

# Testování odolnosti materiálových sendvičů proti sálavému teplu

Bc. Jakub Matůšů

---

Diplomová práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav fyziky a mater. inženýrství  
akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Matůšů**  
Osobní číslo: **T11559**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Testování odolnosti materiálových sendvičů proti  
sálavému teplu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na zadané téma s využitím doporučené literatury a databázových informačních zdrojů.
2. Osvojte si práci na nově vyvinutém zařízení pro testování odolnosti materiálů proti sálavému teplu. Optimalizujte postup záznamu teploty a kalibrace tepelného toku.
3. Provedte testování odolnosti vybraných materiálů a materiálových sendvičů vůči sálavému teplu.
4. Pokuste se navrhnout optimální sendvičovou strukturu pro dosažení maximálního ochranného účinku.
5. Všechny získané výsledky přehledně diskutujte a srovnajte v závěrečných kapitolách diplomové práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 659 + A1 (83 2366) – Ochranné rukavice pro hasiče. Praha: Český normalizační institut, 2008.
2. Militický, J.: Technické textilie. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372 170-1.
3. ČSN EN 407 (83 2326) – Ochranné rukavice proti tepelným rizikům (teplu a/nebo ohni). Praha: Český normalizační institut, 2005.
4. Incropera, F.P. et. al.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 2007, ISBN 978-0-471-45728-2
5. ČSN EN 702 (83 2752) – Ochranné oděvy – Ochrana proti teplu a ohni – Zkušební metoda pro stanovení prostupu tepla ochranným oděvem nebo jeho materiály při dotyku. Praha: Český normalizační institut, 1996.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Smolka, Ph.D.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**


Termín odevzdání diplomové práce:

**24. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské/diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou/diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům.

Ve Zlíně ..... 24.5.2013 .....

YAKUB MATOUŠ   
.....  
Jméno, příjmení, podpis

1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevyjádřeně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce požít na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení ctybýřícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z vydělků jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přiměřeně k výši vydělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.



## **ABSTRAKT**

Byl studován vliv sálavého tepla na jednotlivé materiály a materiálové sendviče mající uplatnění v ochranných prostředcích, hasičských zásahových rukavicích. Pomocí série testů provedených v souladu s normou ČSN EN ISO 6942 (83 2744) byl zjištěn materiál a materiálový sendvič nejlépe odolávající tepelné degradaci a s nejlepšími tepelně izolačními vlastnostmi.

Klíčová slova:

Sálavé teplo, prostup tepla, tepelná degradace, materiálový sendvič

## **ABSTRACT**

The effect of radiant heat on various materials and material compositions used in protective equipment, such as firefighting gloves, was studied. The material composition with the best thermal insulation properties and thermal stability was discovered by a set of tests performed according to the standard ČSN EN ISO 6942 (83 2744).

Keywords:

Radiant heat, heat transfer, thermal degradation, material sandwich

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Smolkovi Ph.D. za vedení, trpělivost, podporu a mnoho cenných rad a za čas, který věnoval pro úspěšné dokončení této práce.

Také bych rád poděkoval společnosti Holík International s.r.o., konkrétně panu Tomáši Skřivánkovi za vynaložený čas a poznatky o které se s námi podělil a také materiál a zařízení, které nám společnost poskytla.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům, přítelkyni, přátelům a známým za morální i finanční podporu při studiu na vysoké škole

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
1.1 TEPLO.....	13
1.2 TEPLOTA .....	14
1.3 SDÍLENÍ TEPLA .....	14
1.3.1 Způsoby sdílení tepla .....	15
1.4 PROUDĚNÍ .....	15
1.5 VEDENÍ TEPLA.....	16
1.5.1 Tepelná vodivost .....	18
1.5.1.1 Faktory ovlivňující tepelnou vodivost vláknitých materiálů .....	20
1.6 SÁLÁNÍ.....	22
1.7 VYZAŘOVACÍ ZÁKONY .....	25
1.7.1 Kirchhoffův zákon .....	25
1.7.2 Lambertův-Beerův zákon absorpce.....	27
1.7.3 Wienův posunovací zákon .....	27
1.7.4 Dokonale černé těleso .....	28
1.7.5 Emisivita .....	28
1.8 MĚŘENÍ TEPLoty .....	30
1.8.1 Základní principy měření teploty .....	30
1.8.1.1 Dilatační teploměry.....	30
1.8.1.2 Odporové teploměry .....	31
1.8.1.3 Termoelektrické teploměry .....	32
1.8.2 Bezdotykové měření teploty .....	33
1.8.2.1 Radiační teploměry .....	33
1.8.2.2 Měření teploty objektivními metodami .....	36
1.8.2.3 Chyby bezdotykového měření teploty .....	36
1.8.3 Tepelné detektory.....	37
Tepelná kapacita detektoru .....	38
Tepelná vodivost detektoru.....	38
1.8.3.1 Termoelektrické detektory .....	38
1.8.3.2 Pyroelektrické detektory .....	39
1.9 MĚŘENÍ TEPELNÉHO TOKU .....	40
1.9.1 Měření tepelných toků při přenosu tepla sáláním. ....	40
1.9.1.1 Bolometry .....	40
1.9.1.2 Peltierův článek.....	41
1.9.1.3 Další způsoby měření sálavého toku .....	41
1.10 DEGRADACE MATERIÁLŮ .....	41
1.10.1 Základní typy degradace .....	42
1.10.1.1 Mechanodegradace.....	42
1.10.1.2 Fotodegradace .....	42
1.10.1.3 Degradace ionizačním zářením .....	43
1.10.1.4 Biodegradace.....	43
1.10.1.5 Chemodegradace .....	44
1.10.1.6 Termodegradace.....	44



