



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



Oděvní materiál jako ochrana proti laserovému záření

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství
Autor práce: **Bc. Michaela Řeháková**
Vedoucí práce: Ing. Marie Kašparová





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering



Clothing material as a protection against laser radiation

Master thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering

Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Bc. Michaela Řeháková**

Supervisor: Ing. Marie Kašparová



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela Řeháková**
Osobní číslo: **T15000411**
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor: **Produktové inženýrství**
Název tématu: **Oděvní materiál jako ochrana proti laserovému záření**
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši zaměřenou na interakci laserového záření s textilním materiálem
2. Na základě tepelně-izolačních vlastností materiálů navrhnete a realizujete oděvně využitelné vrstvené struktury, které budou použitelné jako ochrana před laserovým zářením
3. Kvantifikujte ochranné schopnosti těchto struktur, jako modelový zdroj laserového záření použijte infračervený laser Marcatex 150 Flexi
4. Diskutujte výsledky z hlediska možného uplatnění v praxi

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

VRBOVÁ, Miroslava a kol.: Lasery a moderní optika Oborová encyklopedie, Praha: Prometheus, 1994

HALLIDAY, David RESNICK, Robert WALKER, Jearl: Fyzika, druhé přeprac. vydání Praha SNTL. ISBN 978-80-214-4123-1

MILITKÝ, Jiří. Textilní vlákna. Klasická a speciální. Liberec: Technická univerzita, září 2002. ISBN 80-7083-644-X

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marie Kašparová

Katedra materiálového inženýrství


Konzultant diplomové práce:

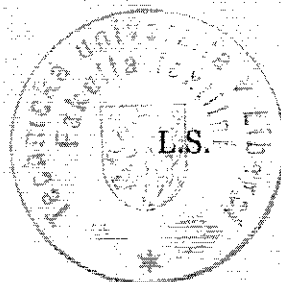
prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **30. března 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **5. května 2017**


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




doc. Ing. Vladimír Bajžik, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. ledna 2017

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

ANOTACE

Tato práce zkoumá možnosti ochrany lidského těla před laserovým paprskem pomocí textilií. Nastihuje možnost vytvoření vícevrstvé struktury, která by pokožku ochránila před tepelnými účinky infračerveného laserového záření.

V rešeršní části práce jsou popsány pojmy, které s tématem souvisí, jako například světlo, laser, CO₂ laser, bezpečnost práce nebo interakce laseru s textilním materiálem. Je zde také charakteristika a funkce vrstev vícevrstvé struktury.

Experimentální část popisuje parametry testovaných materiálů a jejich předpokládanou funkci v systému. Je zde také stručně přiblíženo laserové zařízení Marcatex 150 Flexi, jeho konkrétní nastavení a průběh experimentu.

Klíčová slova: ochrana lidského těla, infračervené laserové záření, vrstvení textilií.

ANOTATION

This work explores the possibilities of protecting the human body against laser beams with the use of textiles. It focuses on the possibility of creating a multilayered structure which would protect the skin against thermal effects of infra-red laser radiation.

The terms related to this topic, e.g. light, laser, CO₂ laser, work safety or interactions between laser and textile material, are explained in the theoretical part of this work. This part also includes the characterization and different functions of individual layers of the multilayered structure.

The experimental part describes parametres of the tested materials and their presumed functions in the system. In this part of the work, there is also a brief mention of the Marcatex 150 Flexi device, its specific settings and the whole process of the experiment.

Key words: protection of the human body, infra-red laser radiation, layering of textiles.

Poděkování

Ráda bych poděkovala všem, kteří mě při psaní této práce podporovali. Nejdříve děkuji své vedoucí diplomové práce Ing. Marii Kašparové za odborné vedení, pomoc, ochotu a cenné rady při zpracování této práce. Děkuji také svému konzultantovi prof. Ing. Jakobovi Wienerovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu, velkou inspiraci a odborné vedení.

Děkuji za psychickou podporu a pochopení nejen při psaní této práce, ale i během celého studia své rodině a blízkým.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1. TEORIE	2
1.1 Teplo.....	2
1.1.1 Přenos tepla vedením.....	2
1.1.2 Přenos tepla prouděním.....	3
1.1.4 Izolace přenosu tepla zářením	6
1.2 Světlo.....	7
1.2.1 Klasické zdroje světla (optického záření)	10
1.2.2 Záření rovnovážných zdrojů	11
Černé těleso.....	11
Záření slunce. Žárovka.....	11
1.2.3 Záření nerovnovážných zdrojů	13
Luminiscence	13
1.3 Laser	13
1.3.1 Princip fungování laserů	13
1.3.2 Vlastnosti laserového světla.....	15
1.4 Využití laserů.....	16
1.4.1 Laserová technologie ve vojenství	17
1.4.2 Laserová technologie v lékařství	17
1.4.3 Laserová technologie ve strojírenství.....	18
1.4.4 Laserové radary a měření vzdáleností.....	21
1.4.5 Laserové gravírování	22
1.4.6 Laserová technologie v textilních oborech.....	22
1.4.7 Gravírování denimu	23
1.5 CO₂ laser	24

1.6 Bezpečnost práce s lasery	25
1.6.1 Rozdělení laserů podle nebezpečnosti účinků jejich záření	25
1.6.2 Místní účinky termické energie	27
Funkce a stavba kůže.....	27
Lidské oko	29
1.7 Interakce laserového záření s textilním materiálem	30
1.7.1 Reflexní vlastnosti povrchu	31
2. Vlastnosti vybraných materiálů potenciálně použitelných k ochraně před laserovým zářením	32
2.1 Vysoce tepelně odolná vrstva	33
2.1.1 Působení laseru na čedičová vlákna	34
2.2 Vrstva zabraňující prostupu paprsku	34
2.3 Vrstva způsobující rozptyl laserového záření	35
2.4 Komfortní vrstva	35
2.4.1 Vliv teploty na bavlněné vlákno	36
2.5 Vrstvení textilií	37
3. EXPERIMENT	38
3.1 Perforování aluminiové folie.....	38
3.2 Perforování PUR pěny.....	39
3.3 Charakteristika použitých materiálů	39
Čedičová textilie	40
Alobal (plný a perforovaný).....	41
Polyuretanová pěna (plná a perforovaná)	42
Bavlněná textilie	42
3.4 Popis laserového zařízení Marcatex 150 Flexi.....	43
3.5 Přehled parametrů laserového paprsku	44
3.7 Nastavení parametrů pro vypalování vzorků	44

3.8 Návrh experimentu	45
4. Ozařování jednotlivých materiálů	47
4.1 Ozařování dvou vrstev	50
4.2 Ozařování čtyř vrstev.....	52
5. Ozařování vícevrstvé textilie (pěti vrstev).....	54
5.1 Vzorky s různou tloušťkou perforované hliníkové fólie	56
5.2 Vzorky s perforovanou PUR pěnou.....	58
5.3 Vyhodnocení výsledků experimentu	62
Závěr	68
7. Literatura	70

Seznam zkratk a symbolů

°C	stupeň Celsia
1"	anglický palec (2,54 cm)
A	absorbance
A	teplosměnná plocha
apod.	a podobně
c	koncentrace
cca	přibližně
d	tloušťka
d	tloušťka stěny
DPI	dot per inch - počet bodů na jednotku anglického palce
e	emisivita
E	energie
E ₀	nejnižší energie
E _x	vyšší energie
f	frekvence
g l ⁻¹	gram na litr
g m ⁻³	gram na metr krychlový
h	Planckova konstanta
h	tloušťka
hk	součinitel přestupu tepla
I	intenzita záření po průchodu prostředím
I ₀	intenzita dopadajícího záření
IR	infračervené záření
J cm ⁻²	joul na centimetr čtvereční
k	kolmice dopadu světla

K	kelvin
kV	kilovolt
kW	kilowatt
log	logaritmus
m ²	metr čtvereční
mm	milimetr
ms ⁻¹	metr za sekundu
mW	miliwatt
např.	například
nm	nanometr
P	čistý vyzářený výkon
Pa	pascal
popř.	popřípadě
PUR	polyuretan
Q	teplo přenesené za jednotku času
R	tepelný odpor
resp.	respektive
sin	sinus
tj.	to je
T _c	teplota okolí
T _p	teplota povrchu
T _r	teplota zářiče
T _t	teplota tekutiny
T _{tep}	teplota teplé oblasti
T _{stud}	teplota studené oblasti
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaně

UV	ultrafialové záření
W	watt
Wcm ⁻²	watt na centimetr čtvereční
α (alfa)	úhel odrazu světla
β (beta)	úhel lomu světla
ε (epsilon)	absorpční koeficient
η (éta)	index lomu
λ (lambda)	vlnová délka
λ (lambda)	tepená vodivost
μm	mikrometr
μs	mikrosekunda
v (ný)	rychlost světla
σ (sigma)	Stefano-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

ÚVOD

Laserové přístroje se používají v celé řadě odvětví. Především je to zdravotnictví, kde se laserový paprsek používá při různých operacích. Dalším odvětvím, kde se můžeme s laserem setkat, je vojenský průmysl, konkrétně při výrobě laserových zbraní. Specifické vlastnosti laserového paprsku jsou využívány také v automobilovém průmyslu, například při svařování karoserií a v celé řadě jiných odvětví. V posledních letech našla laserová technologie uplatnění také v textilním průmyslu při oddělování (stříhání) oděvních dílů z mnohonásobných vrstev textilního materiálu.

Při práci s laserovými přístroji je nutné znát jejich parametry a způsob správné obsluhy, ale také způsob ochrany a bezpečnosti práce. Nejedná se jen o nutnost použití ochranných prostředků, především jde o ochranu zraku, tedy ochranné brýle, ale také o ochranu pokožky - zde se nabízí možnost vyvinutí ochranného oděvu, například rukavic.

Tato diplomová práce se zabývá možností tepelné izolace, konkrétně ochranou lidské pokožky před laserovým infračerveným zářením. Je zde nastíněna možnost vrstvení textilních a izolačních materiálů do struktury, která má za úkol spojit vlastnosti jednotlivých komponent a plně využít jejich tepelně-izolačních vlastností.

V úvodní teoretické části je práce zaměřena na objasnění teorie, týkající se tématu práce. Jsou zde stručně objasněny pojmy světlo, laser, CO₂ laser, bezpečnost práce s lasery, nutnost ochrany očí a pokožky, dále interakce laserového záření s materiálem a závěrem je nastíněna možnost vrstvení textilních a izolačních materiálů do vícevrstvé struktury.

V experimentální části jsou nejdříve testovány jednotlivé vrstvy a zaznamenány jejich okamžité teploty po vypnutí laseru. Poté je testována pětivrstvá struktura, která se skládá z čediče, aluminiové folie ve dvou vrstvách, umístěných nad a pod PUR pěnou, polyuretanové pěny a bavlněného materiálu. Je sledována výchozí teplota vzorku, doba zahřátí na nejvyšší teplotu a doba chladnutí. Jsou porovnány výsledky testování dvou typů polyuretanových pěn, které se od sebe liší tloušťkou. Dále je sledována teplota vzorků s rozdílnou tloušťkou alobalu.

V další fázi experimentu bylo provedeno testování vzorků s perforovanou aluminiovou folií a perforovanou PUR pěnou.

1. TEORIE

1.1 Teplo

Teplo je veličina charakterizující přenos energie mezi makroskopickými soustavami. Teplo není stavová veličina a není druhem energie, ale mírou jejího přenosu (přestupu) v určité formě. V minulosti bylo teplo považováno za vážitelnou látku (fluidum). Odtud také pochází používaný pojem množství tepla, který zachycuje tento historický vývoj obsahu pojmu teplo. Teplo je druh energie. Vyjadřuje, jak se změní vnitřní energie, tj. součet pohybových a polohových energií částic tělesa, jestliže se toto těleso ochladí nebo zvýší svoji teplotu. Teplo je rovno energii, kterou při tepelné výměně odevzdá teplejší těleso chladnějšímu (nebo kterou přijme chladnější těleso od teplejšího). Jednotkou tepla je joule (J).

Přenos tepla je fyzikální jev výměny tepelné energie mezi dvěma systémy šířícím se teplem. Základními principy přenosu tepla jsou teplota a tepelný tok. Teplotou je určeno dostupné množství tepelné energie a tepelný tok představuje přesun tepelné energie. V mikroskopickém měřítku existuje přímá souvislost mezi kinetickou energií molekul a tepelnou energií. Se stoupající teplotou se zvyšuje tepelný neklid molekul, který se projevuje lineárním pohybem a kmitáním. Z oblastí, které obsahují vyšší kinetickou energii, se energie přenáší do oblastí s nižší kinetickou energií. Zjednodušeně řečeno je přenos tepla možné rozdělit do tří širokých kategorií: vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (záření, radiace).

1.1.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením (kondukcí) probíhá prostřednictvím přímých srážek molekul. Z oblasti s vyšší kinetickou energií se tepelná energie přenáší do oblasti s nižší kinetickou energií. Částice s vyšší rychlostí se srážejí s částicemi s nižší rychlostí. V důsledku toho se zvýší kinetická energie pomalejších částic. Vedení je nejčastějším způsobem přenosu tepla a dochází k němu prostřednictvím fyzického kontaktu. Příkladem je, když si sáhnete na okno nebo vložíte kus kovu do otevřeného plamene. Proces vedení tepla závisí na následujících činitelích: teplotní spád, průřez materiálu, délka dráhy přenosu a fyzikální vlastnosti materiálu. Teplotní spád je veličina, která popisuje směr a rychlost šíření tepla. K přenosu teploty dochází

vždy z nejteplejšího místa do nejchladnějšího místa, neboli, jak bylo uvedeno výše, z místa s vyšší kinetickou energií do místa s nižší kinetickou energií. Jakmile se teplotní rozdíl vyrovná a dojde k tepelné rovnováze, přenos tepla se zastaví.

Při přenosu tepla vedením hraje důležitou roli průřez materiálu i dráha přenosu. Čím větší je velikost a délka tělesa, tím více energie je potřeba na jeho zahřátí. Čím větší je nechráněný povrch tělesa, tím více tepla se ztrácí. Menší tělesa s malými průřezy mají minimální tepelné ztráty.

Fyzikální vlastnosti určují, které materiály přenášejí teplo lépe, než jiné. Konkrétně se jedná o součinitel tepelné vodivosti, který říká, že pokud jde o přenos tepla vedením, vede kovový materiál teplo lépe než textilie. Rychlost přenosu tepla vedením se vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$Q = \frac{[k \cdot A \cdot (T_{tep} - T_{stud})]}{d} \quad (1)$$

kde Q teplo přenesené za jednotku času [W]

k tepelná vodivost stěny [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

A teplosměnná plocha [m^2]

T_{tep} teplota teplé oblasti [K]

T_{stud} teplota studené oblasti [K]

D tloušťka stěny [m]

1.1.2 Přenos tepla prouděním

S přenosem tepla prouděním se setkáváme v praktickém životě velmi často, ať už jde o volné proudění v atmosféře, či k tepelnému přenosu dochází při obtékání libovolných těles. V současné době se dostává do popředí řešení problému správného chlazení uvnitř počítače.

Ke sdílení (přenosu) tepla proděním dochází například při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou. Při tomto jevu dochází k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy tekutiny při stěně (podle toho, je-li teplota stěny vůči tekutině vyšší nebo nižší). Vzniklý rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění.

Proudění lze definovat také tak, že se na molekulární úrovni molekuly po přivedení tepelné energie rozpínají. S rostoucí teplotou tekutiny dané hmotnosti se ve stejném poměru musí zvětšovat také její objem. Tento jev způsobuje vytlačování tekutiny, horký vzduch stoupá, chladnější vzduch je tlačěn dolů. Tato řada jevů způsobuje vznik konvekčních proudů. Rovnice, která vyjadřuje tepelný tok při sdílení tepla prouděním, je dána vztahem:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_p - T_t) \quad (2)$$

kde Q teplo přenesené za jednotku času [W]

h součinitel přestupu tepla [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]

A teplosměnná plocha povrchu [m^2]

T_p teplota povrchu [K]

T_t teplota tekutiny [K]

1.1.3 Přenos tepla sáláním

Sálání souvisí se změnami vnitřní energie tělesa a následně těleso vydává záření. Toto záření je poté vysíláno ve formě elektromagnetických vln do prostoru, který těleso obklopuje. Dopadne-li toto záření na jiné těleso a dojde-li k pohlcení tohoto záření, zvýší se vnitřní energie tohoto tělesa. Souhrnně se vzájemné sálání a pohlcování při dvou nebo více tělesech s různými teplotami nazývá sdílení tepla sáláním.

Sálání je přirozená vlastnost těles a můžeme říci, že při něm každé těleso vysílá záření. Dopadne-li toto záření na jiné těleso, je částečně pohlceno, část se odráží a část prochází

tělesem. Pohlcené záření způsobuje zvýšení vnitřní energie tělesa, odražené záření dopadá na jiná tělesa a procházející záření přechází na jiná tělesa.

Pohltivost a odrazivost záření u tělesa závisí především na jakosti povrchu a také na barvě povrchu. V praxi má tento poznatek význam především při konstrukci různých zařízení, například bílé chladničky a mrazáky (aby se záření co nejvíce odrazilo), v létě nosíme především světlé oblečení. Chceme-li naopak, aby bylo záření co nejvíce pohlceno, volíme černou barvu povrchu. Předchozí poznatky lze označit jako empirické. Ve skutečnosti je radiodistribuce záření velmi složitý problém kvantové mechaniky.

Pokud např. budeme stát v létě na poledním slunci, pocítíme velmi silné zahřívání, což je mimo jiné způsobeno tím, že pohlcujeme tepelné záření od Slunce. Je však důležité si uvědomit, že pro přenos tepla zářením není potřeba žádné hmotné prostředí, protože jde o elektromagnetické vlnění. Tepelné záření se vypočítá následovně:

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_r^4 - T_c^4) \quad (3)$$

kde P čistý vyzářený výkon [W]

A vyzařující plocha [m²]

T_r teplota zářiče [K]

T_c teplota okolí [K]

ε emisivita [-]

σ 5,67 · 10⁻⁸ Wm⁻²K⁻⁴ je tzv. Stefanova-Boltzmannova konstanta.

Hodnota emisivity je závislá na materiálu tělesa a platí $0 \leq \epsilon \leq 1$. Je-li $\epsilon = 1$, hovoříme o černém tělese (viz stručné vysvětlení v kapitole Záření rovnovážných zdrojů), nebo dokonalém zářiči. Emisivita ideálního zářiče má hodnotu 1. Běžné materiály mají tuto hodnotu nižší. Emisivita leštěného hliníku je 0,05; zatímco betonu je 0,54. Emisivita vody se rovná 0,98.

1.1.4 Izolace přenosu tepla zářením

Izolace proti přenosu tepla zářením se obvykle provádí pomocí reflexních materiálů. Příkladem může být termoska, která má kromě vakuového obalu, zabraňujícího přenosu tepla vedením, také lesklou část, která zabraňuje přenosu tepla zářením. V případě uchování teplé tekutiny uvnitř termosky se záření z této tekutiny odráží zpět dovnitř. V případě uchování studené tekutiny uvnitř termosky se záření z vnějšího teplého materiálu odráží od jeho povrchu směrem ven a tím je zabráněno ohřevu studené tekutiny uvnitř termosky. Dalším příkladem izolace přenosu tepla zářením jsou stínící clony na sklech oken automobilů, které zabraňují ohřátí interiéru vozidla.

R – hodnota

R – hodnota udává míru odporu proti pronikání tepla. Tuto hodnotu nazýváme tepelný odpor. Vyjadřuje tepelně izolační vlastnosti materiálu, tedy jeho schopnost izolovat. Čím vyšší je R – hodnota, tím pomaleji teplo proniká a schopnost materiálu izolovat je vyšší.

Tepelný odpor je definován tímto vzorcem:

$$R = \frac{h}{\lambda} \quad (4)$$

kde R tepelný odpor [m^2KW^{-1}]

h tloušťka materiálu [m]

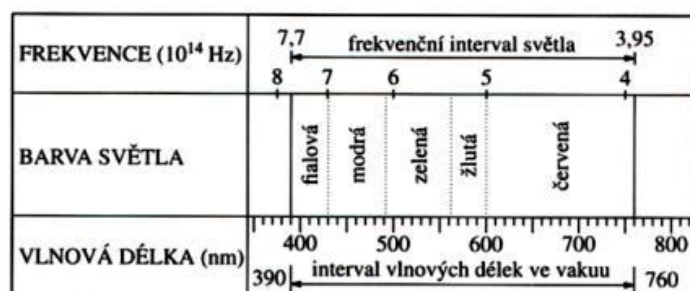
λ tepelná vodivost [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

R – hodnota je úměrná tloušťce materiálu. V případě, že se tloušťka zdvojnásobí, zdvojnásobí se také R – hodnota. V případě, že je tepelná vodivost malá, tepelný odpor, tedy R – hodnota je vysoká. [3]

1.2 Světlo

Světlo je elektromagnetické vlnění, jež má řadu vlastností společných s rozsáhlým oborem elektromagnetického vlnění, která obecně označujeme jako elektromagnetické záření. Elektromagnetické záření ve volném prostoru (vakuu) je možné si představit jako složení rovinných elektromagnetických vln různých frekvencí (resp. různých vlnových délek λ), různých směrů šíření a různých polarizací (obrázek 1). V závislosti na frekvencích (resp. vlnových délkách) rozeznáváme gama záření, optické záření, radiové vlny apod.[1]

Lidské oko vnímá signály různých frekvencí z viditelného pásma jako různé barvy. Samotné viditelné pásmo se dělí na světlo červené barvy (720 – 627 nm), oranžové barvy (627 – 589 nm), žluté barvy (589 – 566 nm), zelené barvy (566 – 495 nm), modré barvy (495 – 436 nm) a fialové barvy (436 – 380 nm).[2]



Obrázek 1 Frekvence, barva a vlnová délka světla [1]

Důležitou charakteristikou světla jako elektromagnetického vlnění je jeho rychlost. Světlo se ve vakuu šíří rychlostí $2,9979245 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost světla ve vakuu je důležitá fyzikální konstanta a její hodnota byla přijata jako přesná a neměnná. V látkovém prostředí je rychlost světla vždy menší a její velikost je ovlivněna nejen vlastnostmi prostředí, ale i frekvencí světla.

Jak již bylo zmíněno, lze jednoduché neboli monochromatické světlo (definované vlnové délky) charakterizovat vlnovou délkou λ , frekvencí f nebo energií E . Ty spolu souvisí známými vztahy:

$$\lambda \cdot f = c \quad (5)$$

$$E = h \cdot f \quad (6)$$

kde $c = 2,9979245 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je již zmiňovaná rychlost světla ve vakuu,

$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ JHz}^{-1}$ je Planckova konstanta.

Podle Planckovy teorie vyslovené v roce 1900 nevyzařuje černé těleso svoji energii spojitě, ale po určitých kvantech energie E . Velikost těchto kvant závisí na frekvenci f záření. Veličina h je významná fyzikální konstanta, označovaná jako Planckova konstanta. Vzhledem k hodnotě této konstanty je však kvantum energie záření nepředstavitelně malé a přenos energie záření se uskutečňuje velkým počtem těchto kvant. Proto se nám vyzařování světla jeví jako spojitý děj.

Planckova konstanta je základní konstanta kvantové fyziky, stejně jako rychlost světla c je základní konstanta relativistické fyziky. Rychlost světla c je velká, ale konečná; kdyby byla nekonečná, nebyla by potřeba teorie relativity. Podobně Planckova konstanta h je malá, ale nenulová; kdyby byla nulová, nebyla by potřeba kvantové teorie. [3]

Odraz a lom světla

Dopadá-li světelný paprsek na rozhraní dvou prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi, potom se světlo na rozhraní těchto dvou prostředí částečně odráží a částečně láme do druhého prostředí. Nastává odraz a lom světla.

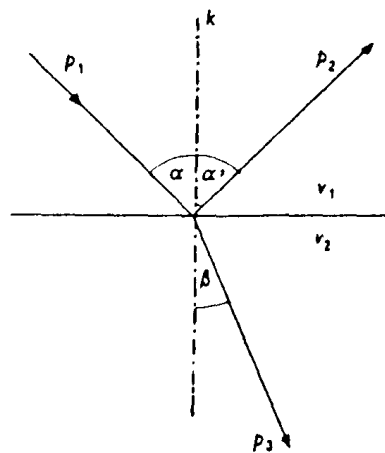
Při odrazu světla dopadá světelný paprsek na rozhraní pod úhlem dopadu α , který paprsek svírá s kolmicí dopadu k , vztyčenou v místě dopadu na rozhraní optických prostředí. V případě, že rozhraní není tvořeno rovinnou plochou, uvažujeme kolmicí na rovinu, v níž leží tečna k zakřivené ploše v místě dopadu světelného paprsku. Paprsek dopadajícího světla a kolmice dopadu leží v rovině, kterou nazýváme rovina dopadu.

Odražené světlo se šíří od rozhraní ve směru určeném odraženým paprskem. Ten svírá s kolmicí dopadu úhel odrazu α' . Vztah mezi úhlem dopadu a úhlem odrazu určuje zákon odrazu světla, který popisuje, že se velikost úhlu odrazu α' rovná velikosti úhlu dopadu

α . Odražený paprsek leží v rovině dopadu. Úhel odrazu nezávisí na frekvenci světla. Proto se paprsky světla různých barev odrážejí stejně (obrázek 2).

Při lomu světla je úhel β , který svírá lomený paprsek s kolmicí dopadu k , je úhel lomu. Směr lomeného paprsku můžeme vyjádřit vztahem:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7)$$



Obrázek 2 Odraz a lom světla [1]

Podíl rychlostí světla v_1 , v_2 v obou prostředích je pro daná prostředí konstantní a vyjadřuje důležitou veličinu, která charakterizuje rozhraní optických prostředí. Nazýváme ji index lomu n pro dané rozhraní. V případě, že prvním prostředím je vakuum (popř. vzduch), je $v_1 = c$. Pro rychlost světla v druhém prostředí zavedeme $v_2 = v$ a index lomu $n = c / v$. [1]

Pro takto definovaný index lomu se také používá označení absolutní index lomu optického prostředí. Z definice indexu lomu vyplývá, že pro vakuum $n = 1$. Tuto hodnotu má přibližně také index lomu vzduchu. Přesněji však platí, že za standardních podmínek, tzn. Při tlaku 101 325 Pa, teplotě 293 K a absolutní vlhkosti 0,9 g.m⁻³, $n_{\text{vzduch}} = 1,000\ 271\ 8$.

U všech optických prostředí kromě vakua je vždy $n > 1$. Například pro rozhraní se vzduchem je index lomu ledu 1,31; vody 1,33; běžného druhu skla 1,5 apod. [3]

Jakmile světlo dopadá na vlákno, část světelného paprsku může procházet, část se absorbuje a část se odráží. Podíl jednotlivých složek ovlivňuje výsledný efekt dopadu světla

na vlákno. Vlákno vykazuje, podobně jako další látky, index lomu. Jeho hodnota je však závislá na směru. Rozdíl indexu lomu vlákna v podélném a příčném směru označujeme jako dvojlom. Index lomu vlákna je závislý na jeho hustotě a je ovlivněn obsahem vlhkosti ve vláknech. Dvojlomy pro různá vlákna jsou uvedena na obrázku 3. [4]

Vlákno	Index lomu v podélném směru vlákna	Index lomu v příčném směru vlákna	Dvojlom vlákna
Bavlna	1,578	1,532	0,046
Rámie a len	1,596	1,528	0,068
Viskóзовé hedvábí	1,539	1,519	0,02
Acetátové vlákno	1,476	1,47	0,006
Triacetát	1,474	1,479	-0,005
Vlna	1,553	1,542	0,011
Hedvábí	1,591	1,538	0,053
Kaseinové vlákno	1,542	1,542	0
Vicara (zeinové vlákno)	1,536	1,536	0
Nylon	1,582	1,519	0,063
Terylenové polyesterové vlákno	1,725	1,537	0,188
Orlon akrylové vlákno	1,500	1,500	0
Acrilan akrylové vlákno	1,52	1,524	-0,004
Polyethylenové vlákno	1,556	1,512	0,044
Skleněné vlákno	1,547	1,547	0

Obrázek 3 Dvojlomy různých vláken [2]

1.2.1 Klasické zdroje světla (optického záření)

Zdroje optického záření jsou zařízení nebo objekty, v nichž dochází k přeměně různých forem energie na energii elektromagnetického záření v pásmu optických frekvencí tj. s vlnovými délkami ve vakuu v pásmu desítek nanometrů až zlomků milimetrů.

Existují přirozené (přírodní) a umělé zdroje optického záření. K přirozeným zdrojům patří Slunce, hvězdy, atmosférické výboje a luminiscenční zdroje živočišného a rostlinného původu. Umělé zdroje je možné rozdělit do dvou skupin na klasické zdroje (nekoherentní) a nové koherentní zdroje reprezentované především lasery.

Nekoherentní zdroje bývají tvořeny velkým množstvím elementárních zářičů (atomů, iontů, molekul apod.), které vysílají záření v procesech spontánní emise, navzájem nezávisle. Frekvence záření je dána frekvencemi kvantových přechodů soustav, ze kterých je látka

složena. Mezi fázemi jednotlivých vysílaných vln neexistuje žádný vztah. Výsledné elektromagnetické pole mnoha zářičů má charakter náhodného signálu – šumu.

Tyto klasické zdroje je možné rozdělit na tepelné (termodynamicky rovnovážné) a luminiscenční (nerovnovážné). K tepelným zdrojům patří každé dostatečně ohřáté těleso (např. plamen, žárovka), idealizovaným zdrojem je tzv. černé těleso. Luminiscenční zdroje jsou založeny na buzení luminiscence plynů nebo pevných látek, uskutečňované elektrickým výbojem v plynu (obloukovým, doutnavým, bezelektrodovým), optickým zářením jiného zdroje, elektronovým svazkem apod.

