroly ve strojírenství.
- 1994 – 1995 ZVS (mechanik).
- 1992 – 1994 Strojní mechanik (opravy vojenské techniky).