1.10.2	Degradace vláken .....	46
1.10.3	Hořlavost vláken .....	46
1.11	MATERIÁLY A MATERIÁLOVÉ KOMPOZICE PRO OCHRANU VŮČI ÚČINKŮM TEPLA .....	48
1.11.1	Skladba hasičské rukavice.....	48
1.11.1.1	Vrchní vrstva.....	49
1.11.1.2	Mezivrstva.....	49
1.11.1.3	Membrána .....	49
1.11.1.4	Podšívka .....	50
1.12	MATERIÁLY VHODNÉ PRO POUŽITÍ V HASIČSKÉ ZÁSAHOVÉ RUKAVICI.....	50
1.12.1	Používané tepelně odolné textilní materiály a useň .....	50
1.12.1.1	Matriály použité ve vrchních vrstvách.....	50
1.12.1.2	Matriály použité na membrány .....	55
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>57</b>
<b>2</b>	<b>ZKOUŠENÍ HASIČSKÝCH ZÁSAHOVÝCH RUKAVIC PROTI SÁLAVÉMU TEPLU.....</b>	<b>58</b>
2.1	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ A POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	58
2.1.1	Zkušební zařízení .....	58
2.1.1.1	Zdroj sálání .....	60
2.1.1.2	Držák zkušebního vzorku .....	60
2.1.1.3	Kalorimetr.....	61
2.1.1.4	Zařízení pro měření a zaznamenávání teploty .....	62
2.1.1.5	Pomocné přístroje .....	63
2.2	STANOVENÍ MĚŘENÝCH PARAMETRŮ .....	64
2.2.1	Podmínky měření .....	64
2.2.2	Kalibrace zdroje sálání .....	64
2.2.3	Zkouška A .....	65
2.2.4	Zkouška B .....	66
2.3	ZKOUŠENÉ MATERIÁLY .....	67
2.3.1	Jednotlivé vrstvy .....	67
2.3.1.1	Vrchní vrstva.....	67
2.3.1.2	Mezivrstva .....	69
2.3.1.3	Membrána .....	70
2.3.1.4	Podšívka.....	70
2.3.2	Skladby.....	72
<b>3</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>75</b>
3.1	KALIBRACE TEPELNÉHO TOKU .....	75
3.2	TESTOVÁNÍ ODOLNOSTI VRSTEV A SKLADEB PROTI SÁLAVÉMU TEPLU .....	77
3.2.1	Jednotlivé vrstvy .....	78
3.2.1.1	Diskuze .....	85
3.2.2	Vrchové skladby.....	86
3.2.2.1	Diskuze .....	90
3.2.3	Dlaňové skladby.....	91
3.2.3.1	Diskuze .....	92
3.2.4	Materiálové sendviče od fy Holík International.....	93
3.2.4.1	Diskuze .....	98

3.2.5	Zkušební skladby .....	98
3.2.5.1	Diskuze .....	101
3.3	TESTOVÁNÍ DEGRADACE VRSTEV A SKLADEB PROTI SÁLAVÉMU TEPLU.....	102
3.3.1	Jednotlivé vrstvy .....	102
3.3.1.1	Diskuze .....	104
3.3.2	Skladby.....	105
3.3.2.1	Diskuze .....	108
3.3.3	Vliv emisivity (barvy materiálu) na vstup tepla .....	108
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>110</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>112</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>115</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>121</b>

## ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá tématem vlivu sálavého tepla na materiály, konkrétně tzv. „*high performance*“ textilie, jež jsou určeny pro specifické využití. Jsou vyvíjeny pro přesně definované uplatnění, ve kterém vykazují nejlepší vlastnosti. Jedná se o materiály, které nachází uplatnění v oděvech policistů, vojáků a v neposlední řadě u hasičů. Ochranné oděvy policistů nebo hasičů se skládají z několika vrstev materiálů, kdy každá vrstva má svou funkci tak, aby bylo dosaženo maximálního ochranného účinku. Nejčastěji se tyto materiálové sendviče skládají ze čtyř vrstev, kdy v dlaňových částech se z důvodu citlivosti využívá pouze tři vrstev. V typické hasičské zásahové rukavici je zakomponována vrstva, která je vystavena v bezprostřední blízkosti účinkům sálavého tepla. Na tyto vrstvy jsou kladeny ty nejvyšší požadavky, především požadavky na stálost při styku s kontaktním teplem a při mechanickém namáhání. Mají rozhodující vliv na úroveň ochrany rukavice jako celku. Druhou vrstvou je tzv. mezivrstva, jejíž hlavní funkcí je tepelně izolační schopnost, ale v dlaňové části rukavice není zastoupena. Další vrstvou je membrána, která na tepelné schopnosti rukavice má nejmenší vliv. Membrána zajišťuje propustnost pro vodní páry a odolnost proti průniku vody a plní tak v rukavici hygienickou funkci. Poslední, ale velmi důležitou vrstvou je podšívka, vyskytující se v kontaktu s pokožkou člověka. Na tuto vrstvu jsou kladeny nároky na tepelnou izolaci tak, aby snížila prostup tepla rukavicí na minimum. Kromě této funkce má zabezpečovat také komfort. Každá vrstva hasičských zásahových rukavic má svou funkci a cílem této práce je najít kombinace materiálů s co nejlepšími tepelně izolačními vlastnostmi a odolností vůči účinkům sálavého tepla. Tyto vlastnosti se zkoumají v návaznosti na normu ČSN ISO 6942 *Ochranné oděvy- Ochrana proti teplu a ohni – Zkušební metoda: hodnocení materiálu a kombinací materiálů vystavených sálavému teplu*. V normě jsou popsány jednotlivá zařízení a postup práce, kdy se měří prostup tepla materiálem a ve druhé části se norma zaměřuje na odolnost materiálu vůči účinkům sálavého tepla, konkrétně hodnocení tepelné degradace materiálu. Výzkum probíhal v úzké spolupráci se společností Holík International s.r.o., která se v tomto oboru již několikátým rokem pohybuje a patří mezi společnosti s významnou pozicí na celosvětovém trhu. Firma Holík International s.r.o. je uznávaným producentem rukavic pro policisty, příslušníky speciálních jednotek, vojáky a neposlední řadě hasiče.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1.1 Teplo

Teplo je určitou vnitřní energií tělesa, kterou systém absorbuje nebo odevzdá, pokud je v kontaktu s jiným systémem, bez toho aniž by docházelo ke konání práce. Je to proces, jenž popisuje srážky jednotlivých částic uskutečňující práci s tím, že je nelze sledovat natož měřit. Práci se nazývají takové procesy, kdy způsobenou změnu energie můžeme vyjádřit součinem veličin ( $W=F \cdot s$ ). Pokud změna energie nelze vyjádřit jako součin měřitelných veličin, hovoříme o teple. Vyvinuté teplo je důsledkem změny termodynamického stavu systému.

Od zdroje elektromagnetického záření systému je emitována tepelná energie, kterou lze vyjádřit následujícím vzorcem dle Planckova zákona.

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

Kde  $h$  – Planckova konstanta ( $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s)

$f$  – frekvence dané vlny [Hz]

Z Planckova zákona vyplývá, že tělesa vyzařují energii pouze po určitých kvantech, jež se rovná součinu  $h \cdot f$ . Pojem foton, jako elementární částice byl odvozen z Planckova zákona a nabývá korpuskulárního (částicového) i vlnového charakteru. Záření je tedy soubor fotonů šířících se v prostoru, ve vakuu rychlostí světla. Frekvence záření je poté dána následujícím vztahem. [1]

$$f = \frac{c}{\lambda} [\text{Hz}] \quad (2)$$

Kde  $c$  – rychlost světla ve vakuu ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s)

$\lambda$  – vlnová délka záření [nm]

Vlivem neuspořádaného pohybu částic daného tělesa dochází při tepelné výměně k transportu energie. Těleso teplo přijímá a v podobě tepla také odevzdává. Je nutné ještě uvažovat vedle kinetické energie částic také energii jejich vzájemných interakcí a vazeb mezi nimi.

Výpočet tepelné energie je dán následující rovnicí:

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T [J] \quad (3)$$

Kde  $m$  – hmotnost [m]

$c$  – tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\Delta T$  - rozdíl počáteční a konečné teploty [ $^{\circ}C$ ]

Tato rovnice vyjadřuje, že změna teploty je spojena s nárůstem nebo poklesem tepelné energie - tepla.