1.2.2 Záření rovnovážných zdrojů

Černé těleso

Černé těleso je pomyslný objekt nacházející se ve stavu termodynamické rovnováhy, který pohlcuje všechno dopadající elektromagnetické záření nezávisle na frekvenci. Vyzařování černého tělesa je plně popsáno termo-dynamicky rovnovážným řízením. Všechny vlastnosti vysílaného záření plynou z jeho teploty. Spektrální vlastnosti a intenzity vyzařování jsou dány Planckovým zákonem.

Pro kalibrační účely se černé těleso realizuje jako otvor dutiny s černě obarvenými stěnami. Záření vstupující do dutiny se při opakovaných odrazech od stěn dutiny prakticky úplně pohlcuje a záření vystupující z otvoru má vlastnosti rovnovážného záření, daného teplotou stěn dutiny.

Záření slunce. Žárovka

Slunce je nejstarším zdrojem optického záření, který člověk využívá. Záření Slunce lze popisovat jako rovnovážné záření černého tělesa. Energie Slunce pochází z termojaderné fúze, která začíná slučováním jader vodíku, tj. protonů. Protože se protony kvůli svému elektrickému náboji navzájem odpuzují, nemůže ke sloučení dojít u protonů majících jen střední rychlost. Ty totiž nemají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby se přiblížily na takovou

vzdálenost, kde přitažlivé jaderné síly převládnu nad odpudivými silami elektromagnetickými. Avšak velmi rychlé protony ze vzdáleného konce rozdělení tuto energii mají, sloučení může proběhnout – proto slunce svítí.

Slunce vyzařuje energii s výkonem $3,9 \cdot 10^{26}$ W a činí tak již několik miliard let. Odkud se bere všechna ta energie? Chemické hoření můžeme vyloučit; kdyby se Slunce skládalo z uhlí a kyslíku – ve vhodném poměru pro spalování – vydrželo by pouze nějakých 1000 let. Jiná možnost je, že se Slunce pomalu smršťuje vlivem vlastních gravitačních sil. Přeměnou gravitační potenciální energie na tepelnou energii by si Slunce mohlo udržovat svou teplotu a přitom stále zářit. Výpočet ale ukazuje, že ani tento mechanismus nevyhovuje; vedl by také k příliš krátké době života Slunce, nejméně 500 krát. Takže zůstává pouze termojaderná fúze. Slunce spaluje nikoli uhlí, ale vodík, a to v jaderné peci, nikoli atomové neboli chemické.

Jaderná fúze ve Slunci je vícestupňový proces, ve kterém je spálen vodík na helium; vodík je tedy „palivo“ a helium „popel“.

Světelným zdrojem žárovky je rozžhavené tělísko. Ohřátí je způsobeno průchodem elektrického proudu. Tělísko (vlákno) bylo původně z uhlíku, nyní je z wolframu (tento kov má nejvyšší bod tání). Vlákno bývá umístěno ve vakuu nebo v netečném plynu (dusík, argon, krypton), aby mohlo být ohříváno až na teploty, kterých maximum výkonu vysílaného záření spadá do oblasti optických frekvencí.

1.2.3 Záření nerovnovážných zdrojů

Luminiscence

Luminiscence je optické záření (plynu, kapaliny, pevné látky), jehož termodynamická rovnováha byla porušena vnějším účinkem – buzením. Přesněji řečeno, luminiscence je jen část vysílaného záření, konkrétně přebytek nad jejím tepelným zářením, který opouští látku s jistým zpožděním po budícím účinku. Luminiscence je na rozdíl od tepelného záření nezávislá na teplotě, tj. vyzařují ji i studené objekty, takže bývá nazývána studeným světlem. V přírodě se s luminiscencí setkáváme v podobě polární záře, světélkování hmyzu, minerálů nebo zahnívajícího dřeva.

Luminiscenci lze třídit podle způsobu buzení na fotoluminiscenci, radioluminiscenci, katodoluminiscenci, elektroluminiscenci, triboluminiscenci, chemiluminiscenci aj. Podle doby trvání bývá luminiscence dělena na fluorescenci a fosforescenci. Fluorescence je luminiscence s krátkou dobou dosvitu (několik mikrosekund) po skončení účinku budícího zdroje. Fosforescence pokračuje ještě dlouho po skončeném buzení. [5]

1.3 Laser

Slovo „laser“ je zkratka pro „light amplification by the stimulated emission of radiation“ (zesilování světla stimulovanou emisí záření), z čehož vyplývá, že klíčem k činnosti laseru je stimulovaná emise. Einstein tento pojem zavedl již v roce 1917. I když byl první laser uveden do provozu až roku v roce 1960, základní práce na jeho vývoji se datují o několik desetiletí dříve.

1.3.1 Princip fungování laserů

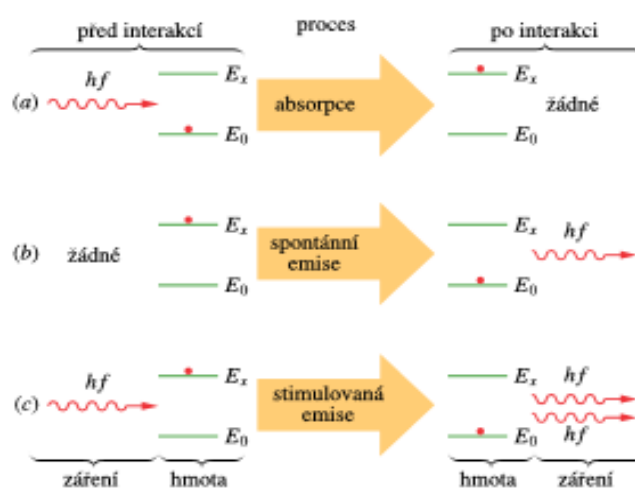
Předpokládejme, že se izolovaný atom může nacházet buď ve stavu s nejnižší energií E_0 (jeho základní stav), nebo ve stavu s vyšší energií E_x . Uveďme si tři možné způsoby, jakými se atom může dostat z jednoho z těchto stavů do druhého (obrázek 4).

Prvním způsobem je absorpce. Je-li atom v základním stavu umístěn do vnějšího elektromagnetického pole o frekvenci f , může z tohoto pole absorbovat určité množství energie hf a dostat se do vyššího energetického stavu. Ze zachování energie plyne:

$$hf = E_x - E_0 \quad (8)$$

Druhým způsobem je spontánní emise. Je-li atom v excitovaném stavu a vnější pole je nulové, po nějaké době přejde do svého základního stavu za současné emise fotonu o energii hf . Tento proces nazýváme spontánní emise – spontánní proto, že tato událost není spouštěna žádným vnějším vlivem. Tímto způsobem se například vytváří světlo v obyčejné žárovce.

Střední doba života atomu v excitovaném stavu, tedy doba, než se uskuteční spontánní emise, je obvykle kolem 10^{-8} s. Pro některé excitované stavy však může být tato střední doba až 10^5 krát delší. Tyto stavy s dlouhou dobou života nazýváme metastabilní; ty pak hrají důležitou roli při činnosti laseru.



Obrázek 4 Interakce záření s hmotou v procesu (a) absorpce, (b) spontánní emise a (c) stimulovaná emise. Atom je znázorněn jako červená tečka; nachází se buď ve svém nižším kvantovém stavu s energií E_0 , nebo ve vyšším kvantovém stavu s energií E_x . [3]

Třetím způsobem je stimulovaná emise. Foton o energii hf může stimulovat atom, aby přešel do svého základního stavu. V tomto procesu atom emituje další foton, jehož energie je rovněž hf . Tento proces nazýváme stimulovaná emise – stimulovaná proto, že tato událost je spouštěna vnějším fotonem. Emitovaný foton je v každém ohledu identický se stimulujícím

fotonem. Vlna spojená s tímto fotonem má stejnou energii, fázi, polarizaci a směr šíření. Za vhodných podmínek lze spustit řetězovou reakci podobných stimulujících procesů jediným počátečním fotonem o správné frekvenci. Právě tímto způsobem je vytvářeno laserové světlo.

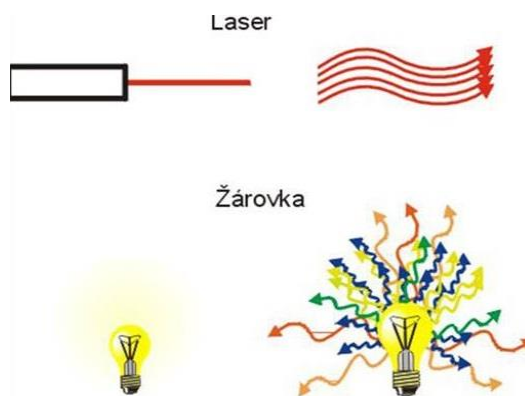
1.3.2 Vlastnosti laserového světla

Laserové světlo je obdobně jako světlo obyčejné žárovky emitováno tehdy, přechází-li atom z kvantového stavu s vyšší energií do kvantového stavu s nižší energií. V laserech však, na rozdíl od jiných zdrojů světla, atomy vyzařují společně a vytvářejí tak světlo neobyčejných vlastností.

Laserové světlo je vysoce monochromatické. Světlo obyčejné žárovky pokrývá spojitou oblast vlnových délek a jistě není monochromatické. Spektrální čáry z neonové zářivky jsou monochromatické v poměru 1:10⁶. Avšak v případě laserů je ostrost čáry mnohonásobně vyšší – může dosahovat hodnot až 1:10¹⁵.

Laserové světlo je vysoce koherentní. Jednotlivé vlny (vlnová klubka) laserového světla mohou být několik stovek kilometrů dlouhé. Pokud dva rozdělené svazky, které prošly po oddělených drahách takové vzdálenosti, se opět spojují, „pamatují si“ vše o svém společném původu a mohou vytvářet interferenční proužky. Odpovídající koherenční délka vlnových klubek obyčejné žárovky je zpravidla menší než jeden metr.

Laserové světlo je vysoce směrové. Laserový svazek má malou rozbíhavost; odchyluje se od přesné rovnoběžnosti pouze v důsledku difrakce na výstupní cloně laseru. Například laserový pulz pro měření vzdálenosti Země – Měsíc vytváří na povrchu měsíce stopu, jejíž průměr je pouhá jedna miliontina průměru Měsíce. Světlo z obyčejné žárovky může rovněž pomocí čoček vytvořit téměř rovnoběžný svazek, ale jeho rozbíhavost je mnohem vyšší než svazku z laseru. Každý bod vlákna žárovky totiž vyzařuje svůj vlastní, oddělený svazek a úhlová rozbíhavost takto složeného celkového světelného svazku je dána geometrickými rozměry vlákna (obrázek 5).



Obrázek 5 Srovnání žárovky a laseru [13]

Laserové světlo lze ostře zfokusovat. Pokud dva světelné paprsky přenášejí stejné množství energie, pak ten z nich, který může být zaostřen do menší stopy, bude mít v této stopě větší intenzitu. Laserový svazek může být fokusován do stopy tak malé, že v ní lze snadno dosáhnout intenzitu 10^{17} Wcm^{-2} . Naproti tomu kyslíko-acetylenový plamen pro svařování dosahuje intenzit jen kolem 10^3 Wcm^{-2} .

1.4 Využití laserů

Využití laserů je mnohostranné. Nejmenší lasery, používané k přenosu dat optickými vlákny, mají jako aktivní prvek krystal polovodiče rozměru špendlíkové hlavičky. Přestože jsou malé, generují světlo o výkonu kolem 200 mW. Největší lasery, používané při výzkumech jaderné fúze, v astronomii a ve vojenských aplikacích, zaplňují celé budovy. Největší z nich generují krátký pulz laserového světla o výkonu 10^{14} W . To je o dva řády více, než je celková kapacita výroby elektřiny v USA. Aby nedošlo v průběhu pulzu k výpadku elektrického proudu v celé zemi, je energie potřebná k jeho uskutečnění akumulována po delší dobu mezi jednotlivými pulzy.

Lasery se používají například při čtení čárových kódů v obchodech, při výrobě a čtení kompaktních disků, ve zdravotnictví při různých operacích, k vyměřování, pro stříhání textilií v oděvním průmyslu (vrstva několik stovek materiálů současně), při svařování karoserií automobilů nebo při výrobě hologramů. [1]

1.4.1 Laserová technologie ve vojenství

První experimenty, zaměřené na výrobu laserových zbraní byly uskutečněny v 60. letech 20. století. Přestože nebyla vyrobena laserová zbraň, laserová technologie má ve vojenském průmyslu již své praktické využití. Nejvýznamnější použití laserů pro armádní účely představuje v dnešní době laserové zaměřování. Zaměřovač může být umístěn přímo na hlavní zbraně (odstřelovacích pušek i těžkých děl), případně slouží k navádění střel, například pro protiletadlové rakety.

Konkrétním příkladem laserové zbraně, užívané v americké armádě je nesmrtící zbraň GLEF (Green Laser of Escalation of Force), která se používá k zastrašení, zastavení, či dočasnému vyřazení protivníka z boje. Tato zbraň je vhodná především k zastavování podezřelých osob bez použití klasických zbraní a umožňuje zabránit civilním ztrátám na životech. GLEF využívá zeleného laserového světla, na které lidské oko reaguje citlivěji, než např. na červené.

Výhody laserových zbraní spočívají v jejich dosahu, rychlosti zaměření i střelby, přesnosti a efektivitě. Výstřel z výkonného laserového děla je o mnoho řádů levnější a kadence i počet střel, které je zbraň schopná vystřelit bez doplnění zásobníku, mnohem vyšší než u dělostřelecké artilérie stejné velikosti. Hlavní nevýhoda těchto zbraní je složitá technologie jejich výroby. Doposud nebyly vyvinuty laserové zbraně dostatečně výkonné a zároveň malé a spolehlivé.

1.4.2 Laserová technologie v lékařství

Specifické vlastnosti laserového paprsku našly záhy po svém objevení uplatnění v lékařství. V současné době je rozsah použití laseru v medicíně velmi široký a jeho aplikací stále přibývá. Hlavním důvodem, proč má laser významné využití především v chirurgii, je možnost koncentrace energie záření na nepatrné ploše, která se ve tkáních pohlcuje a mění v teplo. Laserové operace jsou bezdotykové a jejich výsledkem je ostře ohraničený řez tkání bez poškození okolí. Současně dochází ve tkáni ke koagulaci – teplem se uzavrou konce cév, takže krvácivost rány se výrazně sníží. Rozvoj vláknové optiky umožnil přenos laserového záření optickými vlákny také do vnitřních orgánů pacienta.

Dalším odvětvím, ve kterém se využívá laserový paprsek, je oční lékařství. Konkrétně se jedná o velmi složité a citlivé operace, při kterých je působením tepla laseru „přichycena“ odchlípená oční sítnice, odstraněn zelený zákal, či vyléčeno postižení sítnice u pacientů s diabetem. Nejpopulárnějšími aplikacemi laseru v očním lékařství jsou operace očních vad (krátkozrakost, dalekozrakost) excimetrovým laserem (obrázek 6). Podstatou uvedených očních vad bývá obvykle nepřiměřené zakřivení rohovky vzhledem k velikosti oka. Laserovým paprskem se tvar rohovky upraví a vada je zcela nebo částečně odstraněna.

Velmi rozšířené je použití laserových přístrojů v dermatologii nebo v kosmetických salonech. Paprsek výkonného erbiového laseru, řízeného počítačem, přesně odstraní tkáň, která je v daném místě nežádoucí. K jejímu „odpařování“ dochází ve velmi tenkých vrstvičkách, které mají tloušťku jen několik tisícín milimetru. K tomuto laserovému ošetření není třeba používat místní znecitlivění. Laserem tak lze odstranit mateřská znaménka, drobné bradavice, nebo vyhladit jizvy.

Stále běžnější je použití laserů i v dalších lékařských oborech, jako je například stomatologie, gynekologie, angioplastika nebo onkologie.



Obrázek 6 Využití laseru při operaci oka [17]

1.4.3 Laserová technologie ve strojírenství

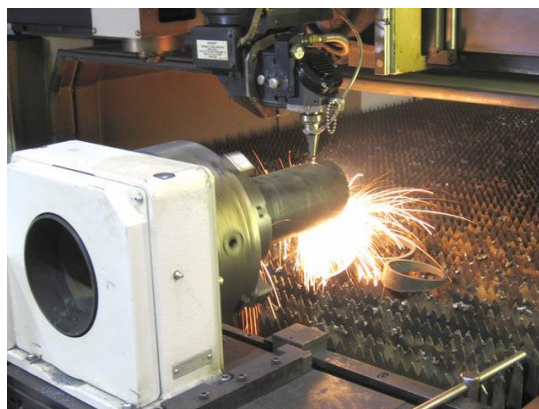
Také ve strojírenství patří v současné době laserové technologie mezi nejprogresivnější způsoby působení člověka na materiál ve výrobním procesu. Pomocí laseru je možné podstatně zvýšit kvalitu, technickou úroveň i produktivitu práce.

Prvním příkladem využití laseru ve strojírenství je tepelné zpracování (obrázek 7). U součástí strojírenských zařízení s vysokou životností jsou často kladeny rozdílné požadavky na povrch výrobku a na jeho jádro. Zatímco povrch musí být odolný proti opotřebení, svou chemickou stálostí proti korozi, jádro musí odolávat mechanickému namáhání. Právě tyto požadavky umožňuje splnit transformační zpevnění funkčních ploch součástí laserem. Mezi nejdůležitější přednosti této laserové technologie patří malé tepelně ovlivněné pásmo, kde nedochází k žádné deformaci, zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy od mikrometrů k milimetrům, snížení ekologického zatížení technologického provozu z důvodu absence chladícího prostředku (odpadá možnost chemického znečištění výrobku) a možnost zpevňování laserem i v těžko dostupných místech součástí.

Dopadá-li laserový paprsek po určitou dobu na kovový povrch, absorbovaná energie paprsku se mění v teplo, které zahřívá zpracovanou součást. Tento proces můžeme charakterizovat třemi základními parametry:

- výkonem laserového záření dopadajícího na povrch součásti
- plochou laserového svazku dopadajícího na povrch součásti
- rychlostí vzájemného posuvu součástí a dopadajícího laserového svazku

Míra tepelného ovlivnění materiálu je dána hustotou dopadajícího svazku laserového záření a dobou jeho působení, které lze určit z uvedených základních parametrů.



Obrázek 7 Laserové opracování výrobku [17]

Druhým příkladem využití laseru ve strojírenství je svařování. Při tavném svařování je pro vytvoření svarového spoje velmi důležitý minimální energetický vstup. Čím nižší je energie vstupující do technologického procesu, tím menším deformacím materiál podléhá. Laser je schopen dodávat vstupní energii ve velmi zfokusované formě, což umožňuje vytvořit hluboký a úzký svar s minimálním teplotně ovlivněným pásmem. Mezi další výhody laserového svařování patří malá setrvačnost laserového paprsku, svařování laserem je tedy vhodné pro automatizaci, probíhá na vzduchu bez použití vakua, nedochází při něm k žádnému znečišťování svaru materiálem elektrod a pomocí laseru lze svařovat i na těžko dostupných místech.

Třetí strojírenskou technologií, při které je používán laser, je řezání (dělení). Při laserovém dělení, umožňuje zfokusovaný laserový paprsek s mimořádně vysokou koncentrací výkonu dělit materiály a slitiny prakticky nezávisle na jejich tepelně-fyzikálních vlastnostech. Dosahuje se přitom velmi malá šířka řezu s minimálním tepelně ovlivněným pásmem. Při laserovém dělení nedochází k mechanickému působení na zpracovávaný materiál a vznikají jen minimální deformace. Proto je možné dělit materiály s vysokou přesností, a to i materiály velmi lehce deformovatelné nebo křehké.

Metody řezání laserem lze rozdělit na tavné, oxidační a sublimační. U tavného řezání laserem se dělený materiál lokálně nataví a vzniklá natavenina se od základního materiálu odděluje proudem vysoce čistého inertního plynu, který se do místa řezu přivádí, ale na samotném řezání se nepodílí. Ve srovnání s ostatními metodami řezání laserem lze u tohoto způsobu docílit jen nižší rezné rychlosti. Maximální rezná rychlost stoupá lineárně s výkonem laseru a snižuje se přibližně lineárně s tloušťkou řezaného materiálu a s jeho teplotou. Laserový paprsek je jen velmi málo absorbován. Tento způsob je vhodný především k vytváření neoxidovaných řezů kovových materiálů, jako např. nerezových ocelí, hliníku, mosazi, mědi a pozinkovaného plechu.

Oxidační řezání laserem se od tavného liší pouze použitím kyslíku jako rezného plynu. Vzájemným účinkem kyslíku s roztaveným povrchem kovu vzniká exotermní reakce, která má za následek další ohřívání materiálu. V důsledku tohoto efektu lze dosáhnout u konstrukčních ocelí vysokých rychlostí řezu, řez je však širší a horší kvality, s vyšší drsností a s větším tepelně ovlivněným pásmem. Tento způsob není vhodný pro zhotovování ostrých geometrických tvarů, malých otvorů, apod. Určitým východiskem je přechod na pulzní provoz laseru, kdy se řezaný materiál v mezeře mezi jednotlivými pulzy ochladí a nenastává exotermní

reakce. Další vylepšení kvality řezu je možné dosáhnout regulací výkonu laseru, který musí být optimalizován dle tloušťky materiálu. Řezná rychlost je pak omezena sníženým výkonem laseru.

Sublimační způsob řezání, při kterém se materiál v místě řezu odpařuje, se v dnešní době velmi málo používá. Pro minimalizaci tavné zóny, která vzniká na hraně řezu, je nutná vysoká hustota energie laserového paprsku. Zároveň se musí kontrolovat tloušťka řezaného materiálu, která nesmí překročit průměr paprsku, aby páry materiálu znovu nezkondenzovaly a nesvařily řez. Tato omezení platí u materiálů, u nichž vzniká tekutá fáze. U materiálů, které se netaví, např. dřevo, keramika apod., omezovací faktor tloušťky neplatí. Sublimační řezání vyžaduje pečlivé nastavení optiky v závislosti na tloušťce materiálu. Maximální řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu.

1.4.4 Laserové radary a měření vzdáleností

Další uplatnění našel laser při měření rychlosti. Tento princip měření rychlosti funguje tak, že si policista v hledáčku vybere vozidlo, které chce změřit, poté stlačí spoušť a laser vyšle proti tomuto vozidlu infračervené impulzy o vlnové délce 904 nm. Tyto impulzy se od vozidla odrážejí zpět k měřiči. Na základě odražených impulzů laser vypočítá rychlost vozidla. Pomocí ProLaseru III je možné změřit rychlost jednotlivých vozidel i v koloně, protože laserový paprsek je velice úzký. Typicky se zaměřuje evidenční číslo automobilu (RZ), anebo na světlomety. Vzdálenost, na kterou je laser schopný měřit je až 1000 m. Vozidlo světlé barvy je lépe změřitelné než vozidlo tmavé. Laser umí také natočit případně vyfotografovat měřený automobil. Typická vzdálenost měření je 100 – 300 m. Technické parametry všech v ČR používaných laserových pistolí jsou si velice podobné.

Jak již bylo v této práci uvedeno, laserový paprsek se šíří přímočaře a má, na rozdíl od světla z běžných zdrojů, minimální rozbíhavost. Je proto ideálním prostředkem při zaměřování a vytyčování objektů na stavbách nebo v geodézii.

1.4.5 Laserové gravírování

Způsob vzorování materiálu pomocí laseru se nazývá laserové gravírování. Touto technikou vytváříme na povrchu materiálu motiv nebo vzor. Laserovým paprskem se dá toto zdobení povrchu materiálu vytvářet s vysokou přesností. Díky možnosti nastavení různých intenzit laseru je možné gravírovat velké množství materiálů, jako například sklo, plast, dřevo nebo kůži. Vytvořený vzor vyniká svou přesností, ale také trvanlivostí.

Motiv vzniká tepelným působením laserového svazku, ve chvíli, kdy je změněna nebo odstraněna vrstva materiálu na jeho povrchu do určité hloubky. Výhodou gravírování je bezkontaktní popisování daného materiálu, trvanlivost (laserové vzory nikdy nevyblednou) a na rozdíl od jiných technik vzorování, jako jsou například tisk, leptání či bělení ekologičnost. U tohoto procesu odpadá praní a sušení.

1.4.6 Laserová technologie v textilních oborech

Stejně jako v jiných oborech, tak i v textilu jsou lasery významné z důvodu čtyř základních vlastností laserového záření. Jsou to: vysoká směrovost (rovnoběžnost svazku laserového záření), velký stupeň mono chromatičnosti (záření o jedné vlnové délce), koherence, která umožňuje interferenci a difrakci a vysoká intenzita laserového svazku.

Lasery se uplatňují ve vláknové technologii, pro významné aplikace hrají úlohu křemenná vlákna, která vyžadují k tažení vysoké teploty. Tento proces je realizován soustředěním laserového svazku čočkou s ohniskem na konci tyčinky z taveného křemene a z něj se vlákno táhne rychlostí, která je určena množstvím roztaveného křemene. Další možností je využití laserového záření při tvorbě kadeřených vláken, při pojení textilií v přízi či v kabílku.

Zvláště výhodné je použití laserového záření při pojení či vytváření vzorů plošných textilií (obr. 8). Pro tyto technologie byla předložena řada publikací a patentů.

Největší využití laserové technologie v textilním odvětví je využíváno při oddělování textilií pro konfekční účely. Ukázalo se, že oddělování textilií za použití CO₂ laseru středního výkonu do 500 W lze provádět velkou lineární rychlostí až 20 m.s⁻¹. Rozřešení problému

s oddělováním více vrstvených náloží listů dělají z laserové technologie nejproduktivnější způsob oddělování textilií. Její rychlost je omezena skenovací rychlostí pohybu laserového svazku po textilií, která je uskutečňována prozatím mechanicky. Pro spojování textilií byl vytvořen firmou Bronson také laserový šicí stroj. [6]



Obrázek 8 Textilie vzorovaná laserem [14]

1.4.7 Gravírování denimu

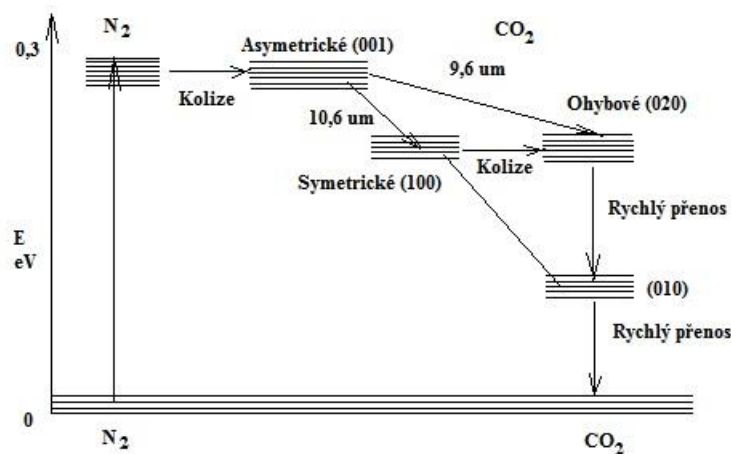
Technika gravírování se používá také při zdobení textilních materiálů, především denimu. V místech ozáření denimové textilie laserovým paprskem dochází ke změně odstínu (blednutí) bez použití chemikálií. Efektu kresby je dosaženo vypálením stopy do povrchu textilie.

Vzhledem k tomu, že poptávka po denimu a výrobcích z něj je stále vysoká, setkáváme se na trhu s oděvními textiliemi s denimem, který je různě vzorován, zdoben, prořezáván a záměrně povrchově měněn. Tyto úpravy se provádějí kartáčováním, pískováním, broušením nebo bělením pomocí chemikálií. Poslední zmiňovaná operace – bělení ovšem zatěžuje životní prostředí, konkrétně dochází ke znečišťování odpadních vod. Také z tohoto důvodu je stále více používáno gravírování laserem.

Při použití laseru ke gravírování denimu jsou způsoby reakce tkanin ovlivněny několika hodnotami. Jedná se především o intenzitu laserového paprsku, jeho rozlišení a nastavené doby působení. Regulování intenzity laserového paprsku může ovlivnit množství odstraněných povrchových vláken (které způsobí změny v omaku textilie) a barvu na povrchu tkaniny.

1.5 CO₂ laser

CO₂ laser vyzařuje na vlnové délce 10,6 μm s výkonem kolem 1 kW i více. Proto se ho hlavně používá při obrábění, svařování, řezání a tepelném zpracování kovů. Pro větší účinnost laseru je použito směsi plynů v poměru CO₂ : N₂ : He = 0,8 : 1 : 7. Pumpování zajišťuje elektrický výboj při napětí 17 kV a tím dochází ke změně vibračních stavů molekuly.



Obrázek 9 Energetické hladiny CO₂ laseru

Molekula dusíku se snadněji excituje a energetická hladina jejího prvního vibračního stavu je velmi blízko hladině (001) molekuly CO₂. Převážnou část energie absorbuje dusík a zbývající část molekula CO₂, přičemž přechází ze základního stavu (000) do horního stavu (001). Molekuly dusíku kolidují s molekulami CO₂ a tím dále excitují. Molekula přechází z vibračního stavu (001) do stavů (100) nebo (020) a emitované IČ záření má vlnovou délku 10,6 μm a 9,6 μm. Další přenosy (100) do (010), (020) do (010), (010) do (000). Potom nedochází k akumulaci stavů (100) a je tak zajištěna populační inverze stavů molekul (001). Energetické hladiny CO₂ laseru jsou na obrázku 9.

Lasery velkých výkonů (> 1 kW) využívají k ionizaci elektronového paprsku. V komoře vzniká horký stlačený plyn, který se nadzvukovou adiabatickou expanzí přes úzkou plochou trysku do vakuovaného prostoru rychle zchladí a tím je dosaženo vysoké populační inverze. Výstupní svazek lze fokusovat čočkami ze selenidu zinečnatého, které vykazují malou absorpci na vlnové délce 10,6 μm. Dříve se okénka i čočky vyráběly z chloridu sodného nebo draselného. Pro jejich hygroskopické vlastnosti se od toho upustilo.

Laserové hlavy jsou řízeny počítačovým programem a je tak dosahováno velmi přesného opracování materiálu, bez dalších finálních úprav výrobku. Řezací hlavou zpravidla proudí plyn – kyslík, dusík nebo argon. Kyslíku se používá pro řezání nízkolegovaných ocelí, dusíku pro řezání dřeva, papíru, plastů a keramiky. Drahého argonu se výhradně používá pro zpracování vysoce reaktivních materiálů, titanu, hořčíku a jejich slitin. Tloušťka řezaného ocelového plechu je kolem 20 mm.

Teplota rezonátoru je kolem 250°C, a proto jsou tyto lasery chlazeny průtokem studené vody. Rovněž plyn CO₂ proudí trubicí v axiálním směru rychlostí až 400 ms⁻¹. Lasery s větším výkonem využívají též příčného proudění plynu, což je účinnější. [7]

1.6 Bezpečnost práce s lasery

Laserové zařízení působící na lidskou tkáň může způsobit různý stupeň jejího poškození. Největší nebezpečí představuje laser pro lidské oko, menší, ale rozhodně ne zanedbatelné, pro lidskou kůži.

Poškození tkáně teplem, způsobeným laserovým zářením, je závislé na typu tkáně, na intenzitě dopadajícího laserového svazku, na velikosti zasažené (ozářené) plochy a době ozáření. S ohledem na uvedené aspekty, ale také z důvodu velkého rozsahu možných výkonů laserového zařízení mohou být teplotní efekty na tkáni neznatelné, kdy nedojde k porušení tkáně, ale může dojít k jednoduchému zarudnutí kůže, jejímu spálení, odpaření a v extrémních případech až k úplnému roztržení tkáně.

1.6.1 Rozdělení laserů podle nebezpečnosti účinků jejich záření

I. třída: lasery všech vlnových délek, jejichž doba emise záření a maximální výkon je od 200 do 400 nm a dále všechny plně zakrytované lasery, jejichž kryt je upraven tak, aby jej nebylo možno otevřít bez použití nástrojů a při jeho otevření došlo k přerušení chodu laseru.

II. třída: lasery emitující záření ve spojitém režimu ve viditelné části spektra (400 až 700 nm), u nichž výkon vystupujícího záření nepřekračuje 1 mW, avšak překračuje nejvýše přípustné hodnoty pro I. třídu.

III. třída je rozdělena na dvě části: III.a: lasery emitující záření ve spojitém režimu ve viditelné části spektra, jejichž výkon nepřekračuje $5 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ a výkonová hustota záření nepřekračuje hodnotu $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wcm}^{-2}$. III.b: lasery, u kterých nejvyšší výkonem překračuje limitní hodnoty a nespádají do tříd I. a II. a které nemohou bez fokusování svazku překročit nepovolené hodnoty.

IV. třída: lasery, jejichž výkon nebo vyzařovaná energie přesahuje limitní hodnoty stanovené pro třídu III. b a lasery, které mohou způsobit nebezpečný difuzní obraz s výkonem od 500 mW nebo energií nad 10 J.cm^{-2} . [5]

Základními ochrannými prostředky při práci na laserovém zařízení jsou bílý plášť a speciální ochranné brýle. Z obecných pokynů platí, že neškolená osoba nesmí: odstraňovat kryty a ladit optickou dráhu, vkládat odrazivé předměty do dráhy paprsku, zasahovat do zdrojů a elektroinstalace zařízení, vkládat hořlavé látky a tlakové lahve do dráhy paprsku a zacházet se zařízením jinak, než je uvedeno v manuálu. Každý, kdo zachází s laserovým zařízením je povinen řídit se instrukcemi a provozním řádem zařízení, dále je povinen učinit vše pro to, aby dodržel bezpečnost svou a lidí v okolí. Musí být proto seznámen s riziky a být způsobilý pro vykonávanou činnost. Na obrázku 10 je bezpečnostní označení laserového pracoviště. [8]



Obrázek 10 Označení laserového pracoviště [15]

1.6.2 Místní účinky termické energie

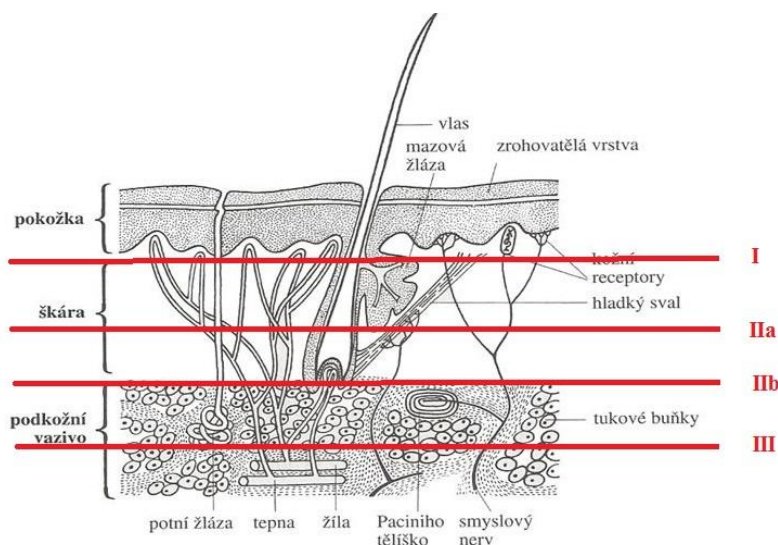
Funkce a stavba kůže

Jak již bylo v této práci zmíněno, při práci s laserovým zařízením je kromě očí ohrožena lidská kůže.

Kůže je největším orgánem těla (cca 2 m² u dospělého muže a cca 0,2 m² u novorozence). Jakýkoli úraz, který porušuje integritu kůže, ohrožuje schopnost jedince existovat v zevním prostředí. Kůže tvoří estetický obal pro lidské tělo, určuje identitu jedince, tvoří ochranný obal pro vnitřní orgány, zabraňuje ztrátám tekutin (chrání před dehydratací organismu), zprostředkovává termoregulaci, udržuje tělesnou teplotu, funguje jako nejvýznamnější ochranný mechanismus proti mikrobiální invazi a v neposlední řadě působí jako senzorický orgán, tj. rozlišuje mezi stimuly bolesti, dotyku a tepla a poskytuje ochranu před mechanickým a termickým poškozením.

Ztráta uvedených funkcí kůže je v přímé nebo nepřímé souvislosti s komplikacemi, a to jak časnými, jež ohrožují život bezprostředně, tak pozdními, bránícími postiženému vrátit se do aktivního života.

Normální lidská kůže sestává z epidermis (cca 0,15 mm), jejíž horní třetinu tvoří rohová vrstva (stratum corneum), a z dermis (corium), jejíž tloušťka je rozdílná (cca 0,5 až 0,7 mm podle lokalizace).

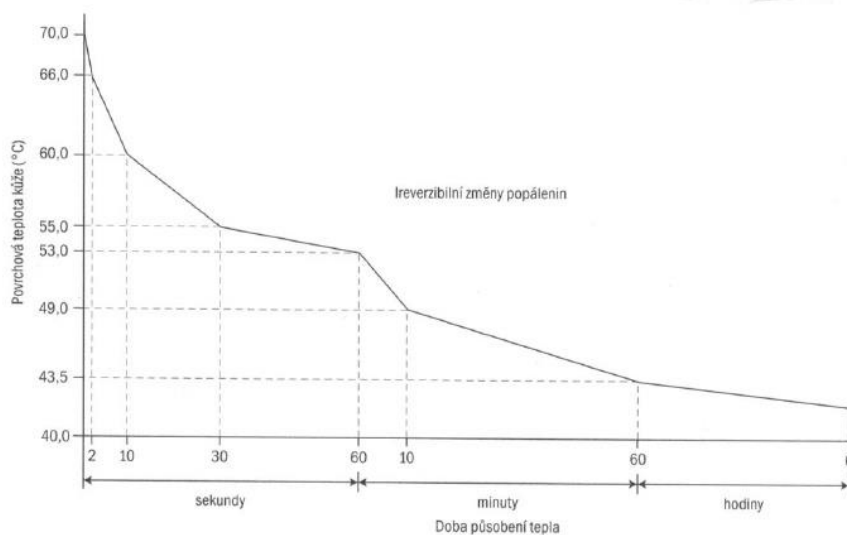


Obrázek 11 Mikrostruktura kůže vzhledem k hloubce poškození [5]

Na obrázku 11 jsou vyznačeny stupně postižení lidské kůže. I. stupeň – povrchové poškození zasahující potní žlázy, mazové žlázy a vlasové folikuly. II. stupeň: IIa – povrchové částečné postižení procházející pod mazovými žlázkami, ale „interface“ mezi korielem a tukem není porušen. IIb – hluboké částečné postižení procházející potními žlázkami a kořeny vlasových folikulů, „interface“ mezi korielem a tukem je porušen. III. stupeň – hluboké postižení v celé tloušťce sahající do podkožního tuku.

Uvažujeme-li o působení tepla nebo jiné energie na kůži, musíme rozlišit:

- Přímé poškození kůže noxou a komplikace a děje, které nastávají v kůži jako odpověď na úraz;
- Funkční odezvu – prospěšnou na adaptaci
- Dysfunkční odezvu – bránící adaptaci, spojenou s reakcemi, jež vedou k sebezničení organismu;
- Děje a způsoby léčby, které byly zjištěny na základě experimentálních modelů, ale nelze je aplikovat na člověka, což je v popáleninové problematice zvláště významné.



Obrázek 12 Závislost teploty kůže na délce expozice [5]

Maximální snesitelná kontaktní teplota, znázorněná na obrázku 12, je 43,5 °C (u lidských dobrovolníků). Při teplotě 44°C do doby 6 hodin působení je zotavení buněk ještě možné, ale při delší expozici nastávají ireverzibilní změny celé epidermis až k bazálním buňkám a ztráta epidermis. Vlivem termické noxy teplota vrstev pod kůží stoupá v obráceném poměru ke vzdálenosti od kožního povrchu. Vytváří se tak termický gradient s nejvyšší teplotou na povrchu kůže. Pokud je kožní mikrocirkulace neporušená v průběhu působení termické noxy, pak prokrvení ochlazuje a chrání hlubší části kůže i po odstranění tepelného zdroje. [9]

Lidské oko

Poškození lidského oka laserovým paprskem ovlivňují vlnové délky, na které je oko schopno se soustředit. (obr. 13) Tyto vlnové délky mohou být dobře soustředěny sítnicí a rohovkou oka. V případě vysoké koherence a malého rozptylu laserového paprsku mohou u některých typů laserů způsobit, že je přijímaný paprsek soustředěn pouze do extrémně malého bodu na sítnici. Tato skutečnost může vést k bodovému přehřátí sítnice a k trvalému poškození zraku.

Vlnová délka	Poškození lidského oka
180 - 315 nm (UV-B, UV-C)	zánět rohovky (fotokeratitida)
315 - 400 nm (UV-A)	fotchemický zákal oční čočky
400 - 780 nm (viditelná oblast)	fotchemické poškození sítnice
780 - 1400 nm (blízká IR-A)	zákal, popálení sítnice
1,4 - 3,0 μm (střední IR)	proteiny v komorovém moku, zákal, popálení sítnice
3,0 μm - 1000 μm (daleká IR-C)	popálení sítnice

Obrázek 13 Poškození oka laserem při různých vlnových délkách [6]

Dalšími faktory, které ovlivňují rozsah poškození lidského oka, jsou velikost pupily (zřítelnice) nebo umístění poškození sítnice. Velikost pupily hraje významnou roli při poškození sítnice dopadajícím zářením, protože energie procházející až na sítnici je úměrná velikosti pupily. Zřítelnicí o průměru 8 mm projde 16krát větší energie záření než 2 mm zřítelnicí. Její velikost pro různé světelné podmínky je: 7 až 8 mm pro oko adaptované na tmou, 2 až 3 mm pro denní světlo a 1,6 mm pro okamžitý pohled do slunce.

Protože mají různé oblasti sítnice odlišnou funkci v procesu vidění, liší se stupeň závažnosti porušení sítnice podle místa jejího poškození. Nejzávažnější je poškození centrální krajiny sítnice – místa ostrého vidění. Naopak porucha okrajových částí sítnice nezpůsobuje tak velké změny vidění. [5]

1.7 Interakce laserového záření s textilním materiálem

Interakce laserového záření s materiálem je závislá na optických, geometrických, chemických a termických vlastnostech materiálu. Z optických vlastností je velmi důležitý index lomu vlákna, který ovlivňuje množství absorbované energie laserového paprsku a rozptyl laserového paprsku strukturou materiálu. Další velmi důležitou optickou vlastností je absorpce vlákna. Z geometrických vlastností vlákna, které ovlivňují množství absorbované energie je to především průměr vlákna a členitosti jeho povrchu. Chemické vlastnosti, ovlivňující interakci s laserovým zářením jsou především chemické složení a obsah vody. Z termických vlastností stojí za pozornost měrná tepelná kapacita, teplota rozkladu, teplota tání a teplota vzplanutí.

U homogenních materiálů dochází soustředěním energie laserového svazku v místě dopadu na materiál ke vzniku vysoké dávky energie, a také vysoké teploty povrchu materiálu. Při tomto velmi rychlém ohřevu je dosaženo extrémně vysokých teplot v materiálu, protože zahřívání povrchu materiálu se nedokáže dostatečně rychle ochladit sáláním nebo vedením tepla.

Za předpokladu, že se v případě interakce laserového záření s hmotou veškeré absorbované záření přemění v teplo v místě své absorpce, lze tuto absorpci popsat Lambert-Beerovým zákonem:

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon(\lambda)cd \quad (9)$$

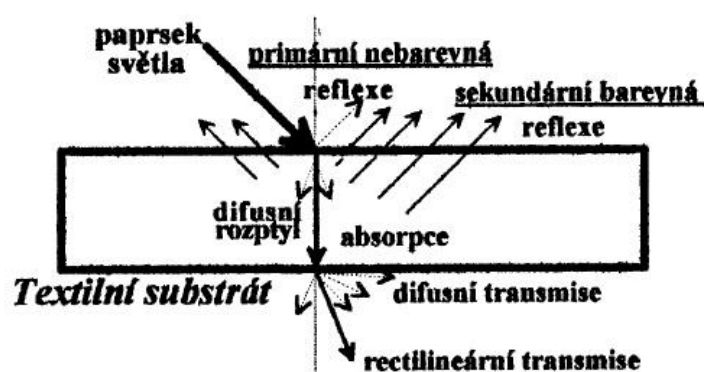
kde A je absorpance [-], I [Wm^{-2}] je intenzita záření po průchodu prostředím o tloušťce absorbující vrstvy d [cm], I_0 [Wm^{-2}] je intenzita dopadajícího záření, $\varepsilon(\lambda)$ [$\text{g.l}^{-1}\text{cm}^{-1}$] je absorpční koeficient a c je koncentrace [gl^{-1}].

Při interakci laserového záření s vláknennou vrstvou se můžeme setkat se složitější situací, neboť může dojít spíše k rozptylu laserového záření než k jeho absorpci. Množství absorbovaného laserového záření hmotou ovlivňuje absorpční koeficient. Zmiňovaný rozptyl laserového záření je způsoben nízkým absorpčním koeficientem. [3]

1.7.1 Reflexní vlastnosti povrchu

Jakmile dopadá paprsek světla na určitý předmět, v našem případě povrch textilního materiálu, jsou důležité reflexní vlastnosti povrchu neboli remise, které jsou znázorněny na obrázku 14.

Určitý (většinou malý) podíl světla je odražen od rozhraní prostředí, které je tvořeno vzduchem a povrchem předmětu (textilie). Tento jev je vyvolán rozdílnou optickou hustotou prostředí a podle charakteru mluvíme o zrcadlovém (spekulárním) odrazu od hladkých povrchů a difusním odrazu od zvrásněných nebo matných povrchů. Volbou vhodných podmínek osvětlování a pozorování se dá spekulární reflexe vyloučit a barvu předmětu vnímat v její plné vydatnosti. V případě matných povrchů (většina textilních materiálů) nelze oddělit primární (nebarevnou) reflexi od sekundární (barevné) reflexe. Podíl této primární nebarevné reflexe se u textilních materiálů může pohybovat od 0% u sametů po 3 – 4% u lesklých textilií. U běžných tkanin je tento podíl přibližně 2%.



Obrázek 14 Schéma remise textilního substrátu [7]

Hlavní část světla proniká do vzdálenějších vrstev materiálu, ve kterých dochází k difusnímu rozptylu a absorpci světelného záření. V případě, že nejsou vlákna obarvena, je absorpce světla ve všech vlnových délkách přibližně stejná a poměrně malá (záleží

samozřejmě na druhu vlákna a jeho historii). V důsledku toho se nám textilie po osvětlení polychromatickým bílým světlem jeví jako víceméně bílá.

V okamžiku, kdy se v textilním substrátu nacházejí částice barviva – textilie je obarvena, dochází k tzv. selektivní absorpci světelného záření.

Pokud nebyl všechn podíl světla absorbován, rozptýlen nebo odražen, dochází k tzv. transmisi neboli průchodu světla osvětlovaným předmětem. Tato situace nastává většinou v případech, kdy vrstva absorbujícího materiálu není dostatečně silná. Podobně jako tomu bylo u primární reflexe, může být i transmise rozptýlená – difuzní nebo nerozptýlená – rectilineární. Skutečnost, zda bude transmise rectilineární nebo difuzní, je ovlivňována nejen kvalitou povrchu, kterým světelný paprsek vychází zpět z absorbující vrstvy do okolí, ale i homogenitou absorbující vrstvy. V případě textilních substrátů můžeme tedy mluvit pouze o difuzní transmisi. [10]

2. Vlastnosti vybraných materiálů potenciálně použitelných k ochraně před laserovým zářením

V následující části rešerše najdeme stručnou charakteristiku materiálů, které tvoří jednotlivé vrstvy vícevrstvé ochranné textilie. Materiály mají různé vlastnosti, a proto byla vybrána jejich vhodná kombinace. Konkrétně byla u čedičové textilie (obrázek 15) využita její vysoká tepelná odolnost, u polyuretanové pěny její schopnost zabránit prostupu paprsku, u alobalu skutečnost, že je schopen odrazit laserový paprsek a způsobit jeho rozptyl a u bavlněné textilie byly využity její komfortní vlastnosti. Jednotlivé vrstvy, pokud by byly použity samostatně, by v tomto experimentu nemohly zajistit dostatečnou ochranu před účinky laserového záření. Proto bylo nutné provést jejich vrstvení.

2.1 Vysoce tepelně odolná vrstva

Čedič

Čedičová vlákna patří do skupiny vláken z přírodních surovin a mohou být vnímána jako přechod mezi skleněnými vlákny a poměrně finančně náročnými vlákny uhlíkovými a keramickými. Tato vlákna mají výborné tepelné a izolační vlastnosti, vysokou pevnost v tahu a nízkou hořlavost. Čedič je vlastně ztuhlá láva některých sopek. Jde o generický název pro skupinu hornin obsahujících řadu kysličníků. Čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken obsahují obvykle dva základní materiály: olivín a nefelin. Podle obsahu SiO_2 se čediče dělí do tří skupin:

- Alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42%
- Slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 od 43% do 46%
- Kyselé čediče s obsahem SiO_2 nad 46%

K výrobě vláken se používají kyselé čediče. Čedičová vlákna se vyrábějí tavným zvlákněním při 1500 – 1700 °C. Vlákna mohou být dále dlužena při teplotách kolem 1300 °C. Měrná hmotnost je 2733 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a teplota měknutí se pohybuje kolem 960°C. je odolný vůči extrémním teplotám v rozmezí -260 °C až 980 °C. Tepelná vodivost čedičových vláken je 0,035 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ Průměr vláken je obvykle 9-12 μm . [4]



Obrázek 15 Textilie vyrobená z čedičových vláken [8]

2.1.1 Působení laseru na čedičová vlákna

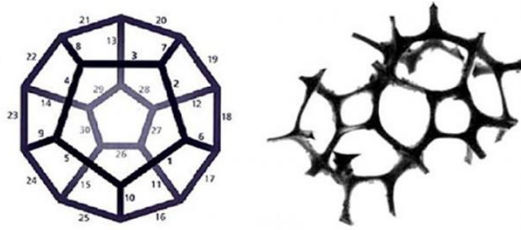
Přestože jsou čedičová vlákna, jak již bylo zmíněno, odolná proti vysokým teplotám, použití infračerveného záření při úpravě jejich povrchu způsobuje poškození. Testy působení laseru na čedičová vlákna byly prováděny na CO₂ laseru a bylo při nich zaznamenáno vytvoření slabých míst ve vláknech. Tato skutečnost vedla k velkému poklesu modulu pružnosti a s tím souvisejícímu poklesu pevnosti v tahu. Při dalším testování byla zkoumána možnost použití uhlíku na vlákenný povrch čediče. V první fázi byla čedičová vlákna potřena roztokem sacharózy a následně sušena při teplotě 150°C po dobu 10 minut. Následně proběhlo ozařování CO₂ laserem. Přestože se tenká vrstva na vláknech čediče vytvořila, došlo zároveň k jejich poškození. Z těchto provedených testů vyplynulo, že jediný způsob, kterým je možno působit laserem na čedičová vlákna, je řezání. [16]

2.2 Vrstva zabraňující prostupu paprsku

Polyuretanová pěna

Polyuretanová pěna má trojrozměrnou strukturu vzájemně spojených buněk. Buňka, znázorněná na obrázku 16, je základní jednotkou pěny. Počet buněk se pohybuje od 20 milionů do 20 miliard na m³ pěny. Buňka představuje tvar dvanáctistěnu, zhotovený z 30 podpěr a 12 ploch pětibokých hranolů – oken. Okna jsou povrchově ohraničená pěti podpěrami. Podpěry jsou pevný materiál pěny (elastomer polyuretanu). Zbytek pěny je naplněn vzduchem. [12]

Polyuretanová pěna se vyrábí z izokyanátů a diolů. Tento materiál je nejběžněji používanou tepelnou izolací. Vyrábí se ve formě měkkých pěn, tvrdých pěn nebo strukturální polyuretanové pěny pro výrobky stavebního i spotřebního průmyslu. Polyuretan je hořlavý, běžná tepelná odolnost je 120°C. jsou ale vyráběny samozhášivé, těžko hořlavé nebo nehořlavé typy, které odolávají teplotě 300 °C. Měrná tepelná kapacita polyuretanové pěny je 1210 Jkg⁻¹K⁻¹, teplota rozkladu se pohybuje mezi 200 až 280°C a tepelná vodivost činí 0,54 Wm⁻¹K⁻¹.



Obrázek 16 Struktura buňky polyuretanové pěny [10]

2.3 Vrstva způsobující rozptyl laserového záření

Hliníková folie

Hliníková folie, která má tloušťku mezi 0,004 – 0,02 mm se vyrábí válcováním hliníku. Z důvodu vysoké spotřeby zásob hliníku a vysoké energetické náročnosti výroby hliníkových fólií je jejich využití částečně terčem kritiky ochránců přírody.

Hliníková folie (obrázek 17) je běžně vyráběna z čistého hliníku (až 99%), nejdříve jsou vyrobeny tzv. předválcované pásy o tloušťce 0,6 až 1,5 mm, které se za studena v několika krocích vyválcují na požadovanou výslednou tloušťku. Vnitřní strana folie, která přišla do styku s válcem má lesklý povrch a vnější strana je matná.

Měrná tepelná kapacita alobalu je $896 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, teplota tavení je $660 \text{ }^\circ\text{C}$ a jeho tepelná vodivost činí $235 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. [11]



Obrázek 17 Hliníková fólie [9]

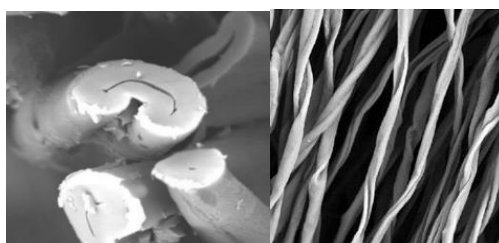
2.4 Komfortní vrstva

Bavlna

Bavlněné vlákno (obrázek 18), patří mezi přírodní rostlinná vlákna. Získává se ze semen bavlníku. Jedná se o vlákno celulózové a jeho složení se liší podle druhu bavlny,

stupně zralosti a půdních podmínek. Z důvodu velké spotřeby vody představuje pěstování rostlin bavlníku zatížení životního prostředí a má nepříznivý vliv na využití přírodních zdrojů. S ohledem na ochranu životního prostředí, konkrétně bez použití chemikálií je od devadesátých let minulého století pěstována organická bavlna. Tento produkt je určen k výrobě zdravotně nezávadných výrobků, například oděvů pro kojence nebo zdravotnických textilií.

Navzdory stále se rozvíjející výrobě chemických vláken si bavlna zachovala svůj význam. Mezi nejdůležitější vlastnosti bavlněného vlákna patří jeho jemnost, délka, tažnost (za sucha i za mokra), pevnost ($1,8$ až $6,3 \text{ N.dtex}^{-1}$), navlhavost (ve vlhkém prostředí dokáže přijmout až 23% vlhkosti) a tepelně izolační schopnosti za sucha. [4]



Obrázek 18 Bavlna – příčný řez a podélný pohled na vlákno [4]

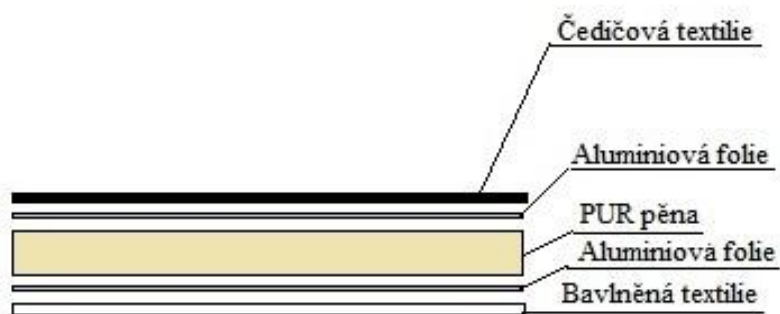
2.4.1 Vliv teploty na bavlněné vlákno

Bavlněné vlákno je při vysokých teplotách poškozeno, mění se nejen jeho struktura, ale také barva. Při krátkodobém působení teploty 120°C nedochází k žádným výrazným změnám. Teprve po pěti hodinách působení teploty 120°C bavlněné vlákno zežloutne. Při teplotě 150°C bavlna zhnědne a při teplotě 200 až 280°C dochází k dehydrataci a dekarboxylaci, poté nastává destrukce. Při dlouhodobém působení teploty 90°C dochází u tohoto vlákna k depolymerizaci. Při prudkém sušení dochází ke zrohovatění, vytvoří se hustší vrstva na povrchu vláken. Teplota žehlení bavlněných textilií by měla být 150°C (teplota tvarovky). [4]

Působení laserového paprsku ovlivňuje u bavlny pevnost, se zvyšující se intenzitou se hodnoty pevnosti snižují. Kromě výše popsaných změn barevného odstínu způsobuje laser na povrchu bavlněných vláken praskliny a trhliny. Kromě celkové pevnosti klesá při zvýšené intenzitě laseru také pevnost v tahu.[2]

2.5 Vrstvení textilií

Vícevrstvá struktura, která chrání člověka před účinky infračerveného laserového paprsku, musí obsahovat vysoce tepelně odolný materiál, materiál způsobující ochlazení a zabraňující prostupu paprsku, dále vodič, způsobující rozptyl laserového záření a v neposlední řadě materiál, splňující požadavky komfortu pro lidskou pokožku. Uspořádání jednotlivých vrstev je znázorněno na obrázku 19.



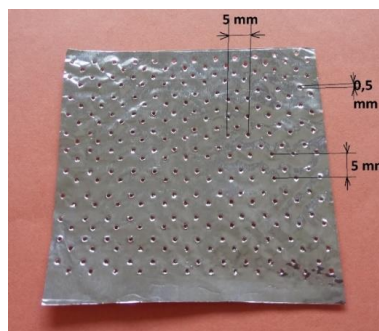
Obrázek 19 Uspořádání jednotlivých vrstev vícevrstvé struktury

3. EXPERIMENT

3.1 Perforování aluminiové folie

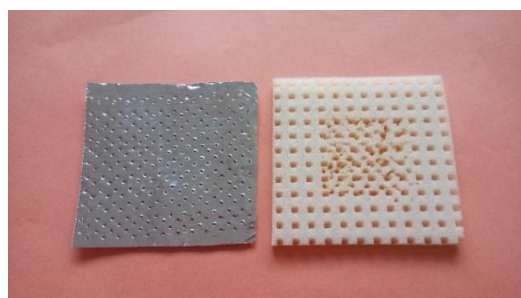
Při sestavování vícevrstvé textilie byl kladen důraz na zachování jejích komfortních vlastností. Z tohoto důvodu byla aluminiová vrstva perforována. Vzorky s takto upravenými hliníkovými vrstvami získaly nižší plošnou hmotnost.

Folii bylo nutné perforovat s velkou opatrností (zejména nejmenší tloušťku 0,02 mm), tedy tak, aby nedošlo k jejímu protržení či přílišné deformaci. Hliníková folie byla perforována ručně, pomocí dřevěné destičky, na které byly upevněny tři řady ostrých jehel. Výsledkem byly pravidelně rozmístěné otvory v řadách. Vzdálenosti jednotlivých otvorů v řádku i ve sloupci byly 5 mm od sebe. Průměr otvoru byl 0,5 mm (obr. 20).



Obrázek 20 Perforovaná aluminiová folie

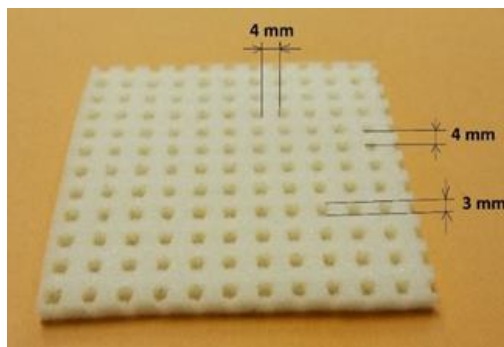
Při samotném experimentu bylo možné pozorovat, že perforace aluminiové vrstvy měla u některých vzorků vliv na teplotu vzorku po ozáření, u některých na větší poškození PUR pěny prostupujícím laserovým paprskem (obrázek 21).