Tepelná kapacita, která vystupuje v předcházející rovnici, vyjadřuje množství tepla, které je potřeba na to, aby se teplota daného tělesa zvýšila o 1 K.

$$c = \frac{Q}{\Delta T} [J \cdot K^{-1}] \quad (4)$$

Kde  $Q$  – teplo [J]

$\Delta T$  – rozdíl teplot mezi konečným a počátečním stavem [ $^{\circ}C$ ]

Jak vyplývá z rovnice, je tepelná kapacita dána podílem dodaného nebo odebraného tepla a teplotní změny.

## 1.2 Teplota

Teplota je zastoupena mezi sedmi základními SI veličinami a může být vyjádřena v Kelvinech [K], ve stupních Celsia [ $^{\circ}C$ ], či stupně Fahrenheita [ $^{\circ}F$ ] využívané převážně v Severní Americe. Se změnou teploty se u většiny těles mění jejich vlastnosti. S rostoucí teplotou se například zvětšuje objem kapalin nebo naopak klesá viskozita. Teplotu měříme dotykovými nebo bezdotykovými teploměry (pyrometry) či termokamerami. O teplotě lze hovořit jen v případě tepelné rovnováhy tělesa se svým okolím, ustálením teploty na určité hodnotě. [2, 3]

## 1.3 Sdílení tepla

K přenosu tepla dochází při splnění druhého termodynamického zákona, který říká, že tok vnitřní energie neboli tepelný tok přechází od tělesa s vyšší teplotou k tělesu s nižší teplotou, avšak podmínkou je těsný styk nebo tok proudící prostředím, kterým jsou daná tělesa obklopena a jímž může procházet tepelné vyzařování (sálání). Aby došlo k přenosu tepla z okolí do soustavy a naopak, musí existovat teplotní gradient.

### 1.3.1 Způsoby sdílení tepla

K přenosu tepla může docházet třemi známými mechanismy:

- Prouděním (konvekcí)
- Vedením (kondukcí)
- Sáláním (radiací)

Ve skutečnosti při přenosu tepla téměř vždy dochází ke kombinaci dvou nebo všech tří základních způsobů přenosu tepla. K proudění dochází především u kapalin, kdy se hmotné prostředí (kapalina) pohybuje a přenáší teplo do chladnějších míst. V případě výměny tepla mezi stěnou tuhého tělesa a proudící kapalinou nebo plynným médiem dochází k tzv. přestupu tepla. Prostupem tepla je myšleno sdílení tepla mezi dvěma prostředími, které jsou navzájem odděleny stěnou, obvykle tvořenou z tuhé látky. [6, 10, 16]

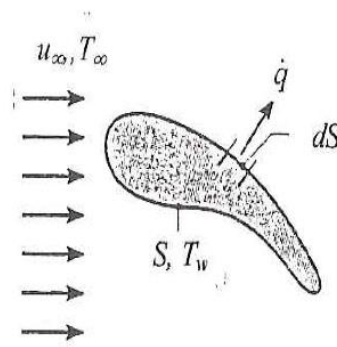
## 1.4 Proudění

Na přestupu tepla konvekcí se podílí dva mechanismy:

- Difúze – náhodný pohyb molekul - kondukce
- Objemový tok, makroskopický pohyb tekutiny – velké množství částic se pohybuje ve velkých objemech – advekce

Přenos energie je dán spojením těchto dvou mechanismů, jakožto i samotný pojem konvekce.

Tepelná výměna proudící tekutiny a určitým povrchem je typickým příkladem konvekce. Podmínkou je rozdílná teplota. Poblíž povrchu se vytvoří vrstva tekutiny, přičemž se mění její rychlost od nulové hodnoty až po tzv. rychlost volného proudu (hydrodynamická vrstva). Tepelná mezní vrstva se vytvoří podobným způsobem. V blízkosti povrchu dominuje první mechanismus – difúze díky tomu, že zde rychlost kapaliny klesá k nule. Kapalina je ovšem také strhávána z volného proudu do mezní vrstvy a zde se poté uplatňuje druhý mechanismus konvekce – objemový tok.



Obr. 1 – Schéma konvektivního přenosu tepla

Profil, který zaujímá plochu  $S$  o teplotě  $T_w$ , obtéká proud kapaliny, která má rychlost  $u_\infty$  a teplotu  $T_\infty$ , přičemž  $T_w \neq T_\infty$ .

Podle povahy proudění existuje konvekce:

- Nucená
- Přirozená (volná)
- Kombinovaná

Ke kombinované konvekci může docházet v případě nízké rychlosti proudění a vysoké teplotě kapaliny, pak vzniká vztaková síla a dochází k tzv. sekundárnímu proudění, které je kolmé na hlavní směr proudění.

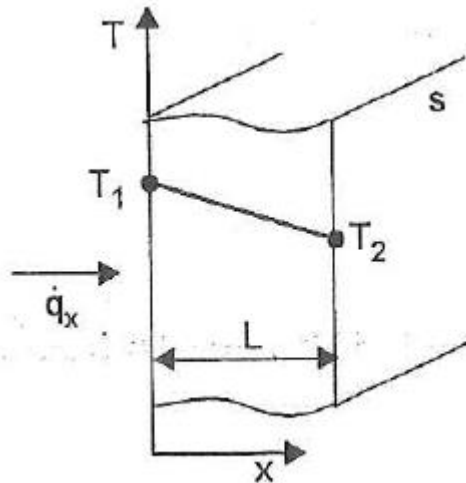
Difúze i objemový tok je spojen s přenosem tzv. „citelného tepla“ neboli vnitřní energií látky. Existují ovšem i konvektivní procesy, kde se bere v potaz přenos latentního tepla. Při těchto procesech dochází k fázové přeměně - var a kondenzace. [5]

## 1.5 Vedení tepla

Vedení tepla neboli kondukce lze charakterizovat jako přenos tepla od částic s vyšší energií k částicím o nižší energii při kontaktu dvou těles. Ať jsou to molekuly kapalin nebo plynů či atomy tuhých látek. K vedení tepla může docházet jen v přítomnosti gradientu teploty, konkrétně ve směru klesající teploty. V případě plynů a kapalin si lze všimnout náhodného pohybu molekul, kdy se předává energie dál do soustavy. Mluvíme o difúzi energie, tedy proces tepelné difúze.

V případě vedení tepla si lze představit rovinnou stěnu o určité tloušťce, přičemž další dva rozměry jsou nekonečně velké a tímto směrem se teplo nevede v důsledku nekonečně velkého odporu.