Obrázek 21 Ozářený perforovaný alobal a perforovaná PUR pěna

3.2 Perforování PUR pěny

Ze stejného důvodu, tedy dosažení maximálních komfortních vlastností, byly perforovány vzorky PUR pěny. Jelikož má PUR pěna ze všech vrstev struktury největší tloušťku, bylo opět patrné snížení plošné hmotnosti vzorků. Perforace byla provedena na stejném laserovém zařízení, na kterém probíhal celý experiment, tedy na laseru Marcatex 150 Flexi.



Obrázek 22 Perforovaná PUR pěna

Před samotnou perforací byly parametry laserového zařízení nastaveny tak, aby v důsledku vysoké teploty paprsku nedošlo ke vznícení PUR pěny. Konkrétní parametry nastavení laseru byly $2 \times 100 \mu\text{s}$ u tloušťky PUR pěny 1 cm a 2×50 milisec. u tenčí 0,4 cm PUR pěny. Výsledkem byly pravidelně rozmístěné otvory v řadách. Vzdálenosti jednotlivých otvorů v řádce i ve sloupci byly 4 mm od sebe. Velikost otvoru byla 3 mm x 3 mm (obrázek 22).

3.3 Charakteristika použitých materiálů

Jak již bylo v rešeršní části této diplomové práce uvedeno, vícevrstvá struktura se skládá z čedičové textilie, aluminiové folie tlouštěk 0,02 mm; 0,03 mm; 0,05 mm a 0,099 mm. Testovány jsou vzorky neperforované a perforované folie. Dále je zde polyuretanová pěna tlouštěk 0,4 cm, 0,49 cm a 1 cm, neperforované a perforované vzorky a bavlněná textilie keprové vazby. Uvedené tloušťky materiálů byly naměřeny na tloušťkoměru Mesdan Lab, na kterém byl nastaven přítlak 20 cm^2 (1 kPa).

Přesné uspořádání struktury (obr. 23) je následující:

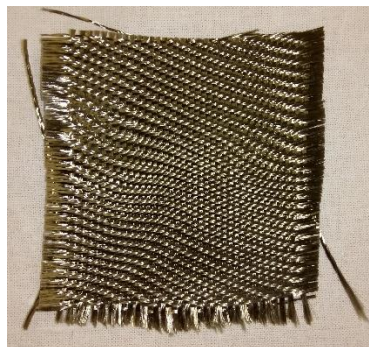
1. Čedičová textilie
2. Aluminiová folie
3. Polyuretanová pěna
4. Aluminiová folie
5. Bavlněná textilie



Obrázek 23 Struktura vícevrstvé textilie

Čedičová textilie

- Plošná hmotnost - 723 [gm⁻²]
- Tloušťka - 0,83 [mm]
- Keprová vazba



Obrázek 24 Čedičová textilie

Alobal (plný a perforovaný)

Jak je z tabulky 1 patrné, naměřené tloušťky alobalů se neshodovaly s tloušťkami, které uvádí výrobce. U vzorků plného alobalu byly tyto rozdíly způsobeny malou deformací vzorků, u vzorků perforovaného alobalu byla naměřená tloušťka ovlivněna výstupky v perforaci.

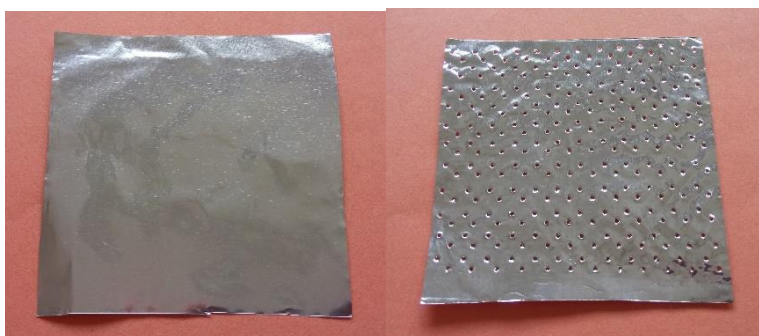
Tabulka 1 Naměřené tloušťky a plošné hmotnosti plného alobalu

Alobal	plný			
tloušťka [mm]	0,02	0,03	0,06	0,25
plošná hmotnost [gm^{-2}]	60	84,7	142,4	275,1

Tabulka 2 Naměřené tloušťky a plošné hmotnosti perforovaného alobalu

Alobal	perforovaný			
tloušťka [mm]	0,47	0,77	0,86	1,4
plošná hmotnost [gm^{-2}]	84,5	87,1	142	275,5

Tloušťka plného alobalu (uvedená výrobcem) – 0,02 [mm]; 0,03 [mm]; 0,05 [mm] a 0,099 [mm]



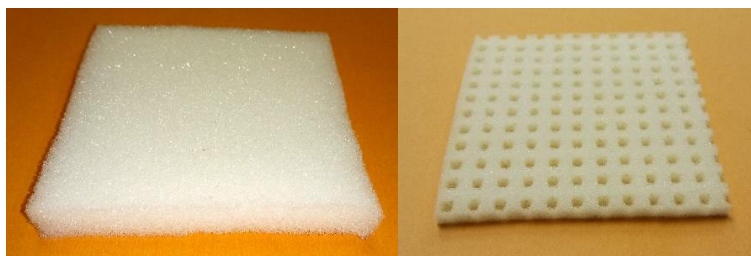
Obrázek 25 Aluminiová folie (plná, perforovaná)

Polyuretanová pěna (plná a perforovaná)

Tabulka 3 Plošné a objemové hmotnosti PUR pěn všech tloušťek [19]

Plná PUR pěna			
tloušťka [mm]	4,3	6,9	10,06
plošná hmotnost [gm^{-2}]	101,9	126	175
objemová hmotnost [kgm^{-3}]	24,8	25,7	17,5

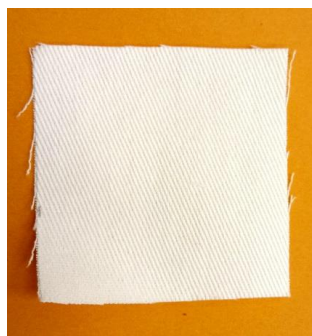
- Tloušťka perforované pěny – 4,46 [mm]
- Plošná hmotnost perforované pěny tloušťky 4,3 mm – 100,9 [gm^{-2}]



Obrázek 26 Polyuretanová pěna (neperforovaná, perforovaná)

Bavlněná textilie

- Plošná hmotnost – 285 [gm^{-2}]
- Tloušťka – 0,55 [mm]
- Keprová vazba

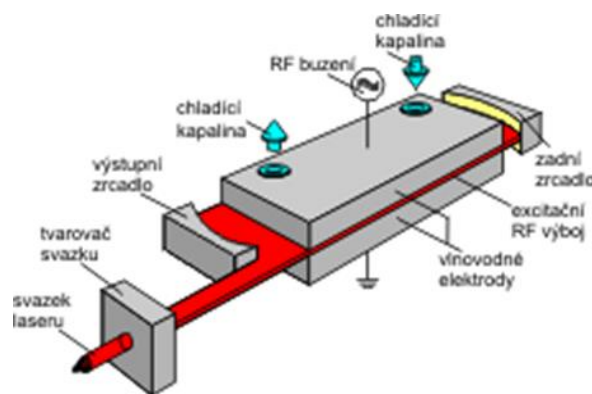


Obrázek 27 Bavlněná textilie

3.4 Popis laserového zařízení Marcatex 150 Flexi

Laserové zařízení Marcatex 150 Flexi je pulsní CO₂ laser emitující laserový paprsek v infračervené oblasti o vlnové délce 10,6 μm.

Součástí tohoto laserového zařízení je optický rezonátor, který generuje laserové záření. Optická elektronika zajišťuje získání laserového paprsku s optimálními parametry z hlediska optiky. Všechny optické prvky jsou umístěny uvnitř optické skříně. Značící hlava moduluje laserový paprsek tak, aby bylo dosaženo otisku obrazu pomocí připravené předlohy. Celkovou kontrolu značení zajišťuje počítačová jednotka, jejíž součástí je monitor, klávesnice, myš a centrální modul počítačového systému. Ve střední části skříně ovládání je zdroj difuzního chlazení a zdroj radiofrekvenčního napětí.



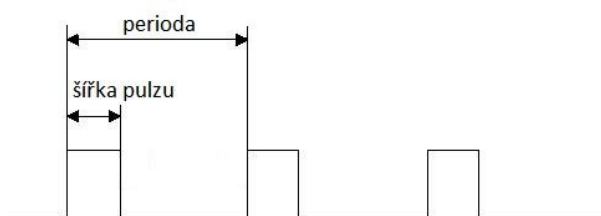
Obrázek 28 CO₂ laser [11]

Samotný laser je CO₂ laser buzený vysokou frekvencí a chlazený difúzí CO₂. V aktivním prostředí – plynu je pomocí vysokofrekvenčního napětí generován mezi elektrodami výboj. Optický rezonátor se skládá ze zadního a výstupního zrcadla. Uvnitř rezonátoru se vytváří laserový paprsek. Chladícím médiem elektrod je voda.

Abychom získali laserový paprsek, který je charakteristický svou vynikající kvalitou a stabilitou, je nutné provést korekci a prostorové filtrování svazku laserových paprsků.

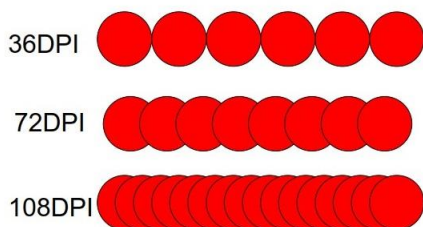
3.5 Přehled parametrů laserového paprsku

Toto zařízení pracuje v pulzním režimu. Mezi parametry laserového paprsku patří vlnová délka 10,6 μm (není nastavitelná - je dána aktivním prostředím, což je oxid uhličitý), která spadá do infračervené oblasti elektromagnetického spektra a je pro lidské oko neviditelná. Vliv laserového paprsku na textil je tepelný – energie absorbovaná textilií se mění v teplo. Průměrný výkon je 100 W a špičkový výkon je 230 W. Pracovní cyklus (obrázek 29) představuje výkon laseru v procentech a je dán poměrem zapnutí a vypnutí laseru (doby trvání pulzu). Maximální hodnota je 50%. Doba trvání laserového pulzu lze nastavit v rozmezí 30 až 800 μs .



Obrázek 29 Schéma pracovního cyklu pulzního CO₂ laseru

Jednotka DPI, která určuje rozlišení je zkratkou anglického Dot Per Inch, což znamená počet bodů na jednotku anglického palce ($1'' = 2,54 \text{ cm}$). Protože se jedná o rozlišení obrazu, tedy v ploše, jde o dvourozměrnou veličinu. První hodnota určuje hustotu bodů v řádku a druhá hustotu bodů ve sloupci. Jak je patrné z obrázku 30, čím vyšší bude DPI, tím více bodů připadne na čtvereční palec a tím více se budou body navzájem překrývat. [13]



Obrázek 30 Hustota bodů DPI

3.7 Nastavení parametrů pro vypalování vzorků

Doba ozáření jednotlivých vzorků byla přibližně 19,1 s. Pro snadnější orientaci při umístění vzorků svítil přímo pod vypalovací čočkou ve středu vzorku čtverec. Počet obrazových bodů byl 148 x 148 pro DPI 75x75. Doba působení laserového záření v jednom bodě byla 800 μ s. Čas skenování infračerveného laserového teploměru byl nastaven na 20 milisek. a teplota byla snímána z rubní strany vícevrstvého vzorku.

Výpočet energie laserového svazku je popsán v tabulce 4. Nejdříve byla vypočítána energie jednoho pulzu, množství pulzů a jejich energie a poté průměr laserového svazku a jeho energie.

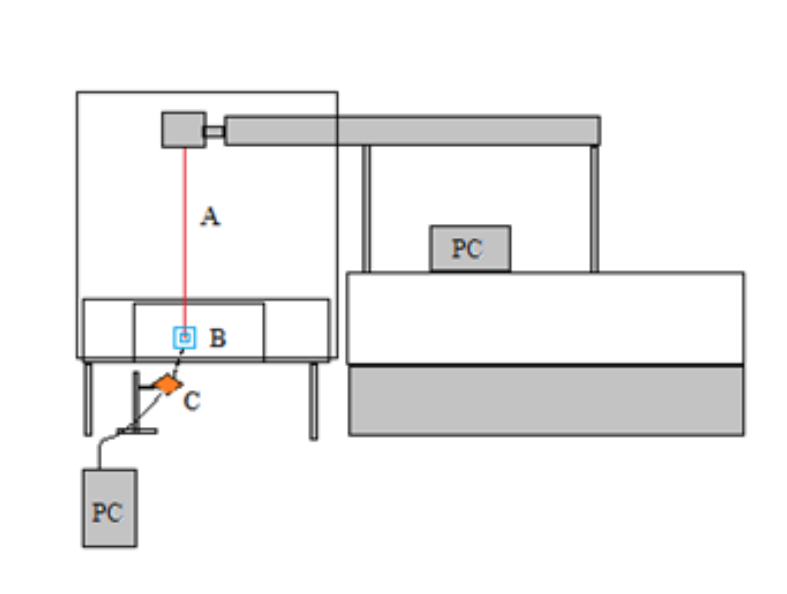
Tabulka 4 Výpočet energie laserového svazku

Výpočet energie jednoho pulzu	
Výkon P	100 W
Frekvence f	5000 Hz
Energie pulzu E_p	$P/f = 100/5000 = 0,02 \text{ J} = 20 \text{ mJ}$
Výpočet množství pulzů	
Pixel time	800 μ s
5000 pulzů v jedné sekundě	$800 * 10^{-6} = 4 \text{ pulzy}$
Výpočet energie čtyř pulzů	
4 pulzy * 0,02 J = 0,08 J = 80 mJ	
Výpočet průměru svazku	
$\pi * d^2/4 = \pi * (0,08)^2/4 = 0,005024 \text{ cm}^2$	
Výpočet energie laserového svazku	
$0,08/0,005024 = 15,92 \text{ Jcm}^{-2}$	

3.8 Návrh experimentu

Tato část diplomové práce přibližuje podmínky a postup experimentu. Experiment je zaměřen na testování vícevrstvé struktury, která se skládá z textilních a izolačních materiálů. Parametry jednotlivých materiálů byly optimalizovány nejen z hlediska maximální možné ochrany, ale také z hlediska komfortu při použití.

Navržená vícevrstvá struktura materiálů je uvažována jako možná ochrana lidské pokožky před tepelnými účinky laserového infračerveného paprsku. Pro testování byla zvolena nejvyšší dosažená hustota energie infračerveného laserového záření. Pro realizaci experimentu bylo zvoleno laserové zařízení Marcatex 150 Flexi, které pracuje v pulzním režimu s vlnovou délkou 10,6 μ m. Průměrný výkon tohoto zařízení je 100 W a špičkový výkon je 230 W.



Obrázek 31 Schéma experimentu: A - laserový paprsek, B - ozařovaný vzorek, C - infračervený teploměr

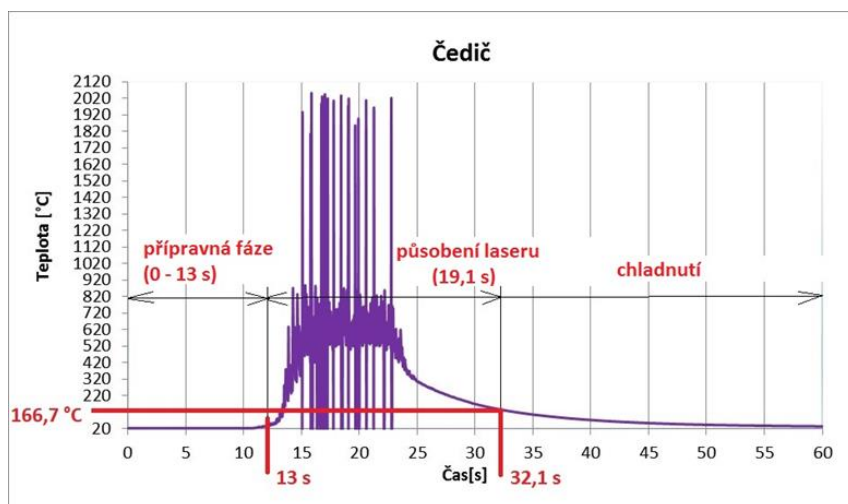
Jako výstupy testování byly zvoleny naměřené teploty na rubní straně vzorku. Pro měření teploty vzorků byl použit infračervený teploměr Optris LS (obr. 32). Tento teploměr disponuje kromě širokého rozsahu měření (-35 až +900°C) a vysoké přesnosti také možností načtení dat do PC pomocí USB propojení. Naměřené údaje byly zobrazovány v programu Optris Connect. [14] Schéma experimentu je znázorněno na obrázku 31.



Obrázek 32 Infračervený teploměr Optris LS + software Optris Connect [16]

4. Ozařování jednotlivých materiálů

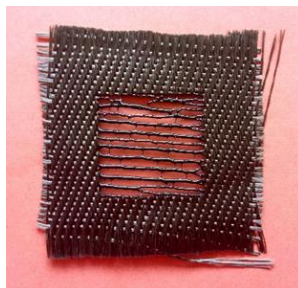
Před testováním navržené vícevrstvé struktury bylo přistoupeno k testování jednotlivých materiálů. Pozornost byla zaměřena na teplotu, kterou měl testovaný vzorek v době, kdy skončilo ozařování laserovým infračerveným paprskem.



Obrázek 33 Způsob testování jednotlivých vrstev - čedič

V našem případě probíhalo toto testování následovně: po umístění vzorku pod laserový paprsek bylo zapnuto měření infračerveným teploměrem, ponechána přípravná fáze 13 s a poté zahájeno samotné ozařování. Doba ozařování, tedy působení laseru byla 19,1 s. Výchozí teplota vzorků před ozařováním byla 22 °C. Po vypnutí laseru byla zaznamenána okamžitá teplota vzorku. Průběh ozařování je znázorněn na obrázku 33.

Testovanému materiálu bylo během doby ozařování průběžně dodáváno teplo. Procesu kumulování tepla, resp. přenosu tepla vedením, je v této práci věnována samostatná kapitola.



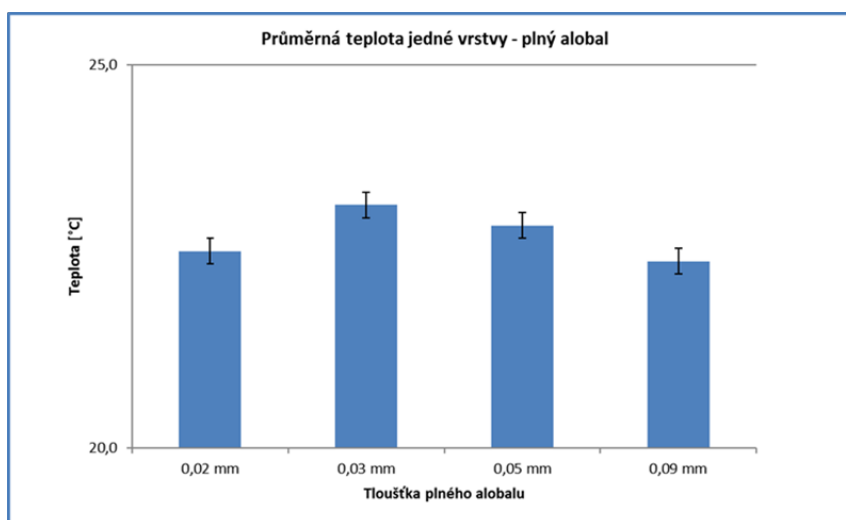
Obrázek 34 Destrukce povrchu čediče po ozáření

Čedičová textilie, jak již bylo výše zmíněno, vydrží extrémně vysoké teploty (až 980 °C). Při interakci s laserovým zářením došlo v důsledku vysoké hustoty energie laseru v jednom místě k tavení vláken vzorku, které vedlo k destrukci povrchu čediče (obr. 34).

Tabulka 5 Okamžité teploty - plný alobal

Jedna vrstva	Teploty [°C]			
Tloušťka plného alobalu	0,02 mm	0,03 mm	0,05 mm	0,09 mm
vzorek 1	22,5	23,5	22,6	22,5
vzorek 2	22,4	23,1	22,9	22,4
vzorek 3	22,8	22,9	23,2	22,4
průměr	22,6	23,2	22,9	22,4
směr.odchylka	0,21	0,31	0,3	0,06
IS střední hodnota	0,24	0,35	0,34	0,07
IS dolní mez	22,33	22,82	22,56	22,37
IS horní mez	22,80	23,52	23,24	22,50
variační koeficient [%]	0,93	1,34	1,31	0,27

Dalšími testovanými vzorky byly aluminiové folie, tedy alobaly čtyř tlouštěk - 0,02 mm, 0,03 mm, 0,05 mm a 0,099 mm - plné vzorky. Naměřené okamžité teploty těchto vzorků jsou uvedeny v tabulce 5. Vzhledem k tomu, že výchozí teplota vzorků byla 22°C, došlo při ozařování alobalu k odrazu laserového paprsku ve vysoké míře, neboť vzorky zaznamenaly jen minimální nárůst teploty.



Obrázek 35 Průměry okamžitých teplot plného alobalu

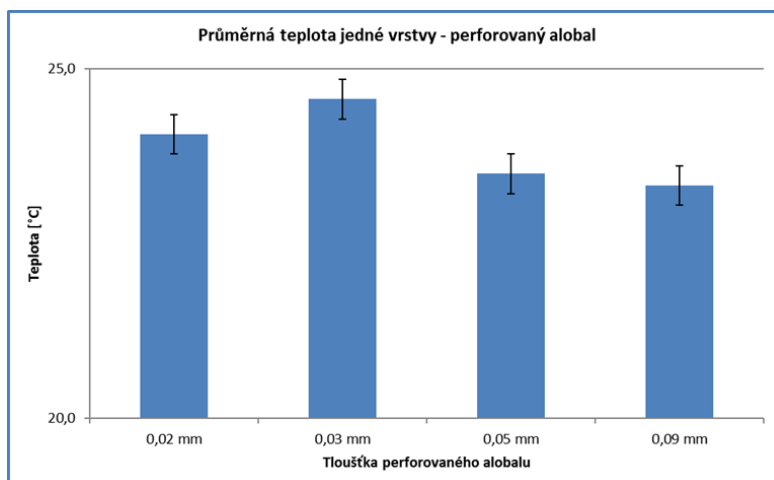
V tabulce naměřených okamžitých teplot jsou uvedeny základní výpočty popisné statistiky. Z tabulky 5 je patrné, že rozdíly mezi okamžitými teplotami naměřenými na plném alobalu se u jednotlivých tlouštěk liší jen nepatrně.

Na obrázku 35 jsou graficky znázorněny průměry okamžitých teplot vzorků čtyř tlouštěk plných alobalů. Stejně jako z tabulky výše, také z tohoto grafu je patrné, že se tyto hodnoty příliš neliší.

Tabulka 6 Okamžité teploty - perforovaný alobal

Jedna vrstva	Teploty [°C]			
Tloušťka perfor. alobalu	0,02 mm	0,03 mm	0,05 mm	0,09 mm
vzorek 1	24,6	24,6	23,5	22,9
vzorek 2	23,9	25,2	23,8	23,5
vzorek 3	23,7	23,9	23,2	23,6
průměr	24,1	24,6	23,5	23,3
směr.odchylka	0,47	0,53	0,3	0,38
IS střední hodnota	0,53	0,60	0,34	0,43
IS dolní mez	23,53	23,97	23,16	22,90
IS horní mez	24,60	25,17	23,84	23,76
variační koeficient [%]	1,95	2,16	1,28	1,63

V tabulce 6 jsou zaznamenány okamžité teploty naměřené na perforovaných vzorcích alobalu čtyř různých tlouštěk. Tyto teploty jsou nepatrně vyšší (přibližně o 1 až 1,5 °C), než u vzorků plného alobalu. Stejně jako u vzorků perforovaného alobalu byly tyto teploty vzhledem k výchozí teplotě vzorků nízké, nárůst teploty byl zde opět minimální.

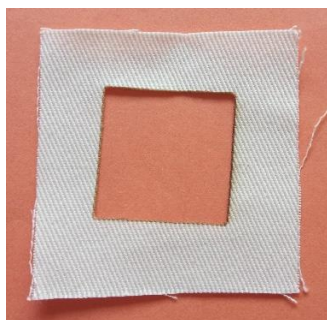


Obrázek 36 Průměry okamžitých teplot perforovaného alobalu

Na obrázku 36 jsou graficky znázorněny průměry okamžitých teplot vzorků čtyř tloušťek perforovaného alobalu. Jak již bylo zmíněno v souvislosti s teplotami vzorků plného alobalu, od výchozí teploty testovaných vzorků, 22°C, se tyto teploty liší jen nepatrně. Jak je patrné z tabulky 6 i zmiňovaného grafu, nepatrné rozdíly jsou také mezi vzorky jednotlivých tloušťek alobalů.

Následovalo testování PUR pěny tloušťky 0,5 a 0,4 cm. Běžná tepelná odolnost PUR pěny je přibližně 120°C. Vzorky plné i perforované PUR pěny shořely. Plná PUR pěna byla po 20 s hoření uhašena, perforovaná PUR pěna shořela bez uhašení. Okamžitá teplota u plné PUR pěny po uhašení 55 °C, u perforované PUR pěny 23,8 °C.

Bavlněná textilie při testování také shořela, „vypálena“ byla laserem ozářená plocha, konkrétně čtverec o velikosti 3,55x3,55 cm (obr. 37). Okamžitá teplota bavlněného vzorku po vypnutí laseru byla 24,1 °C.



Obrázek 37 Bavlněná textilie po ozáření

4.1 Ozařování dvou vrstev

Vzhledem k tomu, že byla ozařováním plného i perforovaného alobalu potvrzena jeho schopnost rozptýlit laserový paprsek a tudíž výrazně snížit teplotu vzorku, bylo přistoupeno k testování dvou sad vzorků po pěti kusech, složených ze dvou vrstev - perforovaného alobalu tloušťky 0,05 mm a plné PUR pěny tloušťky 0,4 cm a perforovaného alobalu tloušťky 0,05 cm a plné PUR pěny tloušťky 0,4 cm. Průměrná okamžitá teplota u první sady vzorků po vypnutí laseru byla 57 °C, u druhé sady vzorků 55,1 °C.

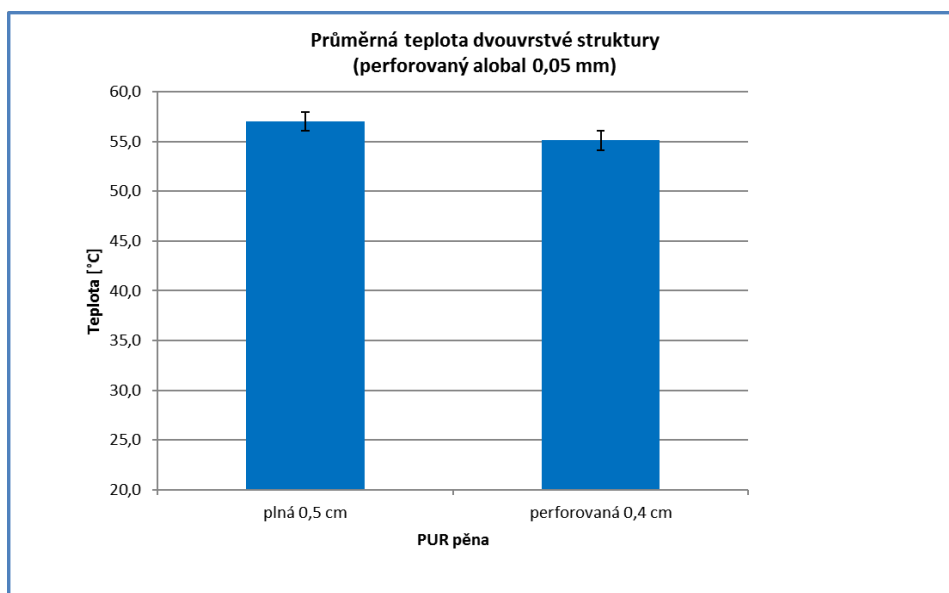
V tabulce 7 jsou zaznamenány okamžité teploty, naměřené na dvouvrstevných vzorcích. Tyto teploty jsou doplněny o základní výpočty popisné statistiky. Je patrné, že mezi vzorky

s plnou a perforovanou PUR pěnou nebyly zaznamenány výrazné teplotní rozdíly. Ovšem v porovnání s předchozími testováními jedné vrstvy alobalu byl zaznamenán rozdíl, přesahující 30°C.

Tabulka 7 Okamžité teploty dvou vrstev

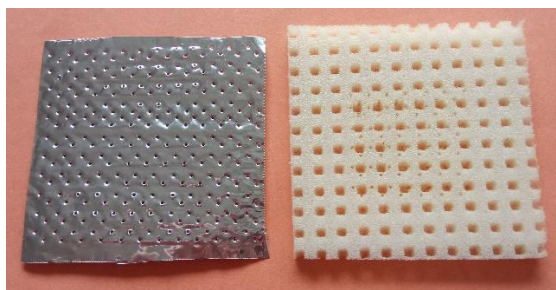
Dvě vrstvy	Teploty [°C]	
	plná	perforovaná
PUR pěna 0,4 cm		
PUR pěna 0,5 cm		
Tloušťka perforovaného alobalu	0,05 mm	
vzorek 1	57,2	54,8
vzorek 2	56,2	54,9
vzorek 3	57,6	55,6
průměr	57,0	55,1
směr.odchylka	0,72	0,44
IS střední hodnota	0,81	0,50
IS dolní mez	56,19	54,60
IS horní mez	57,81	55,60
variační koeficient [%]	1,26	0,80

Na obrázku 38 jsou graficky znázorněny průměry okamžitých teplot dvouvrstvých vzorků, které obsahovaly plnou PUR pěnu tloušťky 0,5 cm nebo perforovanou PUR pěnu tloušťky 0,4 cm.

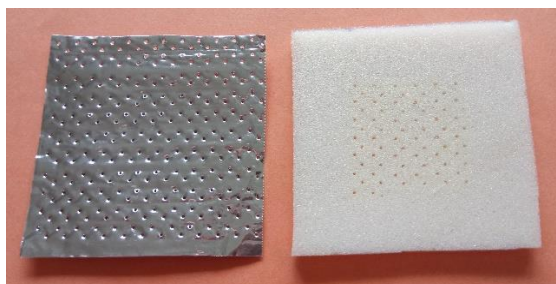


Obrázek 38 Průměry okamžitých teplot dvou vrstev

Přestože se parametry PUR pěn lišily, rozdíly mezi těmito dvěma sadami vzorků nejsou výrazné. Polyuretanová pěna byla díky otvorům v alobalu, položeném na ní, propálena laserem pouze v místech perforace alobalu, jak je patrné na obrázcích 39 a 40.



Obrázek 39 Perforovaný alobal a perforovaná PUR pěna po ozáření



Obrázek 40 Perforovaný alobal a plná PUR pěna po ozáření

4.2 Ozařování čtyř vrstev

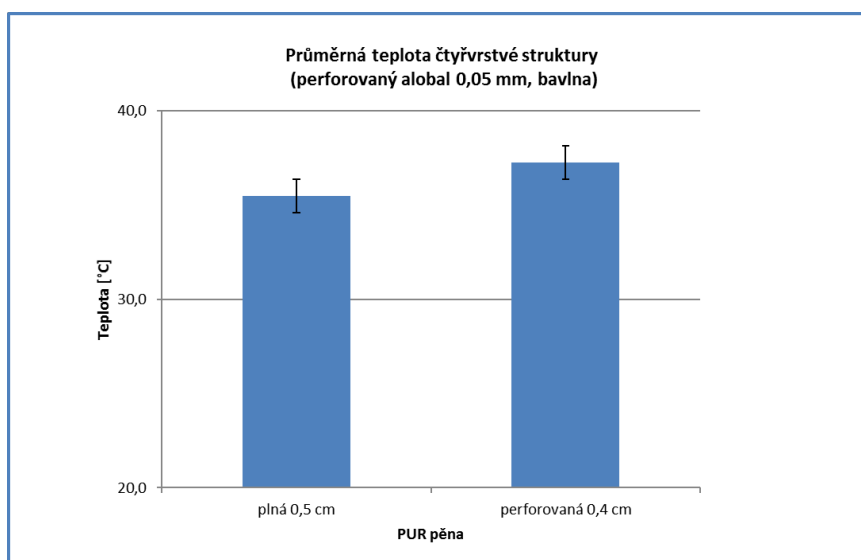
Jako poslední byly testovány dvě sady vzorků po pěti kusech, složené ze čtyř vrstev materiálů: perforovaného alobalu tloušťky 0,05 cm, perforované (0,4 cm) nebo plné (0,5 cm) PUR pěny, perforovaného alobalu tloušťky 0,05 cm a bavlněné textilie. Cílem testování této „neúplné“ struktury bylo zjistit, zda bez vrchní ochranné čedičové vrstvy dojde k poškození spodního, bavlněného materiálu. Na rozdíl od předchozího testování byl přidán perforovaný alobal pod PUR pěnu.

Průměrná okamžitá teplota u první sady vzorků byla 37,2 °C, u druhé sady vzorků 35,5 °C. Vzhledem ke schopnosti alobalu rozptýlit laserový paprsek máme důvod se domnívat, že ke snížení teploty vzorků mohlo dojít po přidání druhé alobalové vrstvy.

Tabulka 8 Okamžité teploty čtyř vrstev

Čtyři vrstvy vrstvy s bavlněnou textilií	Teploty [°C]	
PUR pěna 0,4 cm		perforovaná
PUR pěna 0,5 cm	plná	
Tloušťka perfor. alobalu (dvě vrstvy)	0,05 mm	
vzorek 1	35,6	37,8
vzorek 2	35,6	36,9
vzorek 3	35,2	37
průměr	35,5	37,2
směr.odchylka	0,23	0,49
IS střední hodnota	0,26	0,55
IS dolní mez	35,21	36,68
IS horní mez	35,73	37,79
variační koeficient [%]	0,65	1,32

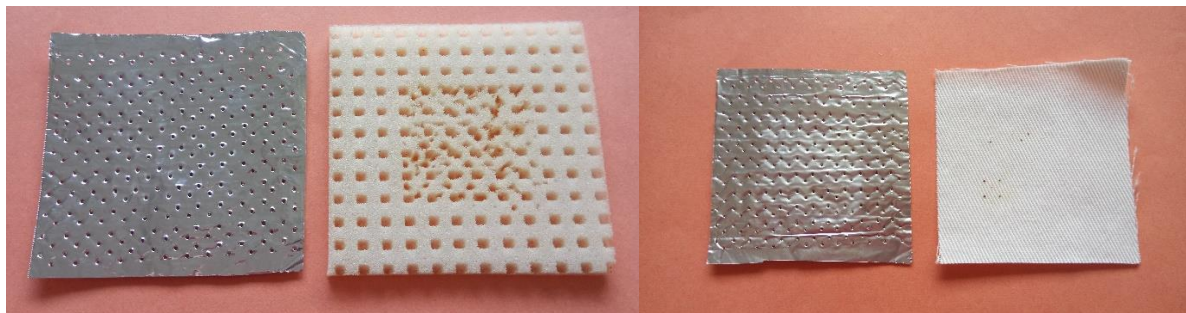
V tabulce 8 jsou zaznamenány okamžité teploty čtyřvrstevných vzorků, které byly během experimentu naměřeny. Tyto dvě sady vzorků, které se lišily pouze v použité PUR pěně tloušťky 0,5 cm a 0,4 cm (plná nebo perforovaná) byly doplněny o čtvrtou, komfortní vrstvu – bavlněnou textilií.



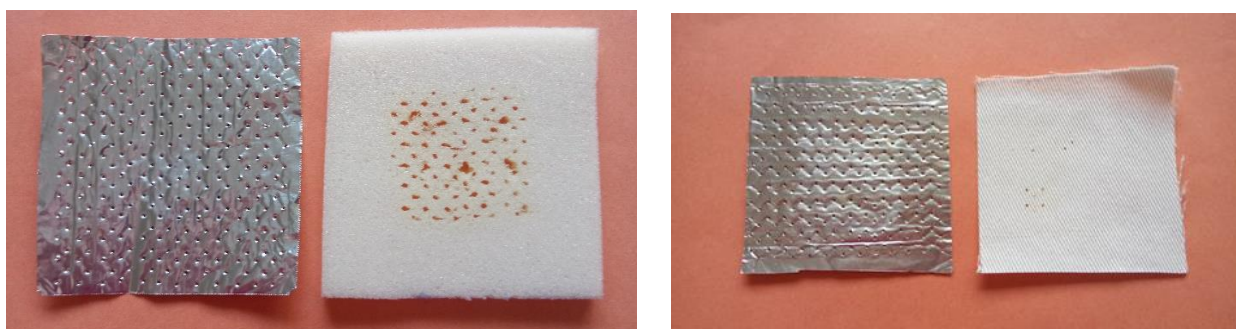
Obrázek 41 Meze intervalů spolehlivosti okamžitých teplot čtyř vrstev

Na obrázku 41 jsou graficky znázorněny průměry okamžitých teplot čtyřvrstevných vzorků. Přestože se PUR pěny lišily tloušťkou i úpravou, rozdíly mezi hodnotami průměrných teplot jsou pouze mezi 1,5 a 2 °C.

U obou sad vzorků došlo k viditelnějšímu propálení PUR pěny a na spodní bavlněné vrstvě jsou patrné drobné stopy poškození povrchu (obrázek 42 a 43).



Obrázek 42 První vzorek čtyřvrstvé textilie po ozáření



Obrázek 43 Druhý vzorek čtyřvrstvé textilie po ozáření

5. Ozařování vícevrstvé textilie (pěti vrstev)

Po testování jednotlivých vrstev materiálů byly ozářeny pětivrstvé vzorky, které se skládaly ze všech uvedených materiálů. Velikost vzorku byla 7x7 cm.

Nejdříve bylo zkušebně ozářeno 10 vzorků vícevrstvé struktury. Poté, co bylo optimalizováno nastavení laserového zařízení, konkrétně doba ozařování, čas skenování a počet obrazových bodů na jednotku, následovalo ozáření dvou sad po pěti vzorcích. První pětice vzorků obsahovala PUR pěnu plošné hmotnosti 175 gm⁻² a tloušťky 1 cm. Druhá pětice

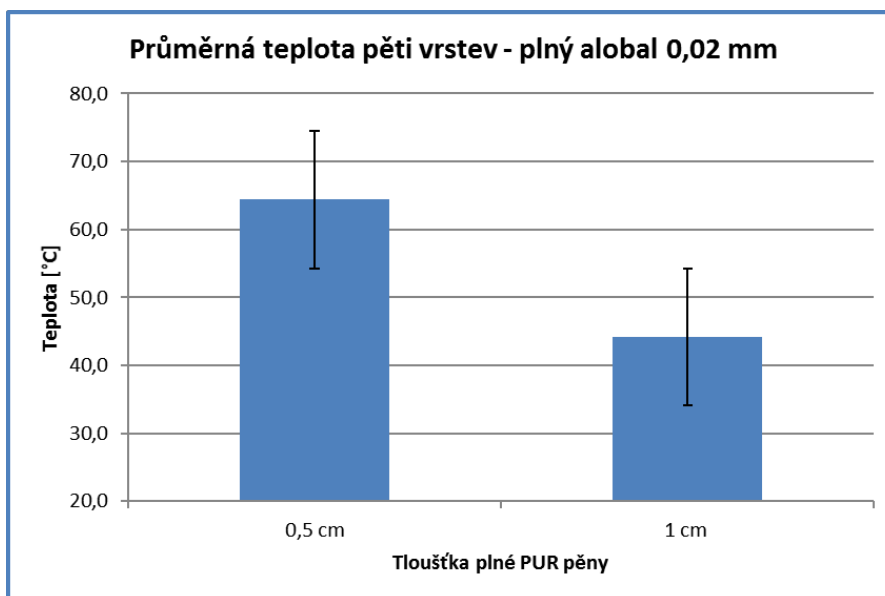
vzorků obsahovala PUR pěnu plošné hmotnosti 126 gm^{-2} a tloušťky 0,5 cm. Vícevrstvá struktura všech vzorků obsahovala dvě vrstvy plné hliníkové folie tloušťky 0,02 mm. Povrchová vrstva byla z čedičové textilie uvedených parametrů a komfortní vrstva (která se dotýká pokožky) byla z bavlněného materiálu.

Tabulka 9 Naměřené teploty – první měření

	Teploty [°C]	
Tloušťka plného alobalu	0,02 mm	
Tloušťka plné PUR pěny	0,5 cm	1 cm
vzorek 1	62,6	49,9
vzorek 2	63,5	40
vzorek 3	61,9	46,3
vzorek 4	66,6	41,5
vzorek 5	67,5	43,2
průměr	64,42	44,18
směr.odchylka	2,44	3,94
IS střední hodnota	2,14	3,45
IS dolní mez	62,28	40,73
IS horní mez	66,56	47,63
variační koeficient [%]	3,79	8,92

Ze získaných hodnot byly vypočteny charakteristiky základní popisné statistiky (tabulka 9). U vzorků, které obsahovaly PUR pěnu menší tloušťky, byly maximální teploty a tudíž i jejich průměry vyšší, než u vzorků s PUR pěnou větší tloušťky. Lišily se také variační koeficienty obou sad vzorků. Menší variační koeficient, tedy menší rozptyl byl zaznamenán u struktury s tenčí (0,5 cm) PUR pěnou.

Na obrázku 44 jsou graficky znázorněny průměrné hodnoty teplot prvního měření. Při srovnání těchto hodnot je patrné, že u pětivrstvé struktury, která obsahovala plnou PUR pěnu tloušťky 0,5 cm, byly průměry i meze intervalů spolehlivosti (horní i dolní) vyšší než u pětivrstvé struktury, která obsahovala PUR pěnu tloušťky 1 cm.



Obrázek 44 Průměrné teploty prvního měření

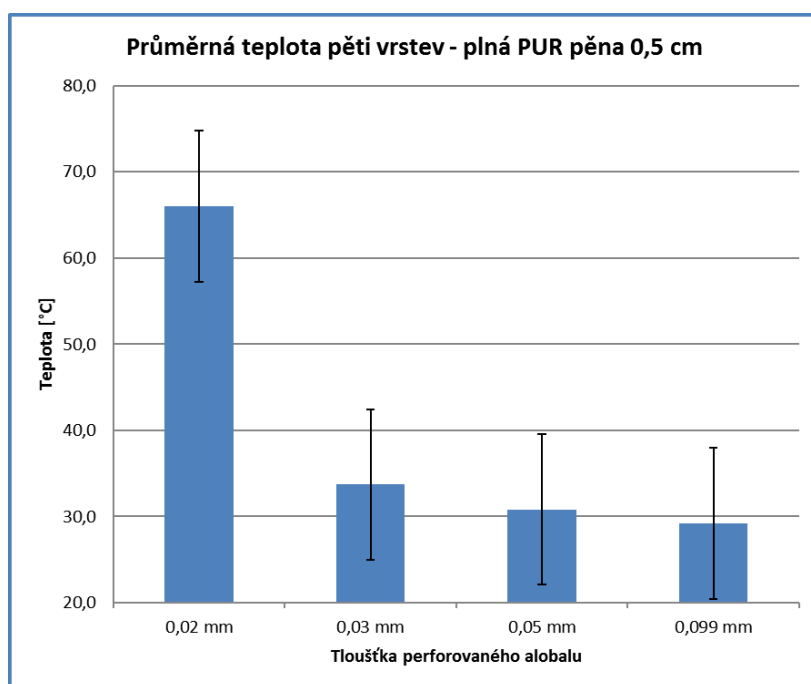
5.1 Vzorky s různou tloušťkou perforované hliníkové fólie

Po nalezení neoptimálnějšího vlastního nastavení laseru a zaznamenání naměřených teplot prvního měření bylo přistoupeno k druhému měření. V tomto experimentu byly ozařovány vícevrstvé vzorky, které obsahovaly PUR pěnu plošné hmotnosti 126 gm^{-2} a tloušťky 0,5 cm a perforované hliníkové folie silné: 0,02 mm, 0,03 mm, 0,05 mm a 0,09 mm. Celková struktura pětivrstvé textilie se nezměnila, jako vrchní ochranná textilie byla opět použita čedičová textilie plošné hmotnosti 723 gm^{-2} a spodní komfortní vrstva byla bavlněná textilie plošné hmotnosti 285 gm^{-2} . Z naměřených maximálních teplot rubní strany vzorků byly vypočteny průměry a další charakteristiky základní popisné statistiky (tabulka 10). Bylo zjištěno, že větší tloušťka hliníkové folie způsobuje pokles teploty vzorku. Vzhledem k destrukci horní čedičové vrstvy vzorku intenzivním působením laserového paprsku na hliníkovou vrstvu, která se nachází bezprostředně pod čedičovou vrstvou, může být pokles teploty způsoben reflexními vlastnostmi hliníkové folie a následně větším rozptylem laserového paprsku. Nezanedbatelnou roli hraje v tomto případě také skutečnost, že obě vrstvy této folie jsou perforované, mohou tedy vícevrstvou strukturu „ochladit“.

Tabulka 10 Naměřené teploty – druhé měření

Tloušťka perforovaného alobalu	Teploty [°C]			
	0,02 mm	0,03 mm	0,05 mm	0,099 mm
Tloušťka plné PUR pěny	0,5 cm			
vzorek 1	69,4	34,6	29,6	28,8
vzorek 2	67,6	33	31,4	29,9
vzorek 3	63,9	34,3	31	29,2
vzorek 4	62,6	31,3	30,8	29
vzorek 5	66,6	35,4	31,3	29,1
průměr	66,0	33,72	30,8	29,2
směr.odchylka	3,75	1,65	0,68	0,85
IS střední hodnota	3,29	1,45	0,60	0,75
IS dolní mez	62,73	32,27	30,22	28,45
IS horní mez	69,31	35,17	31,42	29,95
variační koeficient [%]	5,68	4,89	2,21	2,91

Na obrázku 45 jsou graficky znázorněny průměrné teploty druhého měření. Z tohoto grafu je patrné, že se u různých tloušťek perforovaného obalu naměřené hodnoty liší, nejnižší průměrná teplota byla zaznamenána na pětivrstvé struktuře, která obsahovala perforovaný alobal tloušťky 0,099 mm, naopak nejvyšší průměrná teplota byla zaznamenána na pětivrstvé struktuře, která obsahovala perforovaný alobal tloušťky 0,02 mm.



Obrázek 45 Průměrné teploty druhého měření

Jak již bylo výše uvedeno, při druhém měření byla použita stejná plná PUR pěna tloušťky 0,5 cm. Z tohoto důvodu je možné se domnívat, že průměrnou teplotu, stejně jako horní a dolní meze intervalu spolehlivosti ovlivnila tloušťka a perforace použitého alobalu.

5.2 Vzorky s perforovanou PUR pěnou

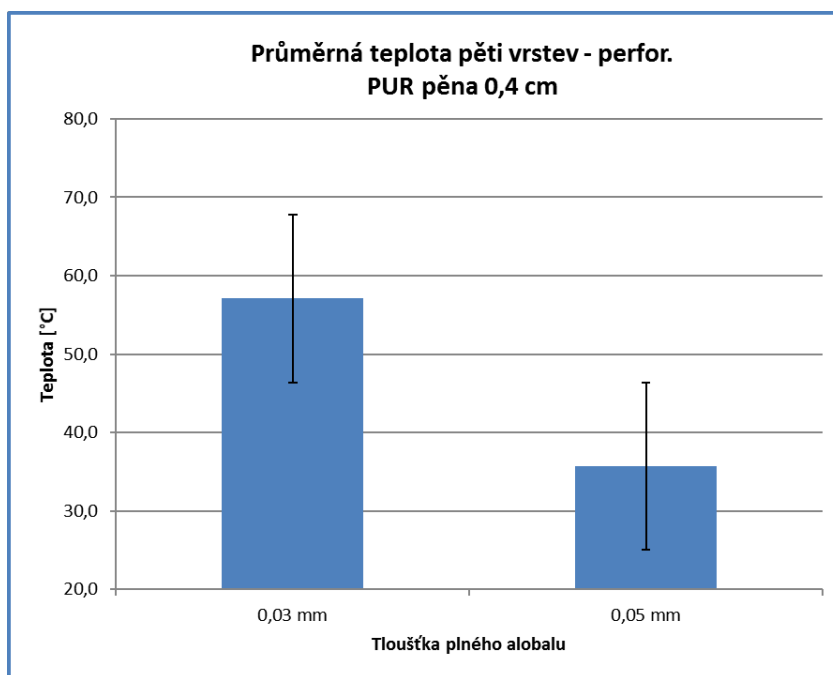
Při třetím a čtvrtém měření teplot rubní strany vzorků byla na rozdíl od předchozích dvou měření použita perforovaná PUR pěna tloušťky 0,4 cm. Složení pětivrstvé struktury se u těchto dvou měření mezi sebou lišilo pouze v parametrech alobalu - byly použity vzorky alobalu tloušťky 0,03 mm a 0,05 mm. Obě vrstvy této hliníkové folie byly testovány neperforované i perforované, vždy po třech vzorcích.

V tabulce 11 jsou zaznamenány naměřené teploty třetího měření teplot na vzorcích pětivrstvé struktury, která obsahovala již zmíněnou perforovanou PUR pěnu tloušťky 0,4 cm a plný alobal tlouštěk 0,03 mm a 0,05 mm. Ze zjištěných teplot byly opět vypočteny průměry a další charakteristiky základní popisné statistiky. U vzorků, které obsahovaly plnou hliníkovou folii, byly u tloušťky 0,03 mm naměřeny nižší průměrné teploty a zaznamenán větší rozptyl, respektive větší směrodatná odchylka hodnot, než u vzorků, které obsahovaly plný alobal tloušťky 0,05 mm.

Tabulka 11 Naměřené teploty – třetí měření plné Al folie

	Teploty [°C]	
	0,03 mm	0,05 mm
Tloušťka plného alobalu	0,03 mm	0,05 mm
Tloušťka perforované PUR pěny	0,4 cm	
vzorek 1	58,7	33,2
vzorek 2	56,4	32,5
vzorek 3	56,2	41,4
průměr	57,1	35,7
směr.odchylka	2,68	4,57
IS střední hodnota	3,03	5,17
IS dolní mez	54,07	30,53
IS horní mez	60,13	40,87
variační koeficient [%]	4,69	12,80

Na obrázku 46 jsou graficky znázorněny průměrné teploty třetího měření. Také z tohoto grafu je patrný rozdíl mezi oběma sadami testovaných vzorků. U pětivrstvé struktury, která obsahovala plný alobal tloušťky 0,05 mm, byly zaznamenány nižší teploty a nižší horní a dolní mez intervalu spolehlivosti než u pětivrstvé struktury, která obsahovala plný alobal tloušťky 0,03 mm. Rozdíl průměrných teplot a tudíž i hodnot dolních a horních mezí intervalu spolehlivosti je v tomto případě poměrně značný, přesahuje 20°C.



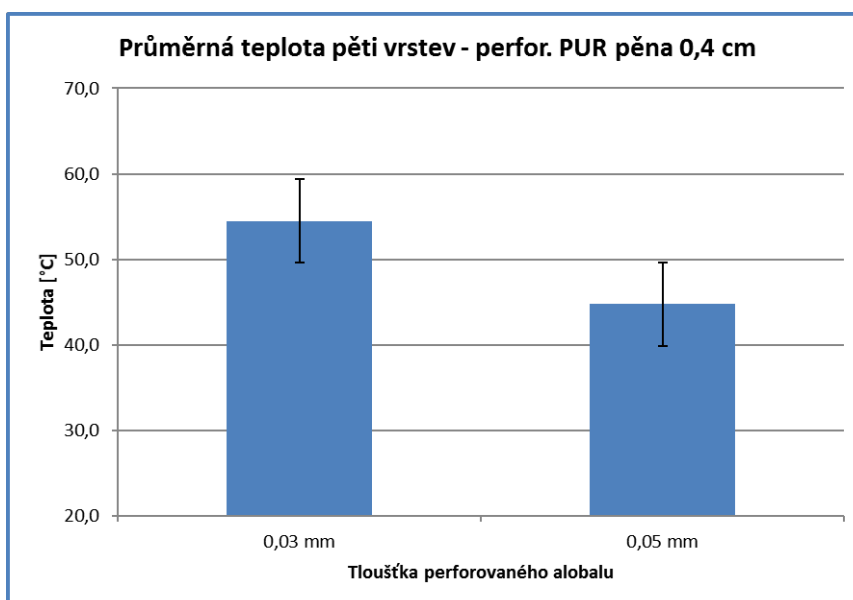
Obrázek 46 Průměrné teploty třetího měření

V tabulce 12 jsou zaznamenány naměřené teploty čtvrtého měření na vzorcích pětivrstvé struktury, které obsahovaly kromě perforované PUR pěny tloušťky 0,4 cm, také perforovaný alobal tloušťek 0,03 mm a 0,05 mm. Srovnáme-li průměrné teploty obou sad vzorků a ostatní základní charakteristiky popisné statistiky, jako je směrodatná odchylka a parametry intervalu spolehlivosti, které byly vypočteny, zjistíme, že se teploty mezi sebou opět liší. Rozdíl je opět patrný. Stejně jako u třetího měření jsou vyšší teploty u vzorků s nižší tloušťkou alobalu (0,03 mm). Rozdíl mezi průměrnými teplotami obou sad testovaných vzorků činí přibližně 10°C.

Tabulka 12 Naměřené teploty – čtvrté měření (perforovaná folie)

	Teploty [°C]	
	0,03 mm	0,05 mm
Tloušťka perforovaného alobalu	0,03 mm	0,05 mm
Tloušťka perforované PUR	0,4 cm	
vzorek 1	54,7	42,3
vzorek 2	54,8	47,8
vzorek 3	53,9	44,1
průměr	54,5	44,7
směr.odchylka	2,17	3,92
IS střední hodnota	2,46	4,44
IS dolní mez	52,01	40,30
IS horní mez	56,92	49,17
variační koeficient [%]	3,98	8,76

Obrázek 47 znázorňuje průměrné teploty čtvrtého měření. Jak již bylo v této práci zmíněno, naměřené hodnoty i výpočty popisné statistiky se u těchto dvou sad vzorků mezi sebou liší. Vyšší průměrná teplota byla zaznamenána u pětivrstvé struktury, která obsahovala menší tloušťku alobalu, tedy tloušťku 0,03 mm.



Obrázek 47 Průměrné teploty čtvrtého měření

V tabulce 13 jsou porovnány naměřené teploty třetího a čtvrtého měření, tedy vzorků, obsahujících plný a perforovaný alobal tloušťky 0,03 mm. Jak je z tabulky patrné, rozdíly mezi těmito dvěma sadami vzorků jsou pouze 2,6°C.

Tabulka 13 Srovnání naměřených hodnot perforované a plné Al folie (0,03 cm)

	Teploty [°C]	
	plný	perforovaný
Alobal (0,03 mm)		
Tloušťka perforované PUR pěny	0,4 cm	
vzorek 1	58,7	54,7
vzorek 2	56,4	54,8
vzorek 3	56,2	53,9
průměr	57,1	54,5
směr.odchylka	2,68	2,17
IS střední hodnota	3,03	2,46
IS dolní mez	54,07	52,01
IS horní mez	60,13	56,92
variační koeficient [%]	4,69	3,98

V tabulce 14 jsou porovnány naměřené teploty vzorků, které obsahovaly plný nebo perforovaný alobal tloušťky 0,05 mm. Naměřené teploty jsou ve srovnání s alobalem tloušťky 0,03 mm nižší. U vzorků s plným alobalem můžeme pozorovat rozdíl 21 °C.

Tabulka 14 Srovnání naměřených hodnot perforované a plné Al folie (0,05 cm)

	Teploty [°C]	
	plný	perforovaný
Alobal (0,05 mm)		
Tloušťka perforované PUR pěny	0,4cm	
vzorek 1	33,2	42,3
vzorek 2	32,5	47,8
vzorek 3	41,4	44,1
průměr	35,7	44,7
směr.odchylka	4,57	3,92
IS střední hodnota	5,17	4,44
IS dolní mez	30,53	40,30
IS horní mez	40,87	49,17
variační koeficient [%]	12,80	8,76

5.3 Vyhodnocení výsledků experimentu

Vzhledem ke zkoumání možnosti ochrany textilií před tepelnými účinky laserového záření bylo provedeno srovnání naměřených teplot s poznatky o závislosti teploty kůže na délce expozice. Byly zpracovány výsledky jednoho měření, pětivrstvého vzorku, který obsahoval plnou PUR pěnu tloušťky 0,5 cm a perforovaný alobal tloušťky 0,05 mm a zaznamenána délka působení vybraných teplot na vzorek.

T [°C]	Maximální doba do popálení [s]	Doba působení teplot [s] - vzorek s plnou PUR pěnou 0,5 cm a perfor. alobalem 0,05 mm
40	21600	9,66
43,5	3600	12,14
49	600	10,9
55	30	8
60	10	11,4
70	2	0

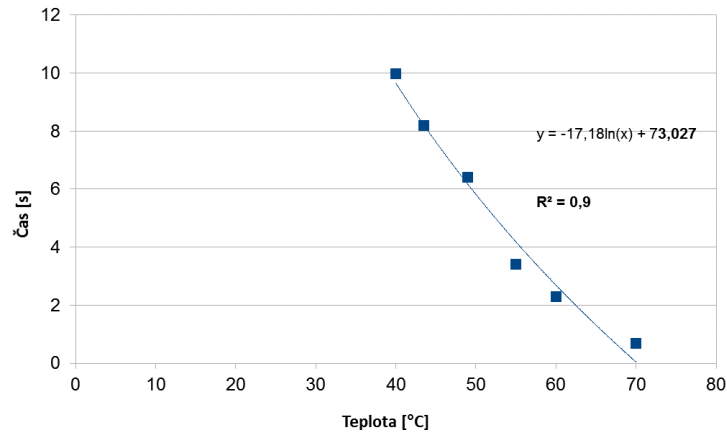
Tabulka 15 Porovnání experimentu s maximální dobou do popálení

Konkrétně se jednalo o teploty 40°C; 43,5°C; 49°C; 55°C; 60°C a 70°C. Porovnáním bylo zjištěno, že délka expozice v některých případech přesahuje snesitelnou dobu pro lidskou pokožku a v některých případech je tato doba nižší.

Pro přesnější výpočet byla data z literatury aproximována logaritmickou funkcí a tím byly spočítány časy poškození kůže při libovolných teplotách. Tento výpočet vychází z logaritmické funkce, která prokládá již zmiňovaná data z literatury – maximální dobu do popálení (tabulka 15).

Vycházíme z předpokladu, že se data sčítají. Po sečtení těchto efektů získáme sumu tepelných působení. V případě, že je výsledek větší než 100%, dochází k poškození kůže. Každá hodnota, která přesáhne hranici 100%, znamená drastičtější poškození pokožky.