Obr. 2 – Schéma vedení tepla rovinnou stěnou

Teoretické základy vedení tepla položil Francouz Joseph Fourier a podle něj se nazývá i příslušný zákon, který udává měrný tepelný tok  $\dot{q}_x$ , vyjadřující množství přeneseného tepla za jednotku času na jednotku plochy ve směru osy  $x$ , jež je dané látce přenášený vedením. Tento tepelný tok je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a je dán následujícím vztahem:

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

Kde  $\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$S$  – plocha, kterou prochází teplo [ $m^2$ ]

Teplotní gradient nenabývá kladných hodnot, proto se ve vztahu objevuje záporné znaménko. [4, 5]

Pro celkový tepelný tok, který přechází plochou  $S$ , která je kolmá na směr toku, poté platí vztah:

$$Q_x = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{L} [W] \quad (6)$$

Kde  $L$  – tloušťka stěny [m]

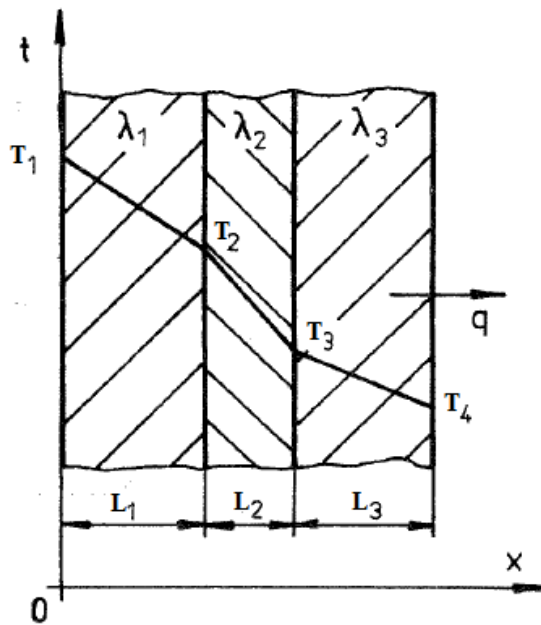
V následujícím vztahu je vyjádřena tepelná vodivost (prostupnost):

$$\Lambda = \frac{\lambda}{L} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6)$$

Dalším důležitým parametrem je tepelný odpor  $R$ , jenž se může vyjádřit převrácenou hodnotou tepelné vodivosti, tedy jako poměr tloušťky a součinitele tepelné vodivosti stěny:

$$R = \frac{L}{\lambda} [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (7)$$

V případě, že stěna je složena z více vrstev, je její souhrnný tepelný odpor roven součtu odporů dílčích vrstev.



Obr. 3 – Vedení tepla přes složenou stěnu

Poté výsledný tepelný tok přes stěnu z  $n$  vrstev vyjádříme rovnicí:

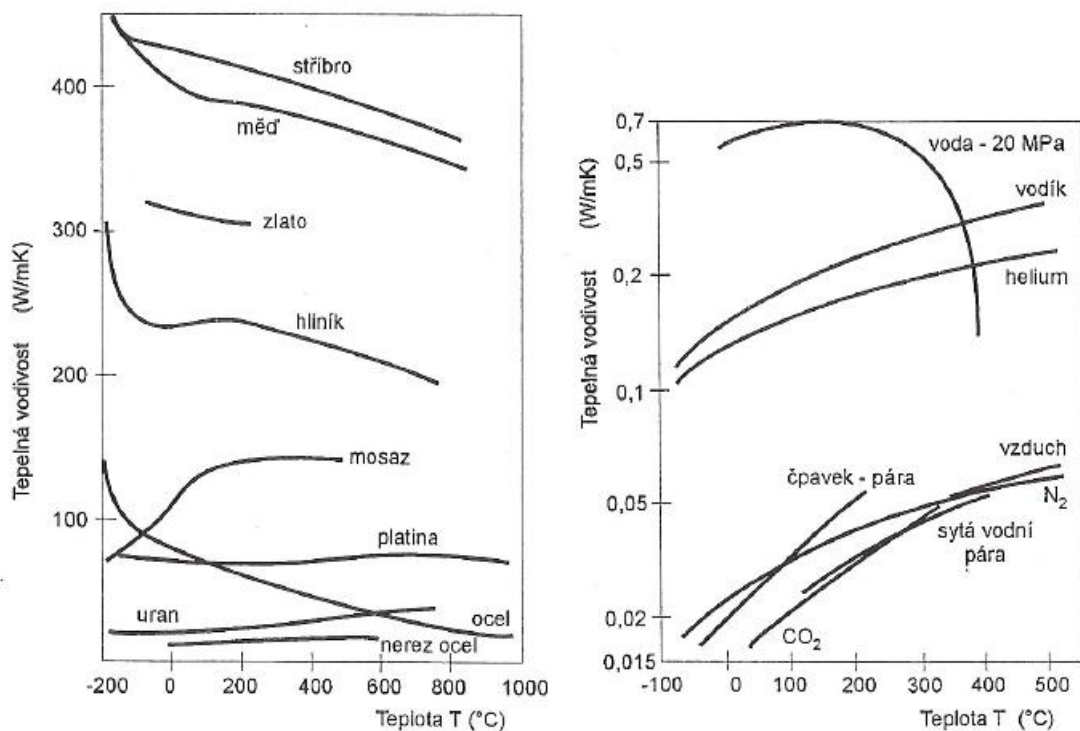
$$Q = \frac{S(T_1 - T_2)}{\sum_{j=1}^n \frac{L_j}{\lambda_j}} = \frac{S(T_1 - T_2)}{\sum_{j=1}^n R_j} \quad (8)$$

### 1.5.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost udává rychlost přestupu tepla v materiálu a vyjadřuje jí součinitel tepelné vodivosti  $\Lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]. Tepelná vodivost je tedy fyzikální vlastnost látky, ale též je to konstanta úměrnosti ve Fourierově zákoně, přičemž je funkcí teploty. Tato materiálová veličina udává, jak velký odpor klade materiál proti přenosu tepla z jedné strany rovinné

stěny na druhou. To znamená, že pokud má materiál velkou tepelnou vodivost, na přenos tepla nám postačí relativně malý teplotní rozdíl mezi oběma stranami stěny. Tepelná vodivost udává, jakou rychlostí se teplo předává z látky o vyšší teplotě do okolního chladnějšího prostředí.

Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje tepelnou vodivost dané látky. Mylně je označována měrná tepelná vodivost tepelnou vodivostí. Poněvadž jde o množství tepla, které musí projít tělesem za jednotku času, tak aby na jednotkové délce tělesa byl jednotkový teplotní spád s tím, že se předpokládá, že k šíření tepla dochází jen v jednom směru. [18]



Obr. 4 – Tepelná vodivost kovů, kapalin a plynů v závislosti na teplotě

Na obrázcích je patrná rozdílná velikost tepelné vodivosti u různých druhů látek. Vzduch má oproti kovům asi o čtyři řády nižší tepelnou vodivost, z čehož vyplývá, že přítomností plynu v tuhých látkách se vytváří tepelné izolanty, jako je např. pěnový polystyren nebo uzavřené vzduchové kapsy v tvárnících. [4, 5]

### *1.5.1.1 Faktory ovlivňující tepelnou vodivost vláknitých materiálů*

#### 1.5.1.1.1 Vliv teploty

Teplota má na tepelnou vodivost nepatrný vliv. U kovů tepelná vodivost s rostoucí teplotou klesá, u polovodičů však s teplotou roste. Tepelná vodivost textilních materiálů tedy se zvyšující se teplotou roste.