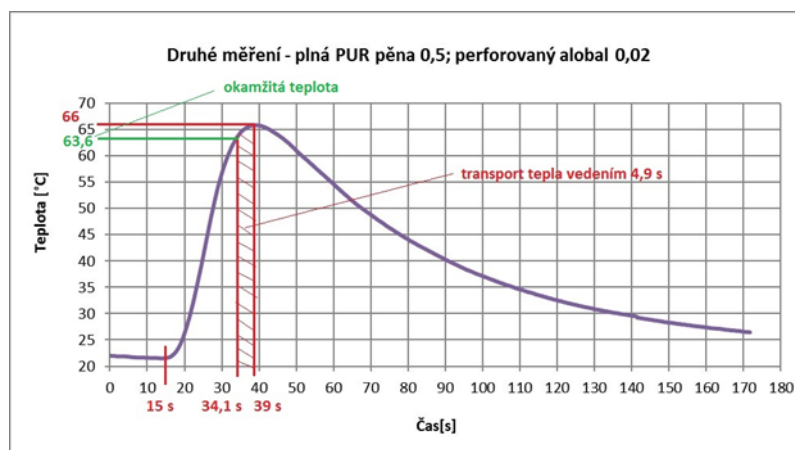
Na obrázku 48 jsou graficky znázorněny hodnoty z literatury, které byly aproximovány logaritmickou funkcí. U těchto dat, která pocházejí z literatury o poškození kůže a vzniku popálenin, se s rostoucí teplotou zkracuje doba snesitelnosti do poškození kůže.



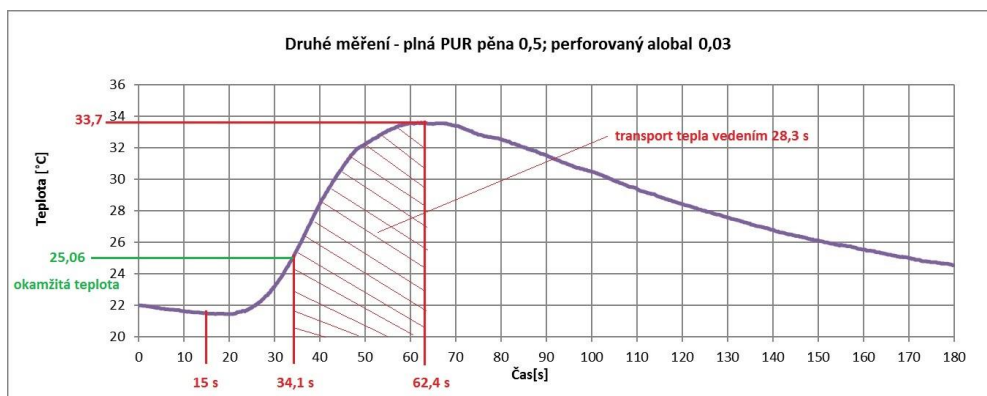
Obrázek 48 Grafické znázornění dat z literatury

V čase, kdy bylo zaznamenáno vypnutí laseru, byla změřena okamžitá teplota. U vícevrstevných vzorků došlo k dalšímu zvyšování teploty až po dosažení maximální teploty, což je způsobeno transportem tepla vedením mezi jednotlivými vrstvami. Pro porovnání je na obrázku 49 a 50 znázorněn čas přenosu tepla vedením. Nejkratší čas přenosu tepla vedením byl 4,9 sekund (obr. 49)., Nejdelší čas transportu tepla vedením byl 28,3 sekund (obr. 50).

Dalším poznatkem, který vyplynul z experimentu, byla skutečnost, že se při měření maximálních a okamžitých teplot pětivrstevných vzorků projevil transport tepla vedením.



Obrázek 49 Doba přenosu tepla vedením u první sady vzorků druhého měření



Obrázek 50 Doba přenosu tepla vedením u druhé sady vzorků druhého měření

Parametry všech vzorků jsou uvedeny v tabulce 16. Kromě materiálu, plošných hmotností a tloušťek, popřípadě složení vícevrstvých vzorků jsou zde uvedeny maximální teploty všech vzorků. U všech testovaných vzorků je uvedeno poškození kůže v procentech.

Při porovnávání tloušťky vícevrstvých vzorků, které obsahují perforovaný alobal a plnou nebo perforovanou PUR pěnu je nutné počítat se skutečností, že výstupky mikro otvorů perforovaného alobalu proniknou do pěny.

Maximální teplota čediče byla zhruba 2038 °C a bavlněného vzorku, který v místě ozařování laserem shořel, byla maximální teplota 508,2°C. Velmi vysoké maximální teploty byly naměřeny také na obou PUR pěnách. Plná PUR pěna tloušťky 0,5 cm měla maximální teplotu 1999,7 °C a u vzorku perforované PUR pěny tloušťky 0,4 cm byla naměřena maximální teplota 366,4 °C. U těchto vzorků, stejně jako u vzorků perforovaného alobalu, bylo zjištěno předpokládané totální poškození pokožky.

Naměřené maximální teploty na vzorcích plného alobalu se pohybovaly mezi 23 až 24 °C a k poškození pokožky by nedošlo. Skutečnost, že na vzorcích plného alobalu byly naměřeny nejnižší maximální teploty, ovšem nemění nic na známém faktu, že je alobal schopen laserový paprsek odrazit. Proto by nemohl být použit jako vrchní materiál, chránící před laserem.

Nejvyšší maximální teplota pětivrstvého vzorku, 66°C byla naměřena na vzorku, který obsahoval kromě čedičové a bavlněné textilie plnou PUR pěnu tloušťky 0,5 cm a perforovaný alobal tloušťky 0,02 mm. Z hlediska ochrany pokožky před laserovým paprskem se jeví jako nejúčinnější pětivrstvý vzorek obsahující plnou PUR pěnu tloušťky

0,5 cm a perforovaný alobal tloušťky 0,099 mm, na kterém byla naměřena nejnižší maximální teplota, 29,2°C. Obě zmiňované teploty souvisí s možným poškozením kůže, u prvního zmiňovaného vzorku by toto poškození bylo zhruba 1585 %, zatímco u druhého vzorku by k žádnému poškození pokožky nedošlo.

V souvislosti s výše uvedenými výsledky je nutné zmínit skutečnost, že by pětivrstvá struktura zhruba ve dvou případech dokázala zabránit poškození pokožky, dosáhla by ovšem poměrně velké celkové plošné hmotnosti, která by se pohybovala mezi 1200 a 1400 gm⁻².

V tabulce 17 jsou uvedeny okamžité teploty jednotlivých vzorků plného a perforovaného alobalu, obou PUR pěn, čediče, bavlny, dvouvrstevných a čtyřvrstevných vzorků. Nejvyšší okamžitá teplota byla naměřena na vzorku čedičové textilie. Naopak nejnižší okamžité teploty byly zaznamenány na vzorcích plného alobalu. Vzorky, které se skládaly ze dvou vrstev – alobalu (dvou různých tlouštěk) a PUR pěny (plné nebo perforované) měly nižší okamžité teploty, než vzorky, složené ze čtyř vrstev (dvou vrstev alobalu a bavlny).

Tabulka 16 Parametry všech vzorků

Vzorky	čedič		alobal		plný		PUR pěna		plná		alobal		plný		bavlna	celková	celková	max. teplota	poškození kůže
	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka					
	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]					
1			60	0,02											60	0,02	24,2	0	
2			84,7	0,03											85	0,03	23,7	0	
3			142,4	0,06											142	0,06	23,4	0	
4			275,1	0,25											275	0,25	22,6	0	
5			84,5	0,47											85	0,47	995,3	1,86*10 ³⁰³	
6			87,1	0,77											87	0,77	1473,6	1,50*10 ²³⁹	
7			142	0,86											142	0,86	674,7	5,06*10 ¹⁰³	
8			275,5	1,4											285	0,55	697,1	3,62*10 ¹⁰⁷	
9					142	0,86									142	0,86	1999,7	1,87*10 ³⁰³	
10					101,9	4,46									102	4,46	366,4	2,63*10 ⁵¹	
11	723	0,83													723	0,83	2038,0	7,65*10 ³⁰³	
12										285	0,55	276	1,40			508,2	3,27*10 ⁷⁵		
13			142	0,86	142	0,86									284	1,72	212,3	3,36	
14			142	0,86	101,9	4,46									244	5,32	236,9	1,39	
15			142	0,86	142	0,86	142	0,86	285	0,55					569	3,13	35,6	0,02	
16			142	0,86	101,9	4,46	142	0,86	285	0,55					529	6,73	37,4	0,04	
17	723	0,83	60	0,02	175	10,06	60	0,02	285	0,55					1303	11,48	44,1	0,06	
18	723	0,83	60	0,02	142	0,86	60	0,02	285	0,55					1270	2,28	64,4	922,53	
19	723	0,83	84,5	0,47	126	6,9	84,5	0,47	285	0,55					1219	8,75	66,0	1584,85	
20	723	0,83	87,1	0,77	126	6,9	87,1	0,77	285	0,55					1221	9,82	33,7	0,02	
21	723	0,83	142	0,86	126	6,9	142	0,86	285	0,55					1276	10,0	30,8	0,01	
22	723	0,83	275,5	1,4	126	6,9	275,5	1,4	285	0,55					1410	11,1	29,2	0	
23	723	0,83	84,7	0,03	101,9	4,46	84,7	0,03	285	0,55					1279	5,90	57,1	61,56	
24	723	0,83	142,4	0,06	101,9	4,46	142,4	0,06	285	0,55					1395	5,96	35,7	0,04	
25	723	0,83	87,1	0,77	101,9	4,46	87,1	0,77	285	0,55					1197	7,38	59,1	24,23	
26	723	0,83	142	0,86	101,9	4,46	142	0,86	285	0,55					1252	7,56	44,7	0,90	

Tabulka 17 Okamžité teploty jednotlivých materiálů, dvouvrstevných a čtyřvrstevných vzorků

Vzorky	čedič		alobal	perfor.	PUR pěna	perfor.	alobal	perfor.	bavlna		celková	celková	okamžitá teplota [°C]
	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	pl. hm.	tloušťka	
	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	[gm ⁻²]	[mm]	
1			60	0,02							60	0,02	22,6
2			84,7	0,03							85	0,03	23,2
3			142,4	0,06							142	0,06	22,9
4			275,1	0,25							275	0,25	22,4
5			84,5	0,47							85	0,47	24,1
6			87,1	0,77							87	0,77	24,6
7			142	0,86							142	0,86	23,5
8			275,5	1,4							285	0,55	24,1
9					142	0,86					142	0,86	55,0
10					101,9	4,46					102	4,46	23,8
11	723	0,83									723	0,83	166,7
12									285	0,55	276	1,40	23,3
13			142	0,86	142	0,86					284	1,72	57,0
14			142	0,86	101,9	4,46					244	5,32	55,1
15			142	0,86	142	0,86	142	0,86	285	0,55	569	3,13	35,5
16			142	0,86	101,9	4,46	142	0,86	285	0,55	529	6,73	37,2

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo testování vícevrstvé textilie z hlediska možné ochrany před laserovým zářením. Nejdříve byly testovány jednotlivé vzorky, dvouvrstvé a čtyřvrstvé struktury, na kterých byly měřeny okamžité a maximální teploty a poté bylo přistoupeno k testování pětivrstvých vzorků, které kromě dvou vrstev plného nebo perforovaného alobalu a plné nebo perforované PUR pěny obsahovaly vrchní ochrannou vrstvu – čedičovou textilií a komfortní vrstvu, která přichází do styku s pokožkou, pro kterou byla vybrána bavlněná textilie.

Z naměřených teplot rubních stran vzorků byly poté vypočítány průměrné teploty, základní charakteristiky popisné statistiky a výsledky byly porovnány. Bylo zjištěno, že nejvyšší maximální průměrná teplota byla naměřena na pětivrstevném vzorku, který obsahoval plnou PUR pěnu tloušťky 0,5 cm a perforovaný alobal tloušťky 0,02 mm.

Pomocí logaritmické funkce byla aproximována data z literatury zabývající se závislostí teploty kůže na délce expozice teplu nebo jiné energii, tím bylo možné stanovit maximální dobu, než dojde k nevratnému poškození kůže. Provedenými experimenty byla získána závislost teploty na době působení infračerveného laserového záření na testované vícevrstvé struktury. Z výsledků průměrných teplot pětivrstevných testovaných vzorků byl proveden výpočet poškození kůže v procentech. Tyto experimentální výsledky byly porovnány s údaji z literatury.

Nejnižší maximální teploty byly naměřeny na vzorcích plného alobalu. Je ovšem nutné zmínit skutečnost, že alobal je schopen odrazit laserový paprsek, což představuje extrémní nebezpečí především z hlediska nevratného poškození zraku. Právě z tohoto důvodu byla zvolena jako ochranná vrstva čedičová textilie, u které sice dojde k destrukci, ale laserový paprsek neodrazí.

Vhodná volba jednotlivých materiálů a jejich uspořádání potvrdilo možnost ochrany lidské pokožky před laserovým zářením právě tímto způsobem, tedy pětivrstvou strukturou materiálů. Výsledky ukázaly, že k potenciálně žádnému poškození pokožky by nedošlo u vzorku obsahujícího plnou PUR pěnu tloušťky 0,5 cm a perforovaný alobal tloušťky 0,099 mm. Jako nevýhoda se ovšem jeví fakt, že zmiňovaný vzorek má vysokou celkovou plošnou hmotnost, zhruba 1410 gm^{-2} . Z tohoto důvodu by pro další experiment bylo vhodné použít

bavlněný materiál nebo čedič nižší plošné hmotnosti. Právě snížením plošné hmotnosti těchto dvou materiálů by došlo ke zvýšení komfortu a možnosti použití vícevrstvé textilie k ušití ochranné rukavice.

7. Literatura

- [1] SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. Prometheus, Praha, 2006. ISBN 978-80-7196-307-3
- [2] VRBOVÁ, Miroslava a kol.: Lasery a moderní optika – Oborová encyklopedie, Praha: Prometheus, 1994.
- [3] HALLIDAY, David – RESNICK, Robert – WALKER, Jearl: Fyzika
Druhé přepracované vydání Praha SNTL ISBN 978-80-214-4123-1
- [4] MILITKÝ, Jiří. Textilní vlákna. Klasická a speciální. Liberec: TUL, září 2002. ISBN 80-7083-644-X.
- [5] VRBOVÁ, Miroslava., JELÍNKOVÁ Helena., GAVRILOV Petr.: Úvod do laserové techniky. ČVUT, Praha, 1994.
- [6] SODOMKA, Ladislav. Lasery v textilních oborech. Přednášky na TUL
- [7] DOHNAL, Miroslav. Lasery a jejich aplikace v polygrafii. Katedra polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice, leden 2008. ISBN 978-80-7395-043-9
- [8] FT Fine Tec systems. Laserová ochrana. Ochrana proti laserovému záření Laservision [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.fine-tec.cz/laserova-ochrana/skoleni-laserove-bezpecnosti/>
- [9] KÖNIGOVÁ, Radana. Komplexní léčba popálenin. Grada Publishing, Praha, 1999. ISBN 80-7169-416-9.
- [10] VIK, Michal. Základy měření barevnosti I. Díl. TUL, duben 1995. ISBN 80-7083-162-6
- [11] ALUMINIUM SHOP. Alobal – silná folie. [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.aluminiumshop.cz/?c=254/alobal-silna-folie>
- [12] NIS Nábytkářský informační systém. Polyuretanová pěna [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.n-i-s.cz/cz/polyuretanova-pena--pur-pena/page/458/>
- [13] Manuál Easy Laser, S. L.: GFK, EasyMark 2007, EL Rev 2.0, 2006.

[14] TOPTERMOSTAT. Ruční infračervený bezdotykový teploměr Optris LS. [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.toptermostat.cz/rucni-infracervený-bezdotykový-teplomer-optris-ls/>

[15] Katedra fyziky. Fakulta stavební ČVUT. Lasery a moderní fyzika [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/vyuka/lasery-moderni-fyzika?prezentace>

[16] DLAMINI, Nkululeko Muzi Patrick: Finishing of basalt fibres. Liberec 2011. V 308/11T, 98 s.

Zdroje obrázků:

[1] SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. Prometheus, Praha, 2006. ISBN 978-80-7196-307-3

[2] MILITKÝ, Jiří. Textilní vlákna. Klasická a speciální. Liberec: TUL, září 2002. ISBN 80-7083-644-X.

[3] HALLIDAY, David – RESNICK, Robert – WALKER, Jearl: Fyzika

[4] DOHNAL, Miroslav. Lasery a jejich aplikace v polygrafii. Katedra polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice, leden 2008. ISBN 978-80-7395-043-9

[5] KÖNIGOVÁ, Radana. Komplexní léčba popálenin. Grada Publishing, Praha, 1999. ISBN 80-7169-416-9.

[6] VRBOVÁ, Miroslava., JELÍNKOVÁ Helena., GAVRILOV Petr.: Úvod do laserové techniky. ČVUT, Praha, 1994.

[7] VIK, Michal. Základy měření barevnosti I. Díl. TUL, duben 1995. ISBN 80-7083-162-6

[8] BASALTEX a.s. Zpracování čedičových vláken do technických výrobků [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.basaltex.cz/cedic/ukazky/ukazky.htm>

[9] ALUMINIUM SHOP. Alobal – silná folie. [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.aluminiumshop.cz/?c=254/alobal-silna-folie>

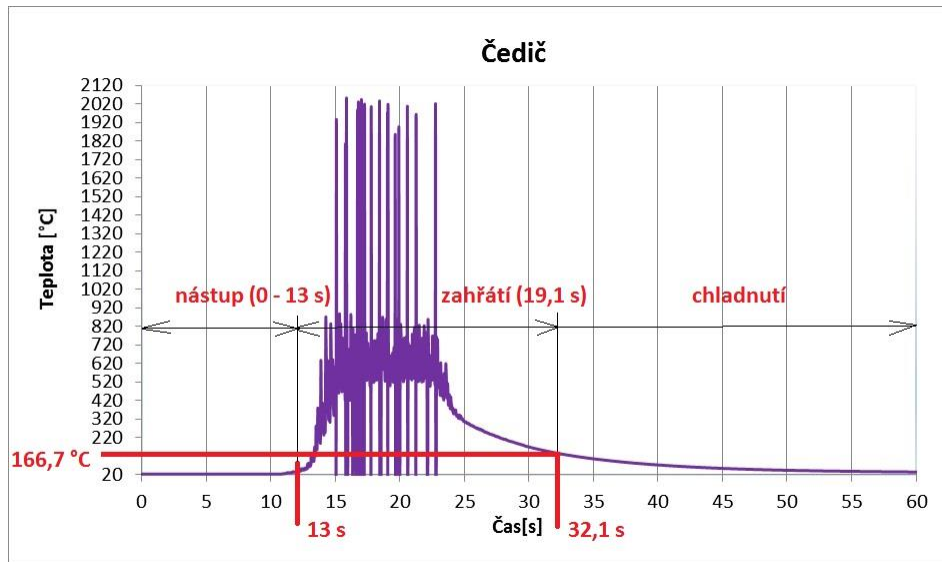
[10] NIS Nábytkářský informační systém. Polyuretanová pěna [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.n-i-s.cz/cz/polyuretanova-pena--pur-pena/page/458/>

- [11] LAO. Lasery a optika. Seriál na téma lasery. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [12] Manuál Easy Laser, S. L.: GFK, EasyMark 2007, EL Rev 2.0, 2006.
- [13] Navrátil, Ladislav, Kuna, Petr. a kol.: Klinická radiobiologie, 1. vyd. Praha, Manus, 2005. 222 s.
- [14] MEGAFLEX The Marking company. Řezání laserem. [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.megaflex.cz/lasery/material/rezani-textilu/>
- [15] Bezpečnostní tabulky - laserové záření. Tabulka pro pracoviště s lasery. [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z https://www.e-safetyshop.eu/product.asp?P_ID=52
- [16] TOPTERMOSTAT. Ruční infračervený bezdotykový teploměr Optris LS. [Online] [Cit. 2017/5/5] Dostupné z <http://www.toptermostat.cz/rucni-infracerveny-bezdotykovy-teplomer-optris-ls/>

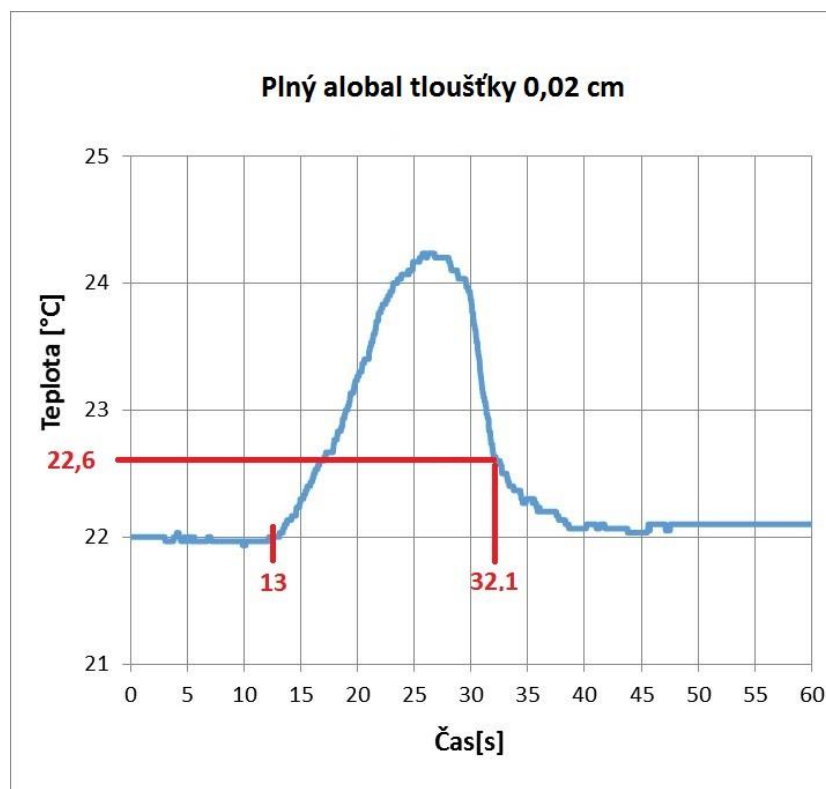
Příloha

Grafy a tabulka

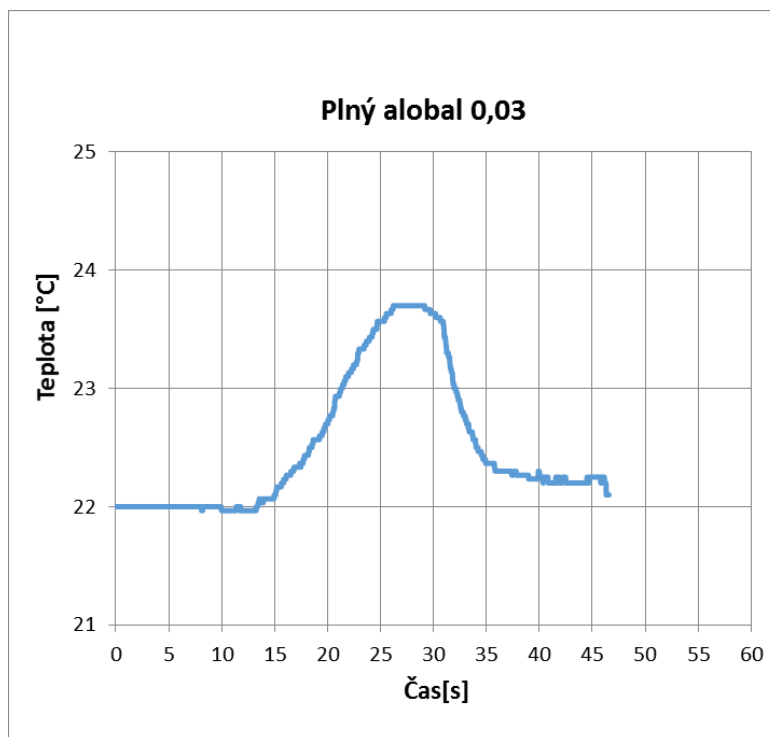
Testování jednotlivých vrstev



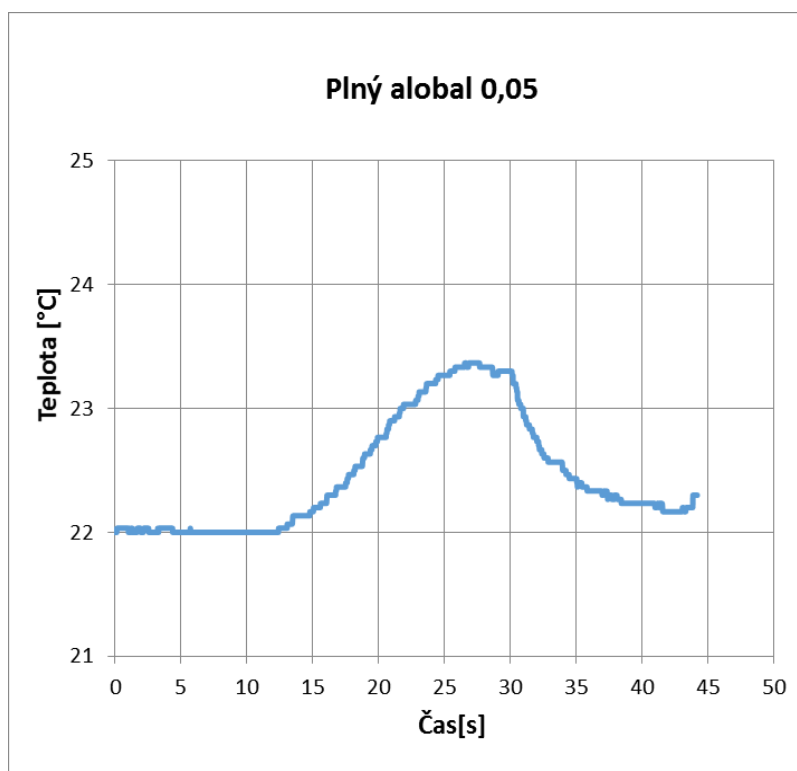
Obrázek 51 Čedičová textilie



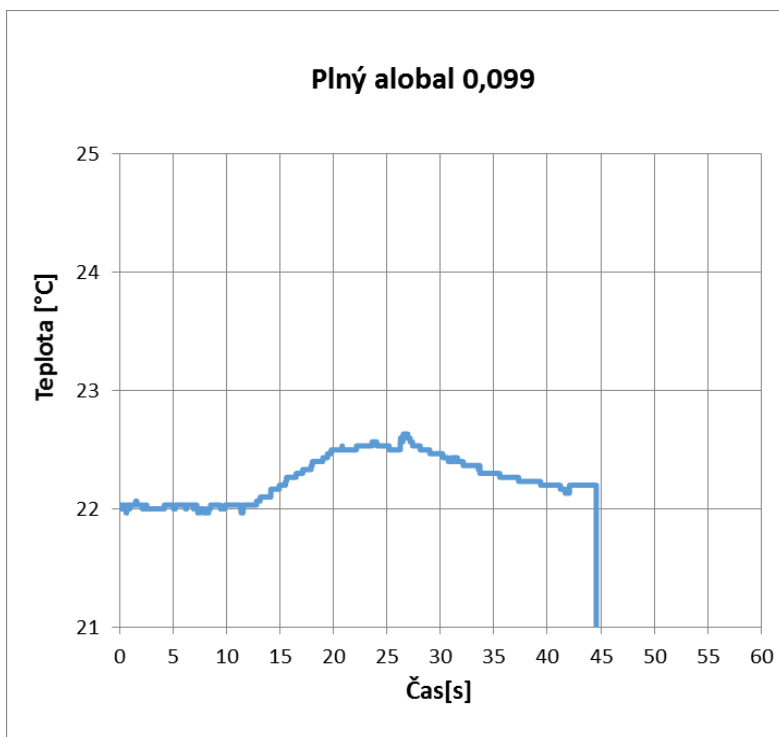
Obrázek 52 Plný alobal tloušťky 0,02 mm – okamžitá teplota



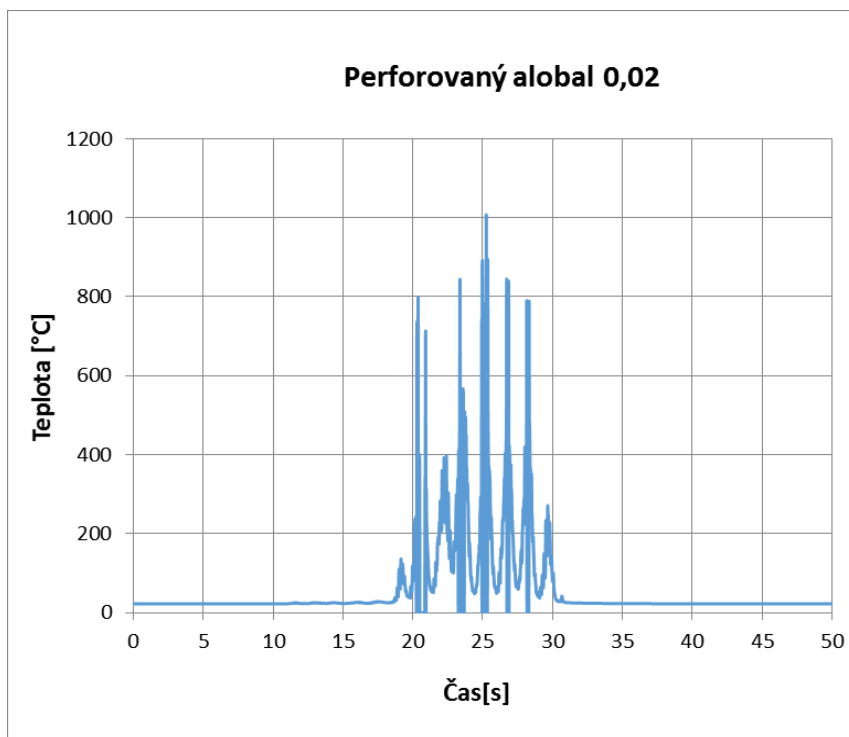
Obrázek 53 Plný alobal tloušťky 0,03 mm



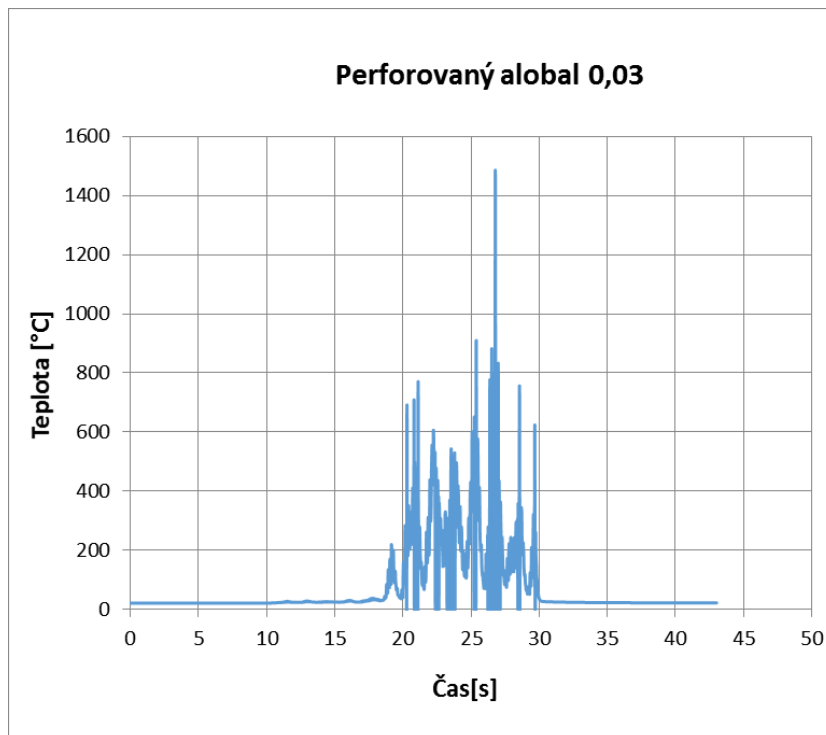
Obrázek 54 Plný alobal tloušťky 0,05 mm



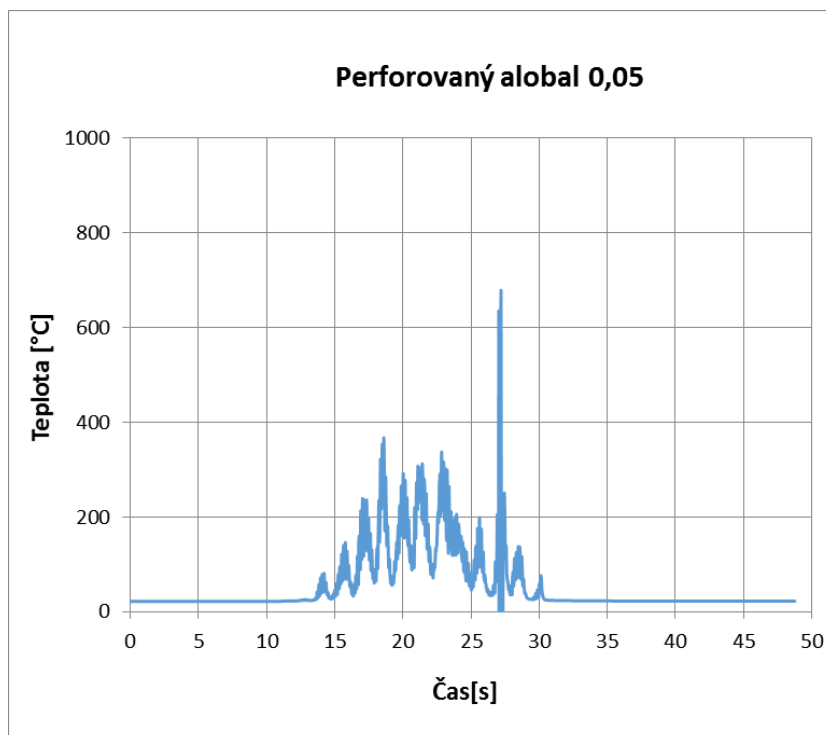
Obrázek 55 Plný alobal tloušťky 0,099 mm



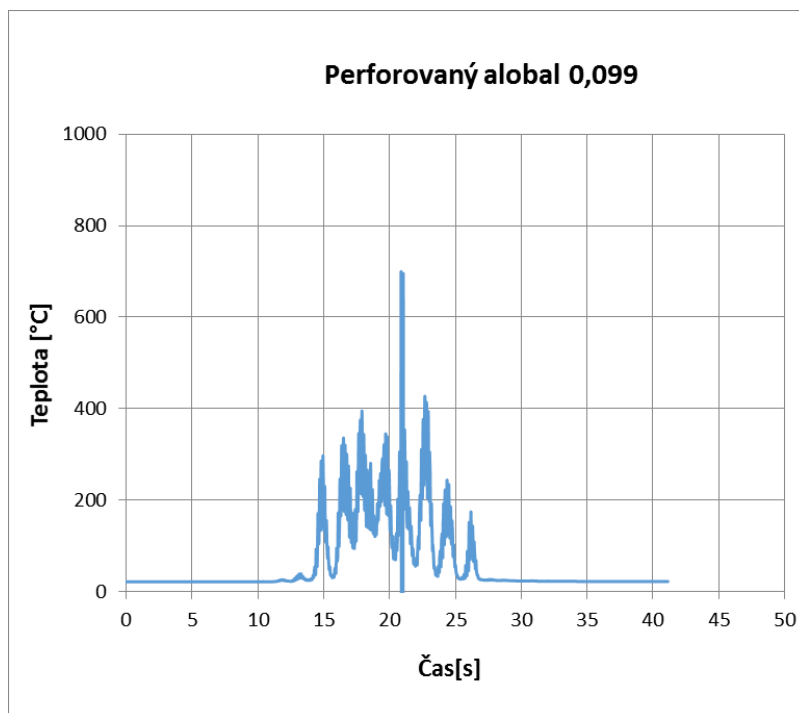
Obrázek 56 Perforovaný alobal tloušťky 0,02 mm



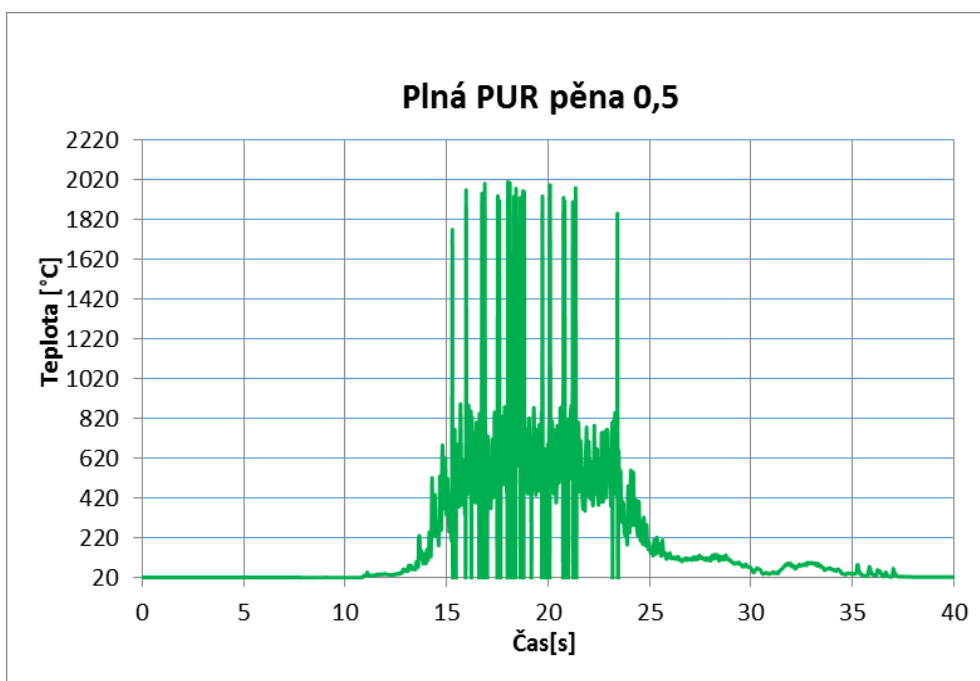
Obrázek 57 Perforovaný alobal tloušťky 0,03 mm



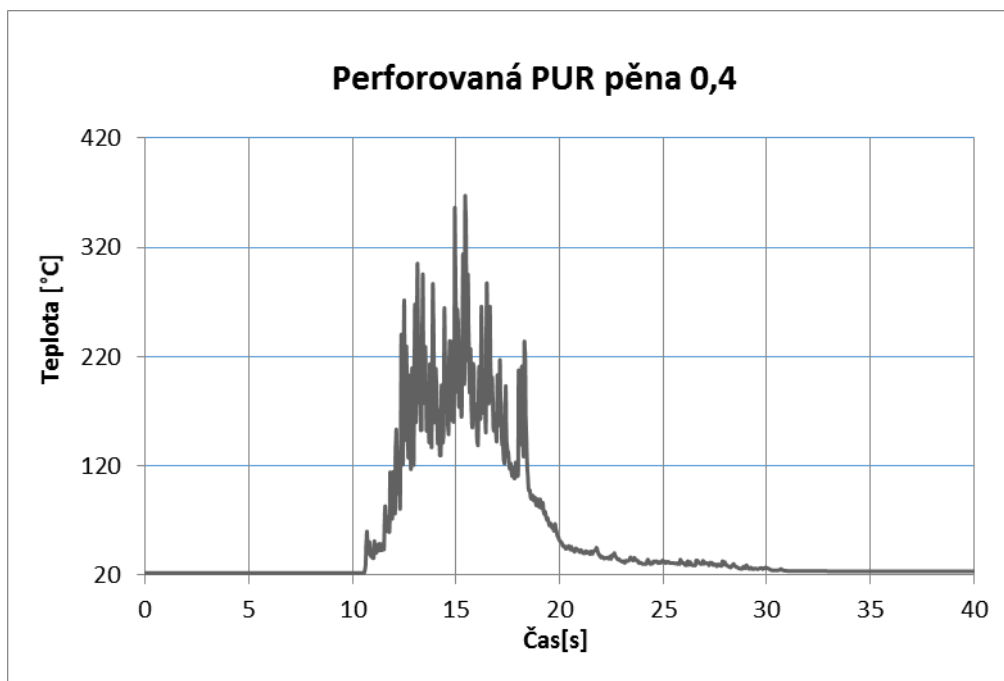
Obrázek 58 Perforovaný alobal tloušťky 0,05 mm



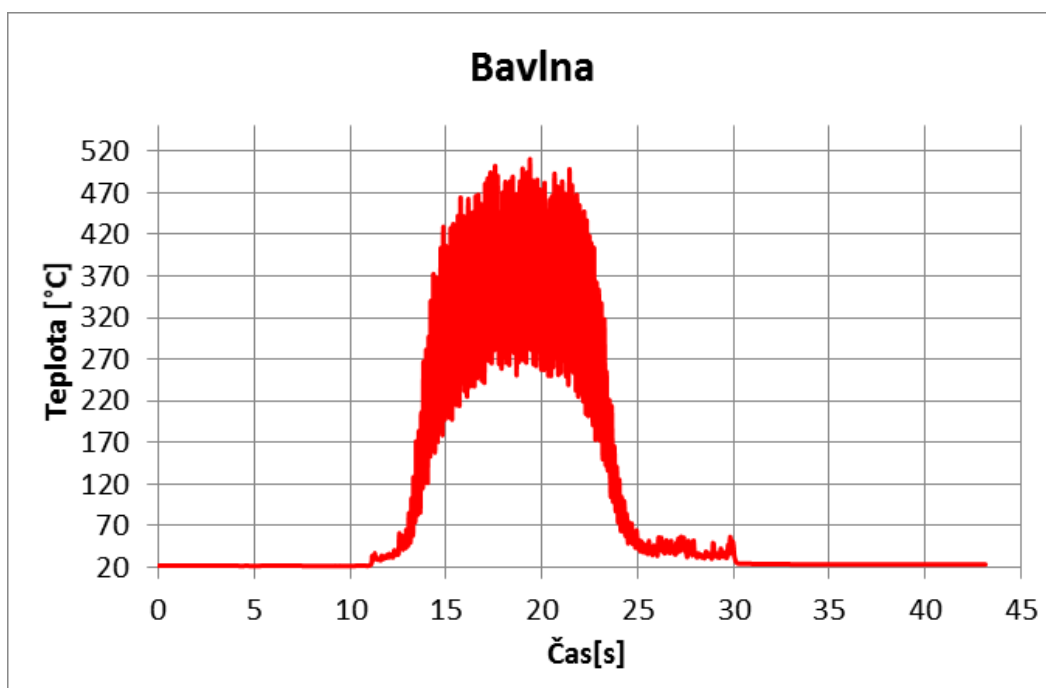
Obrázek 59 Perforovaný alobal tloušťky 0,099 mm



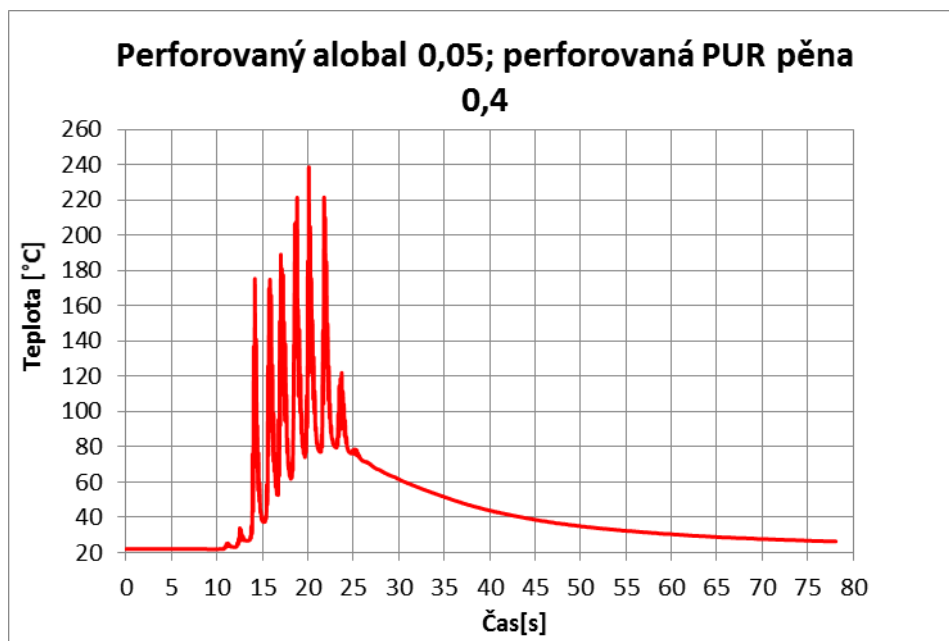
Obrázek 60 Plná PUR pěna tloušťky 0,5 cm



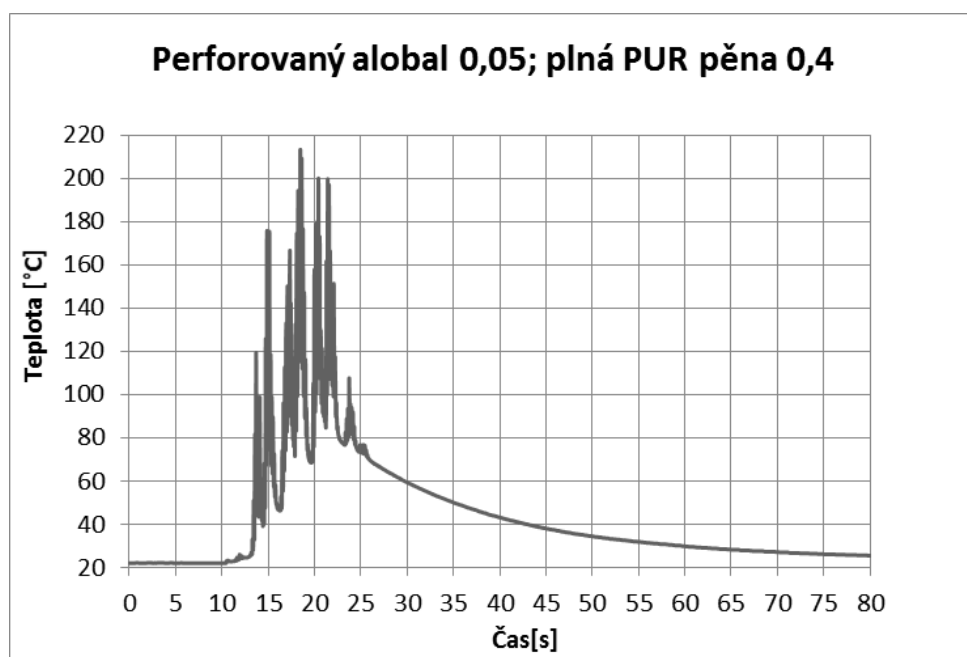
Obrázek 61 Perforovaná PUR pěna tloušťky 0,4 cm



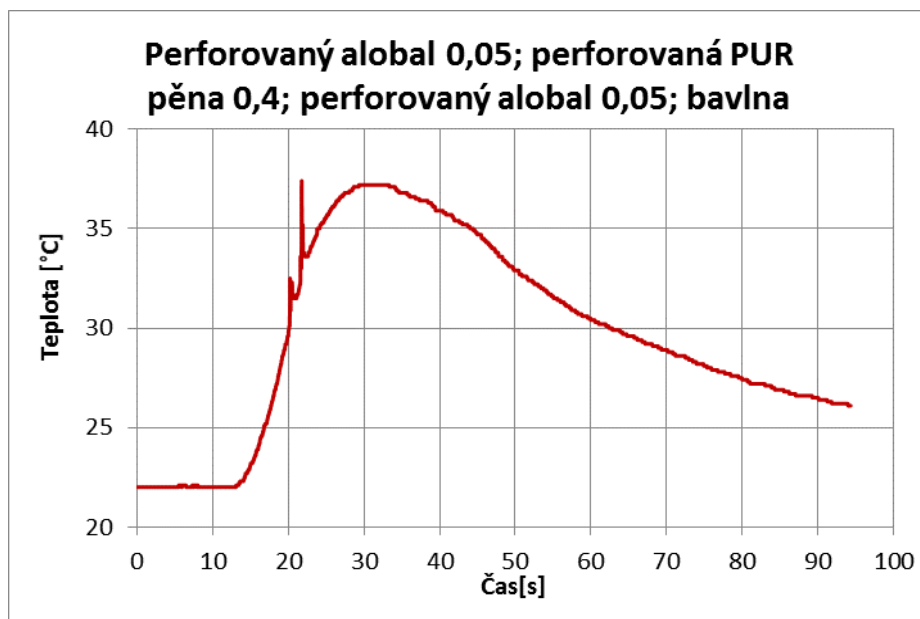
Obrázek 62 Bavlna



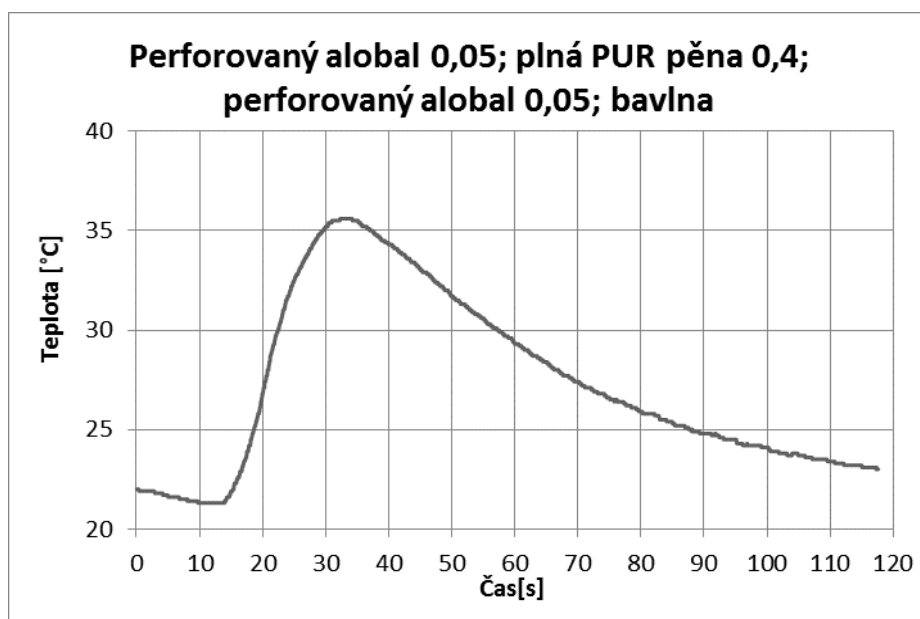
Obrázek 63 Dvourstvý vzorek s perforovanou PUR pěnou



Obrázek 64 Dvourstvý vzorek s plnou PUR pěnou

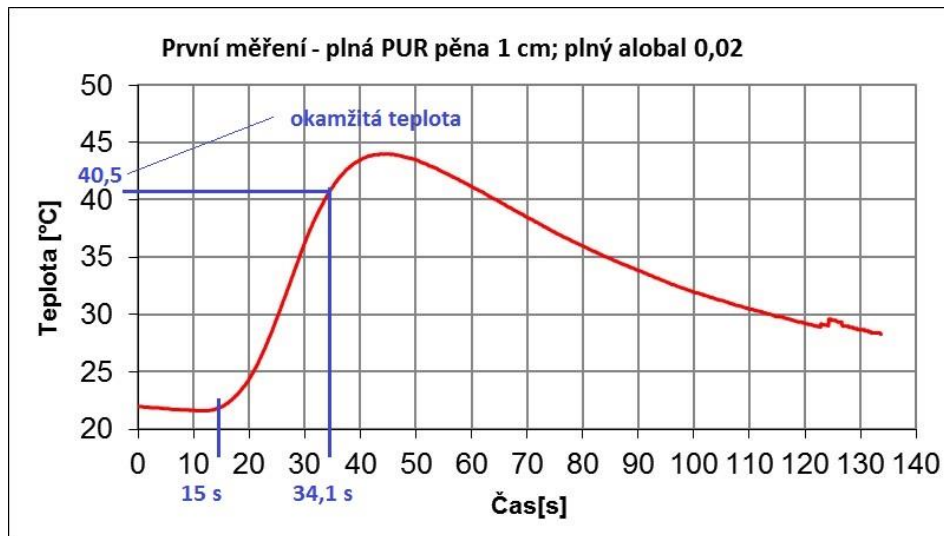


Obrázek 65 Čtyřvrstvý vzorek s perforovanou PUR pěnou a bavlnou

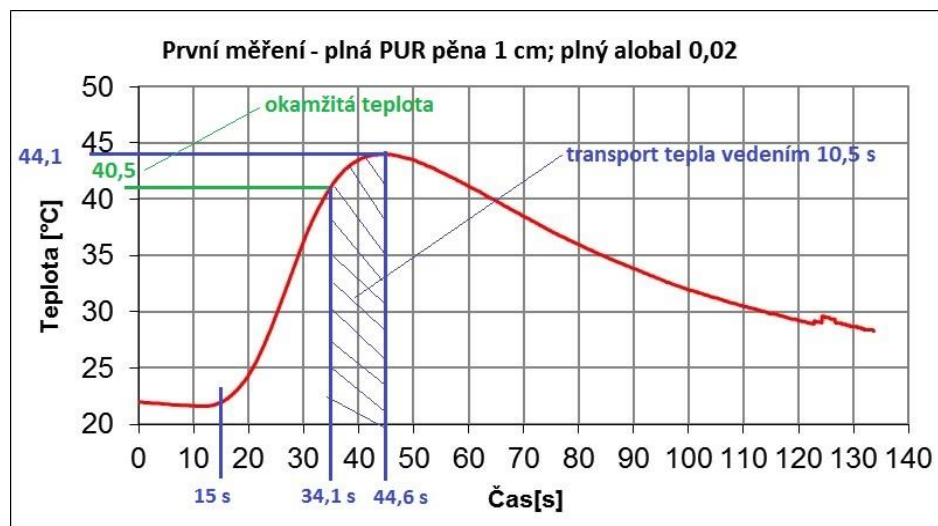


Obrázek 66 Čtyř vrstvý vzorek s plnou PUR pěnou a bavlnou

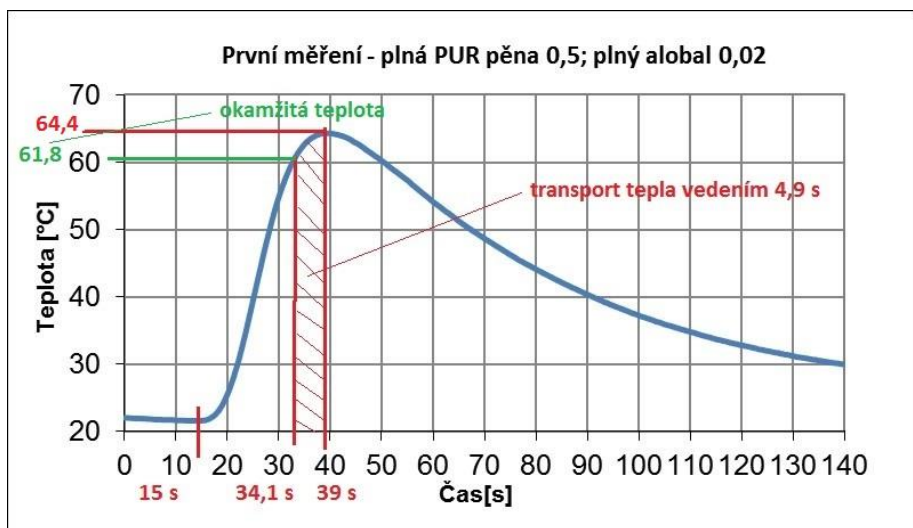
Testování pětivrstvé textilie



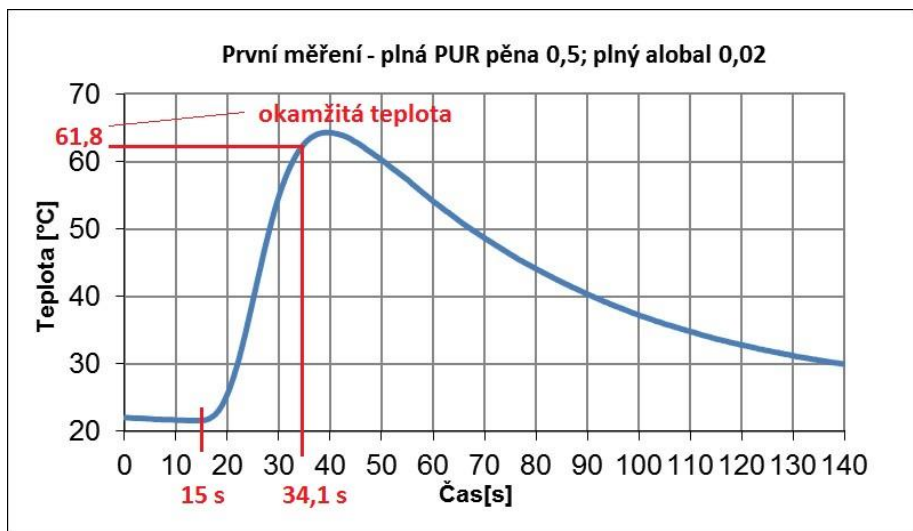
Obrázek 67 První měření pěti vrstev s PUR pěnou tloušťky 1 cm



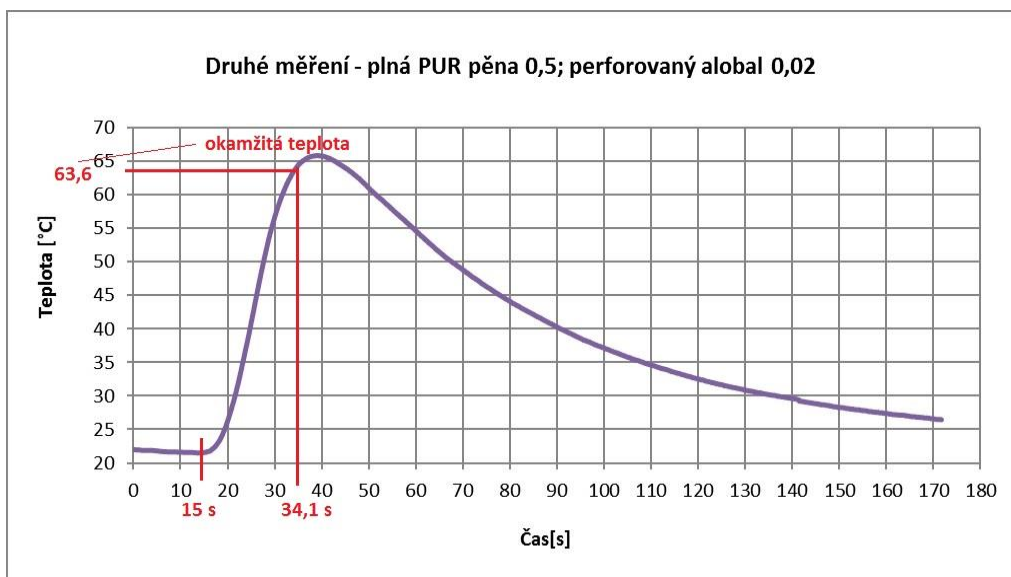
Obrázek 68 První měření pěti vrstev s PUR pěnou tloušťky 0,5 cm