#### 1.5.1.1.2 Vliv toku tepla

Dalším kritériem ovlivňující tepelnou vodivost je poloha vláken, která má vliv na rychlost prostupu tepla danou textilií. Tepelná vodivost je nejvyšší pokud teplo působí ve směru vláken, poněvadž transportu tepla nic nebrání. Jednotlivá vlákna působí jako souvislé vodivostní vrstvy, na rozdíl od toku tepla kolmo k vláknům. Tepelná vodivost se snižuje vlivem vzduchových mezer.

#### 1.5.1.1.3 Vliv vlhkosti

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost materiálů je negativní, protože s nárůstem vlhkosti dochází ke zvýšení tepelné vodivosti, což má za následek snížení tepelně izolačních vlastností materiálu. Důvodem je součinitel tepelné vodivosti vody, který je asi 25x vyšší než tepelná vodivost vzduchu. Dalším důvodem je to, že přítomností vlhkosti v materiálu dochází k šíření tepla prouděním a v případě zmrznutí vody součinitel tepelné vodivosti nadále roste. Při prostupu tepla nadejde taková situace, kdy tepelná energie vlhkosti je pohlcena a dochází k přeměně na výparné teplo vody, jejichž částice putují do míst s nižší teplotou, aby došlo k vyrovnání tepelných rozdílů. Tak dochází k transportu tepelné energie částice a zvyšuje se tepelná vodivost materiálu.

#### 1.5.1.1.4 Vliv jemnosti vláken

Tepelná vodivost rovněž souvisí s jemností vláken. U vláknitých materiálů, které mají velmi jemná vlákna je tepelná vodivost nižší než u hrubších vláken, což je zapříčiněno větším množstvím vzduchových prostorů mezi vlákny. Dalším důvodem lepších tepelně izolačních vlastností jemnějších vláken je měrný povrch. Jemná vlákna zaujímají větší měrný povrch materiálu a to způsobuje potlačení prostupu tepla sáláním. V takových opticky hustších materiálech vzniká vyšší odpor proti prostupu infračerveného záření.

## 1.5.1.1.5 Vliv objemové hmotnosti a zaplnění vláken

Objemová hmotnost udává poměr hmotnosti vláken a hmotnosti celé textilie. Velký význam zde má prostor mezi vlákny, který má vliv na tepelně izolační vlastnosti. Počet, tvar a velikost vzduchových pórů, ale i orientace vláken ovlivňují schopnost izolace textilie. Zaplnění udává hustotu vláken ve vláknovém materiálu, což je prostor zaujímající vlákny:

$$\mu = \frac{V_v}{V_c} = \frac{\rho_v}{\rho_c} [\%] \quad (9)$$

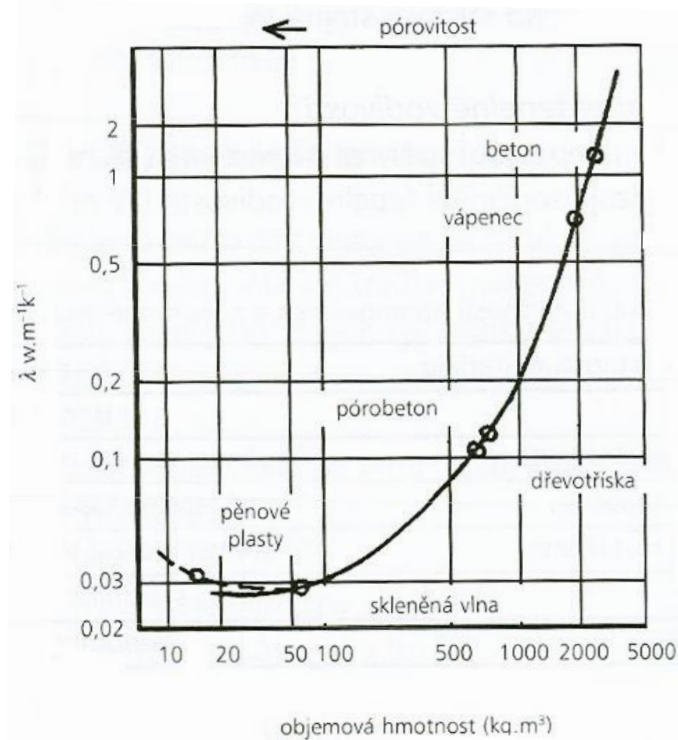
Kde  $V_v$  – objem vláken [ $\text{m}^3$ ]

$V_c$  – objem celku [ $\text{m}^3$ ]

$\rho_v$  – hustota vláken [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_c$  – celková hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Stupeň zaplnění má vliv na tepelně izolační vlastnosti materiálu. V případě klesajícího zaplnění materiálu vlákny se tepelná vodivost snižuje a zákonitě roste tepelný odpor. Na transportu tepla se podílí sálání i vedení tepla, avšak za předpokladu, že textilie je suchá a póry jsou uzavřeny.



Obr. 5 – Vliv objemové hmotnosti a pórovitosti vláken na součiniteli tepelné vodivosti [17]

#### 1.5.1.1.6 Vliv velikosti a množství pórů

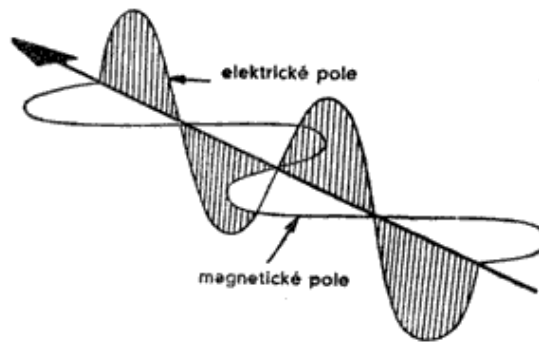
Vliv na tepelnou vodivost má i velikost a především množství pórů v materiálu. Z hlediska izolačních vlastností má pozitivní vliv velké množství malých pórů oproti velkým, v tomto případě nabývá vodivost materiálu nižších hodnot. Celkově lze ale konstatovat, že přítomnost pórů v porézních materiálech má negativní vliv na tepelné vlastnosti. Se zvyšující se teplotou dochází v pórech k intenzivnější tepelné radiaci. Důležitá je i velikost pórů. Hranicí je 9 mm. V případě, že póry jsou větší než 9 mm, poté v materiálu dochází vedle sálání i k proudění. Důvodem je cirkulující vzduch v pórech. Poté součinitel tepelné vodivosti nabývá vyšších hodnot. [15, 17, 18]

## 1.6 Sálání

Sálání neboli radiace je děj, při kterém se teplo ve formě infračerveného záření emituje tělesem do okolí, přičemž k tomu, aby docházelo k přenosu tepla, není potřeba hmotného prostředí, šíří se i ve vakuu, na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo konvekcí. Je to elektromagnetické vlnění, které tepelnou energii přenáší prostorem. Jednotlivá tělesa poté vyzařují ze svého jednotkového povrchu výkon úměrný čtvrté mocnině své absolutní teploty.