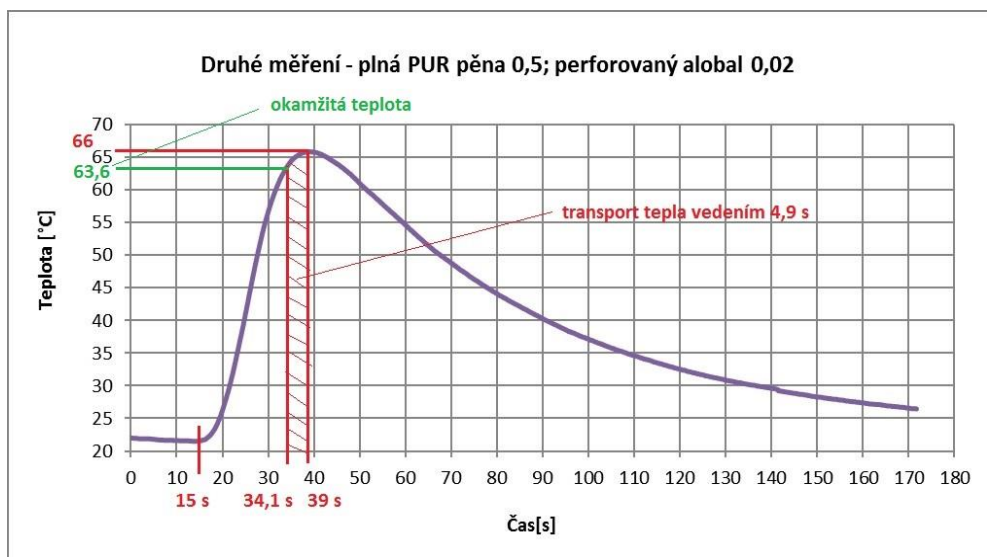
Obrázek 69 První měření - transport tepla vedením- PUR pěna tloušťky 0,5 cm



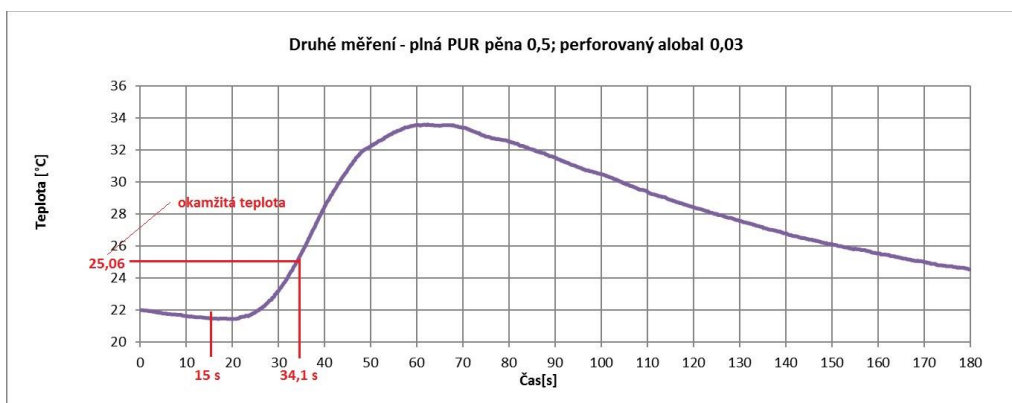
Obrázek 70 Okamžitá teplota - první měření, PUR pěna tloušťky 0,5 cm



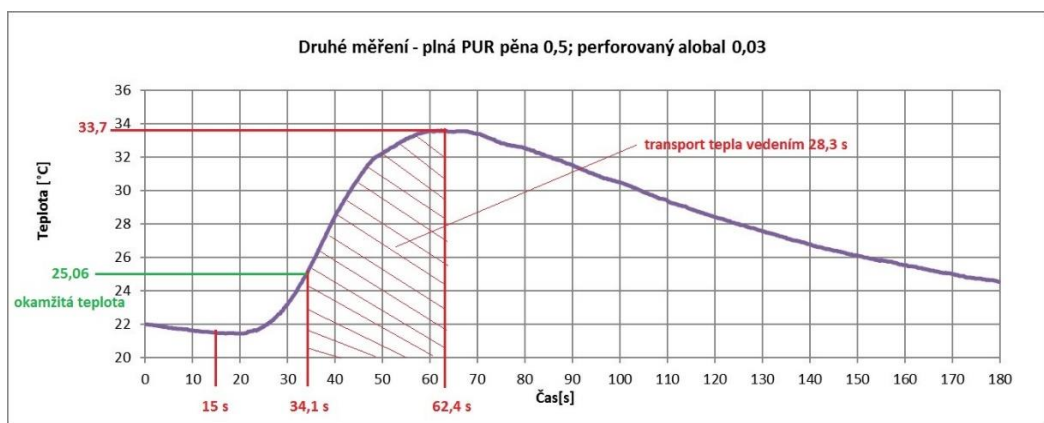
Obrázek 71 Druhé měření - okamžitá teplota - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,02 mm



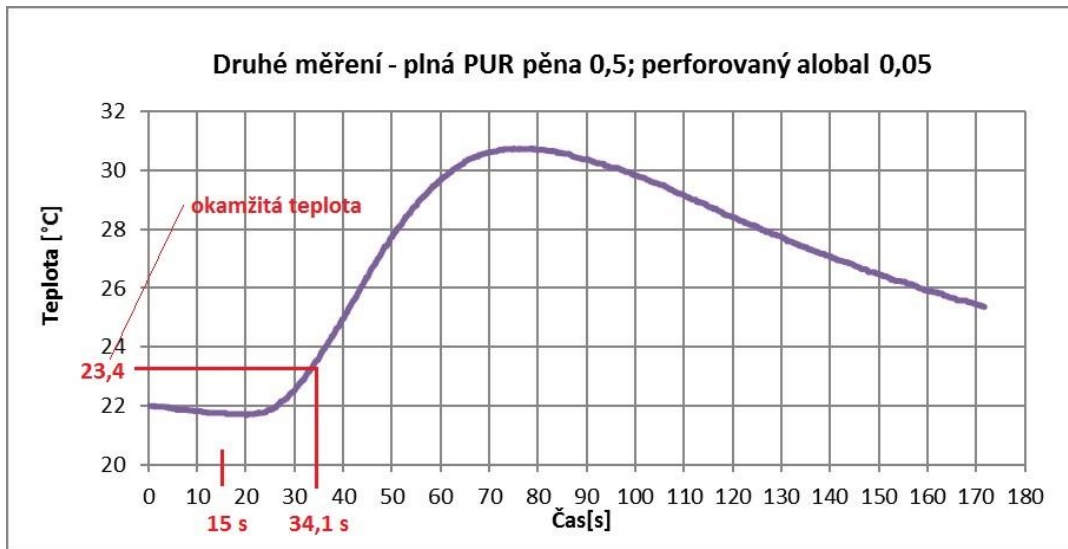
Obrázek 72 Druhé měření - transport tepla vedením - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,02 mm



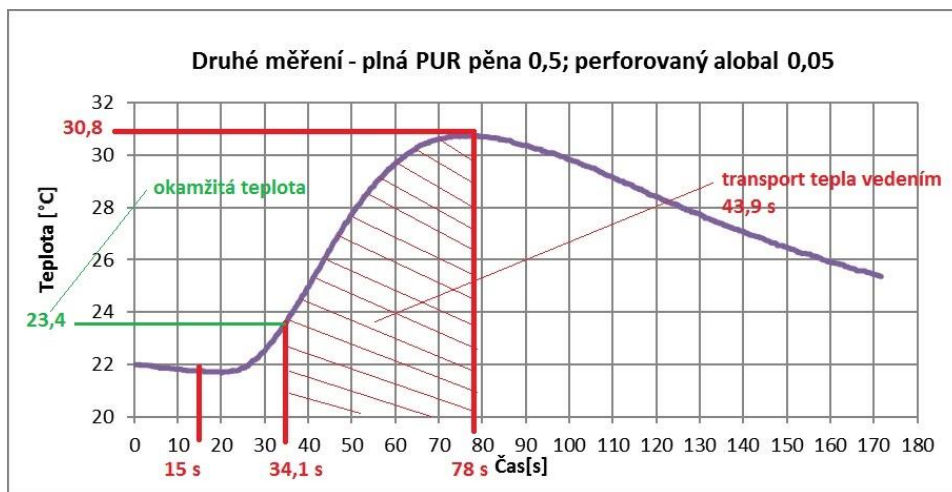
Obrázek 73 Druhé měření - okamžitá teplota - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,03 mm



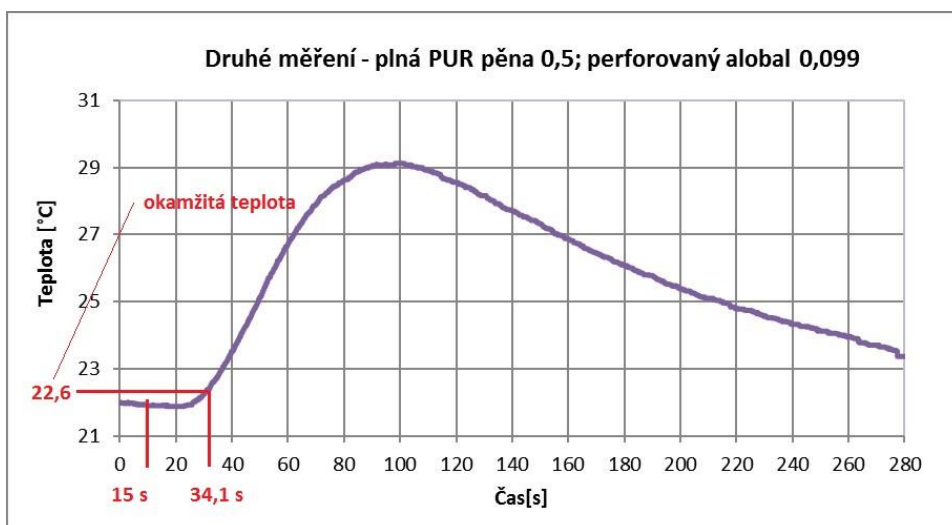
Obrázek 74 Druhé měření - transport tepla vedením - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,03 mm



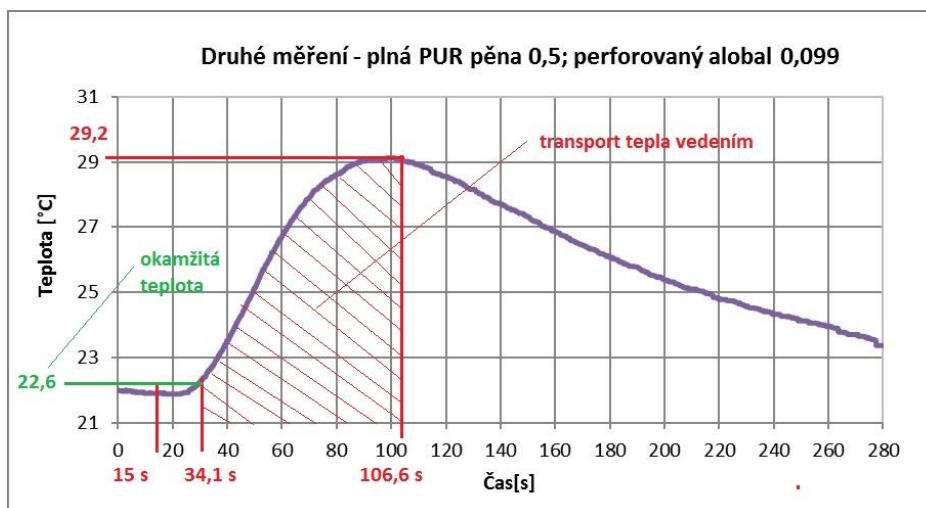
Obrázek 75 Druhé měření - okamžitá teplota - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,05 mm



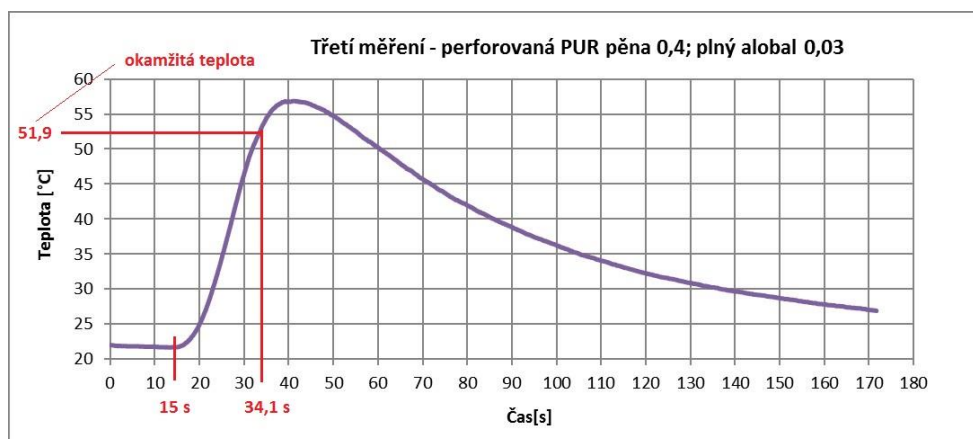
Obrázek 76 Druhé měření - transport tepla vedením - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,05 mm



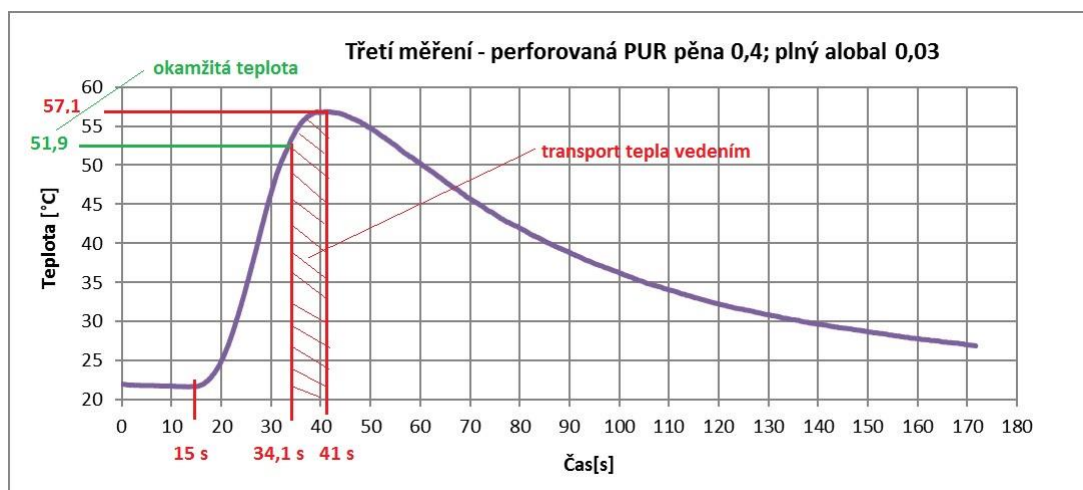
Obrázek 77 Druhé měření - okamžitá teplota - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,099 mm



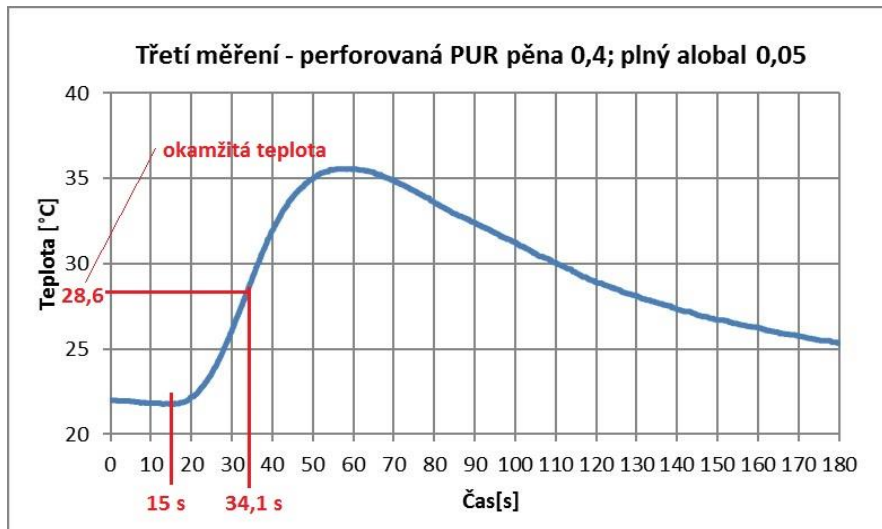
Obrázek 78 Druhé měření - transport tepla vedením - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,099 mm



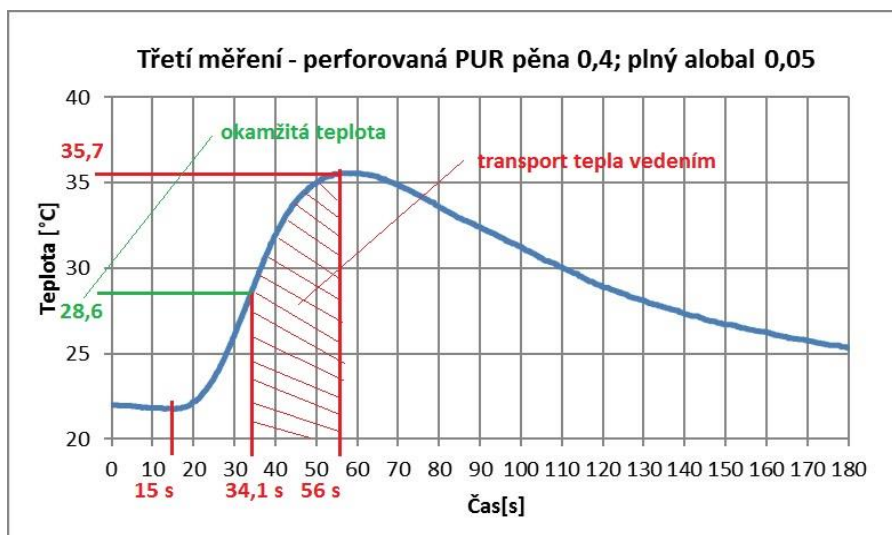
Obrázek 79 Třetí měření - okamžitá teplota - vzorek s plným alobalem tloušťky 0,03 mm



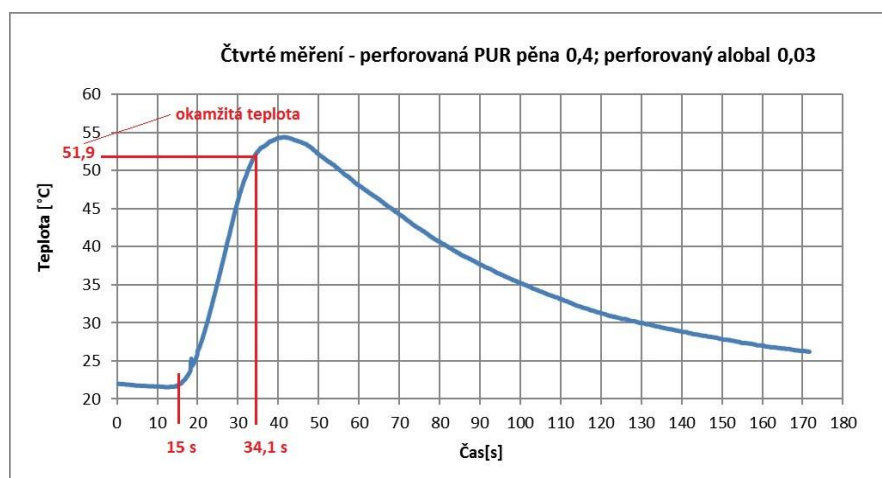
Obrázek 80 Třetí měření - transport tepla vedením - vzorek s plným alobalem tloušťky 0,03 mm



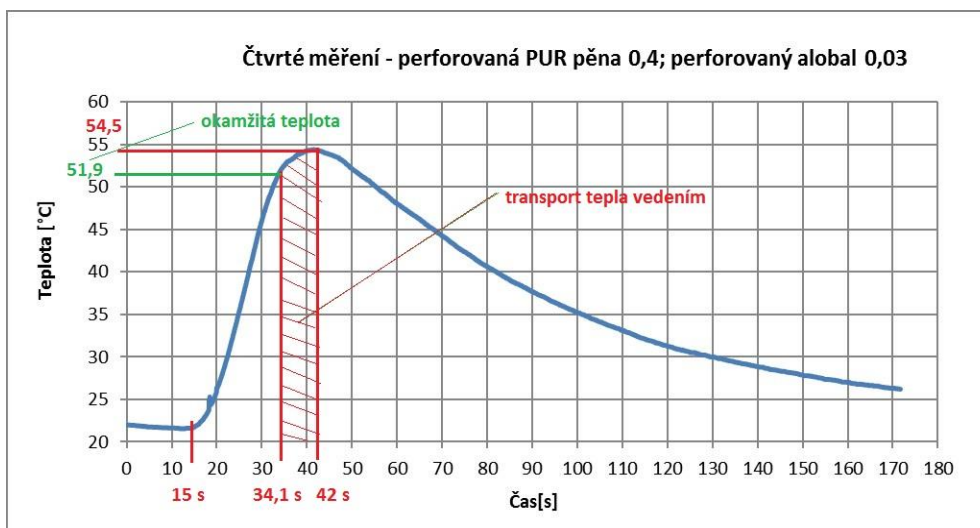
Obrázek 81 Třetí měření - okamžitá teplota - vzorek s plným alobalem tloušťky 0,05 mm



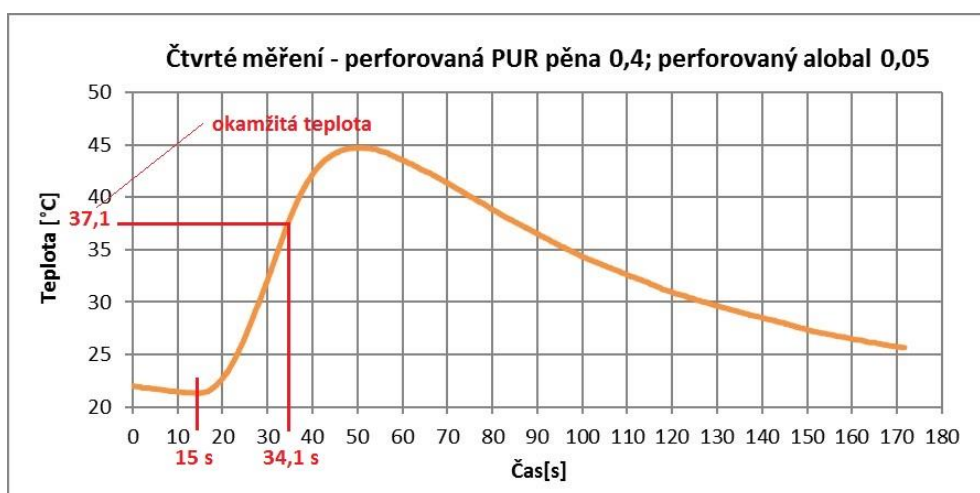
Obrázek 82 Třetí měření - transport tepla vedením - vzorek s plným alobalem tloušťky 0,05 mm



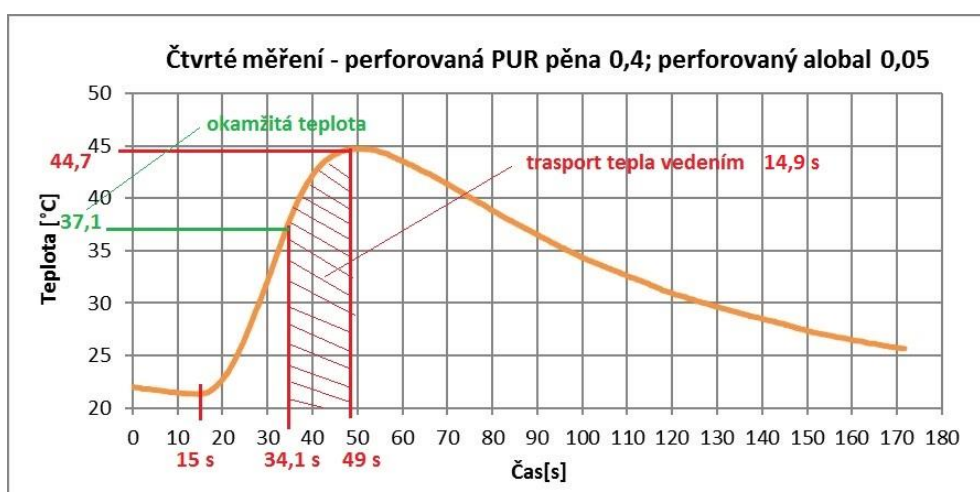
Obrázek 83 Čtvrté měření - okamžitá teplota - perforovaný alobal 0,03 mm



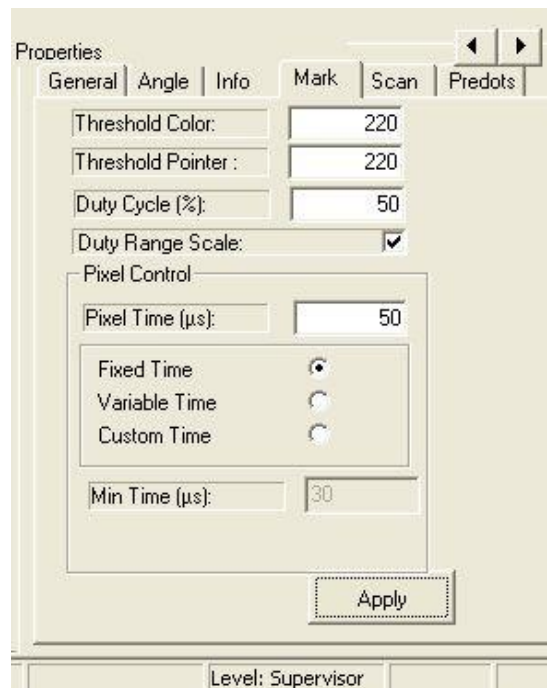
Obrázek 84 Čtvrté měření - transport tepla vedením - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,03 mm



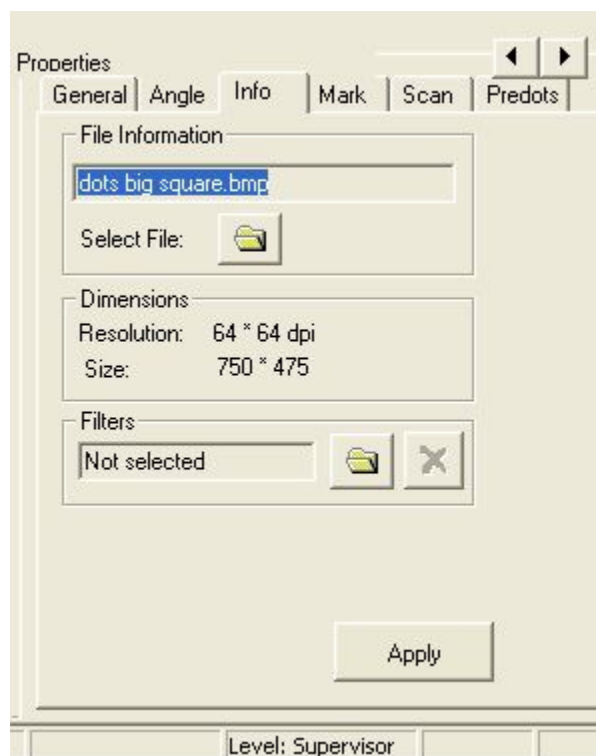
Obrázek 85 Čtvrté měření - okamžitá teplota - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,05 mm



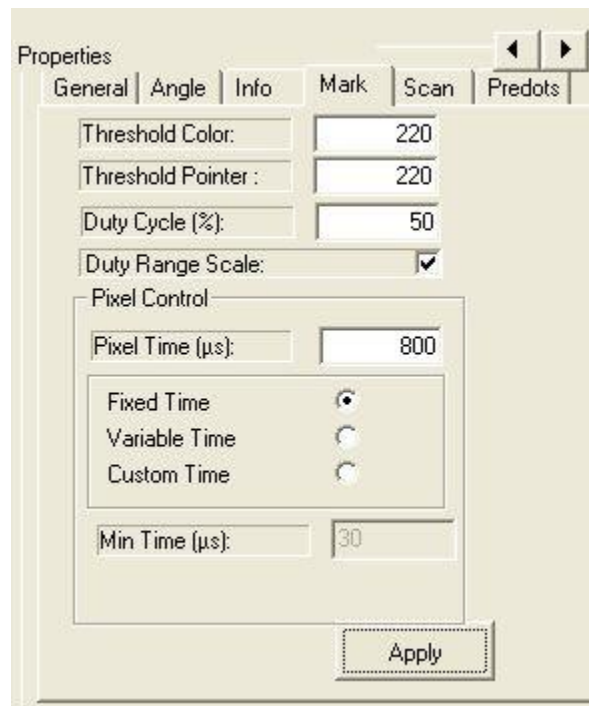
Obrázek 86 Čtvrté měření - transport tepla vedením - vzorek s perforovaným alobalem tloušťky 0,05 mm



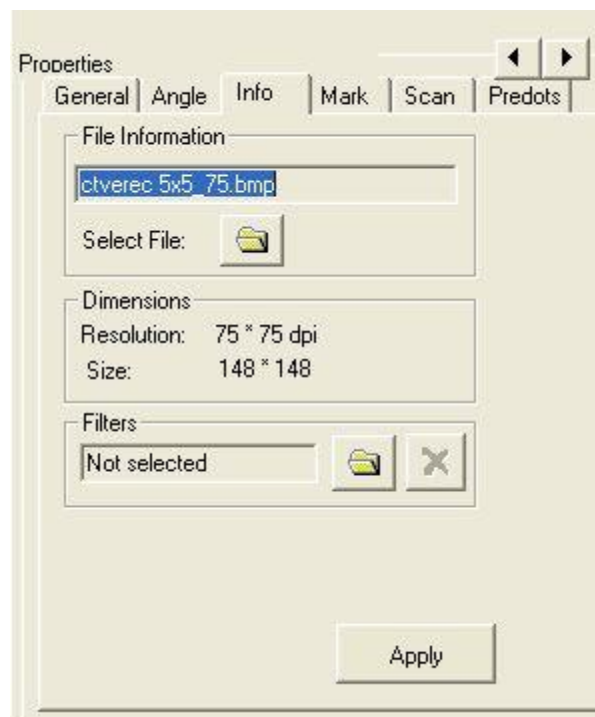
Obrázek 87 Nastavení laserového zařízení při perforování PUR pěny



Obrázek 88 Nastavení laserového zařízení při perforování PUR pěny 2



Obrázek 89 Nastavení laserového zařízení při testování vzorků



Obrázek 90 Nastavení laserového zařízení při testování vzorků 2



Obrázek 91 Tloušťkoměr MESDAN LAB