Sálání, které je často označováno, jako tepelné záření je odvislé od pochodů, které se uskutečňují uvnitř atomů a jsou podmíněny teplotními vlivy, jejichž výsledkem je přeměna tepla v zářivou energii. Tato zářivá energie může být pohlcována a přeměněna opět v teplo. Tepelné záření je vyzařováno povrchem těles, ovšem musí mít teplotu vyšší než 0 K. Zářením je tepelná energie přenášena v kvantech, přičemž každé kvantum obsahuje určitou hodnotu energie. Kvantum si lze představit jako částici, která má určitou energii, hmotnost a hybnost. [18]

Infračervené záření, jakožto nositel tepelné energie je elektromagnetické záření s vlnovou délkou 750 nm až 1 mm. Frekvence tohoto záření se pohybuje v rozmezí 300 GHz až 400 THz, přičemž elektromagnetické záření má vyšší vlnovou délku než viditelné světlo. Jedná se o elektromagnetické záření, tudíž se skládá z příčného a postupného vlnění magnetického a elektrického.

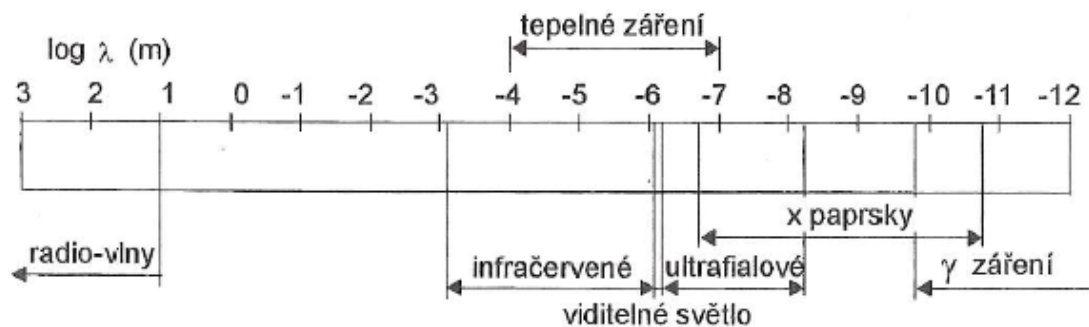


Obr. 6 – Model elektromagnetického vlnění [35]

Fotony infračerveného záření mají velmi nízkou energii, a proto nedochází k ionizaci neutrálních atomů ani molekul prostředí, kterým se šíří.

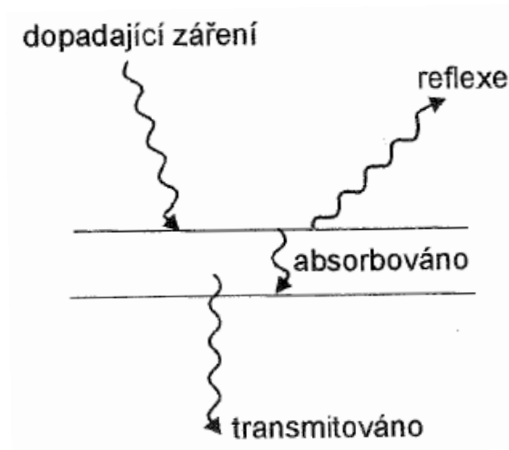
Rozlišuje se tzv. sálavost, která udává množství energie, jež emituje těleso o jednotkovém povrchu za jednotku času a charakterizuje poměrnou mohutnost zářiče.

Teplené záření není závislé na teplotě záření, jímž prochází. Závisí na tělese, ze kterého se záření emituje, konkrétně na jeho povrchu. Bez ohledu na druh elektromagnetického záření se záření šíří rychlostí světla  $3 \cdot 10^8$  m/s, což je rychlost součinu vlnové délky  $\lambda$  a frekvence  $f$ .



Obr. 7 – Rozsah vlnových délek elektromagnetického záření

Dopadající energie se tedy rozděluje na odraženou část energie, která se označuje jako reflexe  $\rho$ , část energie je pohlcena a ta se nazývá absorpcí  $\alpha$  a část energie která projde tělesem - transmise  $\tau$ .



Obr. 8 – Rozdělení dopadající energie

$$\dot{Q}_{\text{dopadající}} = \rho \cdot \dot{Q}_{\text{dopadající}} + \alpha \cdot \dot{Q}_{\text{dopadající}} + \tau \cdot \dot{Q}_{\text{dopadající}}$$

Neboli

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

Pro většinu pevných těles platí následující, protože jimi energie neprochází.

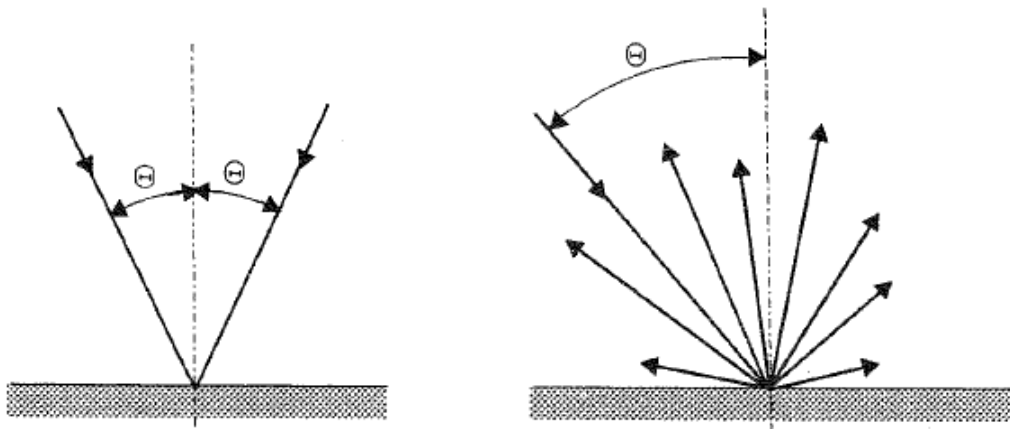
$$1 = \rho + \alpha \quad (11)$$

Černé těleso je výjimkou, protože veškerou energii pohlcuje.

$$\alpha = 1, \rho = t = 0 \quad (12)$$

V případě odrazu dopadající energie na těleso, lze pozorovat dva typy reflexe. Pokud je úhel odrazu shodný s úhlem dopadu, odraz je zrcadlový. Pokud ale paprsek, který dopadá na těleso je odražen rovnoměrně do všech směrů, odraz je difúzní. Ovšem reálný povrch neodráží paprsky jen zrcadlově nebo difúzně. [5, 10, 16]





Obr. 9 – Zrcadlový a difúzní odraz paprsku

## 1.7 Vyzařovací zákony

Tepelnou energii pevné látky, kapaliny a některé plyny emitují v důsledku teploty dané látky.

Černé těleso neboli ideální tepelný zářič nebo též černý povrch má hodnotu emisivity  $\epsilon=1$  a je ideálním absorbentem tepla - pohlcuje veškeré teplo, které dopadá na jeho povrch. Stefan – Boltzmannův zákon udává, že černé těleso emituje tepelné záření, které je úměrné čtvrté mocnině absolutní teploty povrchu nebo tělesa.

$$E_0 = \sigma T^4 \left[ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \right] \quad (13)$$

Kde  $E_0$  – zářivost černého tělesa  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$

$T$  – teplota  $[\text{K}]$

$\sigma$  – Stefan – Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

I když absolutně černé těleso neexistuje, slouží tato koncepce k porovnání s reálnými tělesy. [4]

### 1.7.1 Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon popisuje zachování energie a způsob jakým různá tělesa pohlcují a vyzařují záření. Dopadající zářivý tok lze v závislosti na vlastnostech těles rozdělit na tři složky.

$$\phi = \phi_{\text{odražený}} + \phi_{\text{pohlcený}} + \phi_{\text{prošlý}} \quad (14)$$

Kde  $\phi$  – zářivý tok  $[\text{W}]$

- koeficient odrazivosti (reflexe):

$$\rho = \frac{\phi_{\text{odražený}}}{\phi} \quad (15)$$

- koeficient pohltivosti (absorpce):

$$\alpha = \frac{\phi_{\text{pohlčený}}}{\phi} \quad (16)$$

- koeficient propustnosti (transmise):

$$\tau = \frac{\phi_{\text{prošlý}}}{\phi} \quad (17)$$

Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování též vyjadřuje velmi důležitou skutečnost, a to, že každá látka pohlcuje nejvíce záření těch vlnových délek, které nejsilněji vyzařuje.

Spojité spektrum, které vyzařují skutečná tělesa, závisí jednak na jejich teplotě, ale také na absorpční schopnosti. Emitovaný a absorbovaný tok musí být v termodynamické rovnováze s tím, že na všech vlnových délkách, ve všech směrech a za dané teploty je stejný. Poměr zářivého toku tělesa a jeho pohltivosti (zářivosti) se při dané teplotě dle Kirchhoffova zákona nemění a pro všechna tělesa je stejný.

Kirchhoffův vyzařovací zákon stanovuje intenzitu vyzařování skutečných (nečerných) zářičů, jako poměr intenzity vyzařování určitého tělesa k jeho absorpční schopnosti za dané teploty a vlnové délky.

$$\frac{M_e}{\alpha} f(T) \quad (18)$$

Kde  $M_e$  – intenzita vyzařování (emisivita) zkoumaného zářiče [ $\text{W} \cdot \text{m}^2$ ]

$\alpha$  – absorpce zářiče [-]

Tento poměr intenzity vyzařování a absorpce je funkcí jediné proměnné, teploty a nezávisí na tom, z jakého materiálu je daný zářič. [6, 10, 16]

### 1.7.2 Lambertův-Beerův zákon absorpce

Max Planck popsal absorpci, jako záření, které dopadá na atom, předává mu svou energii a převede ho skokem z nižší energetické hladiny do vyšší. Záření dopadající na atom zaniká a projeví se zvýšením celkové energie atomu. Kinetické i potenciální. [1]

Pokud dochází k absorpci světelné energie, může se tato světelná energie přeměnit na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic pohlcující látky, přemění se tedy v teplo. Avšak může nastat případ, že pohlcená energie se může transformovat zpět ve světelnou energii. Takový děj se označuje jako luminiscence.

$$dI = -\beta I d\delta \quad (19)$$

Kde  $I$  – intenzita průchodu světla [lx]

$\beta$  – absorpční koeficient [-]

$\delta$  – tloušťka vrstvy [m]

Při průchodu světla o určité intenzitě  $I$  vrstvou látky o dané tloušťce, dochází ke snížení této intenzity o  $dI$ . Tento úbytek intenzity je úměrný původní intenzitě světla a síle vrstvy. Integrací předchozího vztahu získáme tzv. Lambertův zákon neboli Lambert-Beerův zákon absorpce. [18]

$$I' = I_0 \cdot e^{-\beta\delta} \quad (20)$$

Kde  $I_0$  – intenzita prošlého světla při nulové tloušťce vrstvy [lx]

### 1.7.3 Wienův posunovací zákon

Fyzikální zákon, který udává, že maximální energie je v záření absolutně černého tělesa vyzařována na takové vlnové délce, jenž se se zvyšující termodynamickou teplotou snižuje. V praxi to znamená, že čím má těleso vyšší teplotu, tím vyzařuje záření na kratších vlnových délkách, tedy vyšších frekvencích. [4]

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} [mm] \quad (21)$$

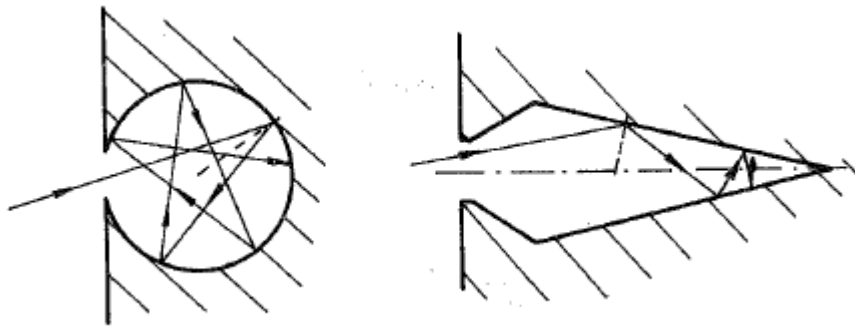
Kde  $\lambda_{\max}$  - vlnová délka při maximálním vyzařování tělesa [nm]

$T$  – teplota tělesa [K]

$b$  – Wienova konstanta ( $b=2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}$ )

### 1.7.4 Dokonale černé těleso

Dokonale černé těleso pohlcuje veškeré dopadající elektromagnetické záření, žádné záření neodráží ani nepropouští. Poté tedy vyzařování černého tělesa závisí pouze na jeho termodynamické teplotě. Teplota a množství vyzařeného tepla černým tělesem se zvýší v závislosti na tom, kolik záření pohltí. Množství pohlceného záření závisí na barvě, černá tělesa absorbují záření nejlépe. Závisí ovšem také na povrchu, kdy od lesklých těles se záření odráží, ale matná tělesa záření absorbují. Dokonale černé těleso neexistuje, přibližná představa takového tělesa je dutina, jenž je uvnitř matně černá.

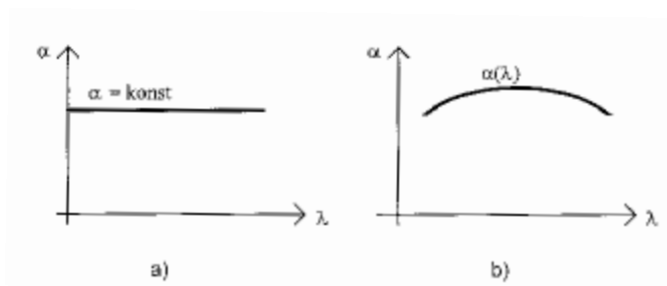


Obr. 10 – Schéma pohlcení paprsku v dutině tělesa

Paprsek dopadající vnějším otvorem na stěnu dutiny se částečně pohltí a zbytek se odrazí, přičemž se tento jev několikrát opakuje, což zapříčiní, že odcházející záření z dutiny je téměř nulové. [3]

### 1.7.5 Emisivita

Skutečné zdroje záření neabsorbují všechno záření a proto je pohltivost  $\alpha$  menší než jedna. Jsou to tzv. nečerná tělesa. Lze také rozlišit tzv. šedá a selektivní tělesa podle závislosti pohltivosti na vlnové délce.



Obr. 11 – Grafy závislosti emisivity pro a) šedé a b) selektivní zářiče

Plyny mají selektivním spektrum. Oproti tomu nejméně selektivním spektrem disponují pevné látky s neleštěným povrchem.

Přejde-li atom z vyšší energetické hladiny do nižší, vyzáří se rozdíl obou energií ve formě elektromagnetického vlnění. Energie se vyzáří i pohlcuje v kvantech, která tedy odpovídají rozdílům energetických hladin. Vyzářenému nebo pohlcenému kvantu odpovídá daná vlnová délka. Emise a absorpce jsou děje, které mají monochromatickou povahu. Vyzářené i pohlcené záření má poté shodnou, jednu frekvenci. [1]

Emisivitou se rozumí poměr vyzářování určitého teplotního zářiče a vyzářování absolutně černého tělesa za stejné teploty obou uvažovaných těles, jak je uvedeno ve vztahu.

$$\varepsilon = \frac{H_e}{H_{e0}} [-] \quad (22)$$

Kde  $H_e$  – vyzářování zkoumaného povrchu tělesa [ $W \cdot m^2$ ]

$H_{e0}$  – vyzářování absolutně černého tělesa [ $W \cdot m^2$ ]

Ve starší literatuře se lze setkat s tzv. stupněm černosti, což je zastaralý, již nepoužívaný název pro emisivitu. Emisivita závisí především na látkových vlastnostech tělesa, povrchové teplotě tělesa tedy celkově na povrchu tělesa a u kovů na stupni oxidace. Kovy s leštěným povrchem mají asi desetkrát menší emisivitu v porovnání s absolutně černým tělesem,  $\varepsilon$  nepřevyšuje 0,1.

V případě čistých kovů lze spočítat tzv. úhrnnou emisivitu ( $\varepsilon_n$ ) dle následujícího vztahu.

$$\varepsilon_n = 3,49 \sqrt{\rho_{el}} \left( \frac{T}{100} \right) [-] \quad (23)$$

Kde  $\rho_{el}$  - měrný elektrický odpor materiálu tělesa při 100°C [ $\Omega \cdot m$ ]

Platí pravidlo, že s rostoucím zoxidováním povrchu kovu roste i emisivita tělesa. Obecně též platí, že slitiny a polovodičové materiály mají vyšší emisivitu než čisté kovy.

Veličina podobná emisivitě je absorbtance ( $\alpha_e$ ). Ta závisí na stejných faktorech jako emisivita a navíc ještě na vlnové délce dopadajícího záření, na úhlu pod kterým záření dopadá na těleso a na polarizaci. U skutečných těles se emisivita a absorbtance může nepatrně lišit, ale v praxi se tato mírná odlišnost nebere v úvahu.

$$\alpha_e \approx \varepsilon \quad (24)$$

Emisivitu se v praxi dá zjistit experimentálně, například kalorimetrickou metodou, kterou se měří výsledný zářivý tok dopadající ze zkoumaného tělesa na obklopující měřicí systém. Další metody mohou spočívat v porovnání vyzařování vzorku s etalonem, u něhož emisivitu známe. [1, 3]

## 1.8 Měření teploty

Teplota jako termodynamická veličina je charakterizována již v předcházejících kapitolách. Tato kapitola se bude zabývat měřením teploty dotykovými i bezdotykovými metodami.

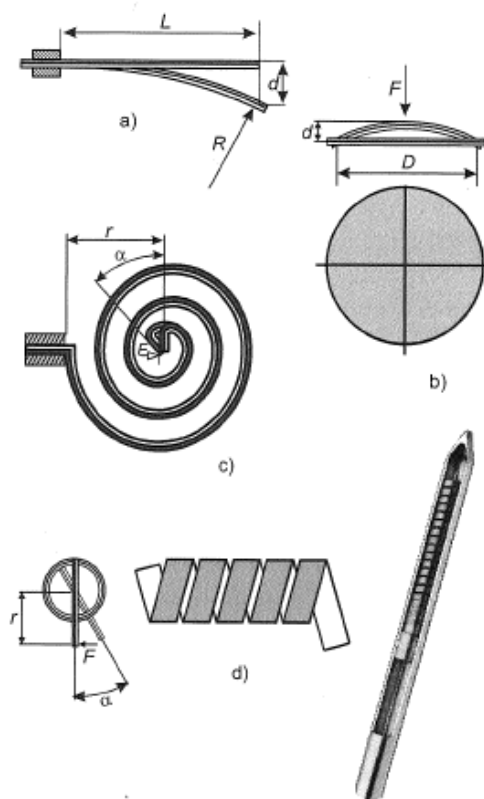
### 1.8.1 Základní principy měření teploty

#### 1.8.1.1 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry využívají roztažnost látek, která je způsobena zvyšující se teplotou. Rozlišujeme následující druhy dilatačních teploměrů.

- Kapalinové – médiem je rtuť, toluen, etanol, pentan nebo amalgam thalia.
- Pevné – 2 typy: monometalické (tyčové) a bimetalické, pouzdro teploměru je z materiálu o vysoké roztažnosti (mosaz, ocel, zinek) a uvnitř je umístěna tyč, která je z materiálu s nízkou roztažností (tzv. invar: 36% Ni, 34% Fe).

Plynné – 2 typy: stejnoobjemové (změna tlaku se změnou teploty plynu) a stejnotlaké (změna objemu).



Obr. 12 - Schéma konstrukce bimetalových pásků: a) plochý nosník, b) disk, c) spirála, d) šroubovice [1]

### 1.8.1.2 Odporové teploměry

Vychází z předpokladu, že odpor elektricky vodivých látek a polovodičů je v obecné rovině závislý na teplotě, což lze v určitém rozsahu nahradit přímkou.

$$R = R_0(1 + \alpha(t - t_0))[\Omega] \quad (25)$$

Kde  $R_0$  – odpor při teplotě  $t_0$  [ $\Omega$ ]

$t_0$  – teplota při měření odporu  $R_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha$  – teplotní součinitel odporu [ $\text{K}^{-1}$ ]

Odporové teploměry z elektricky vodivých látek jsou vyráběny z platiny (použití do 600  $^{\circ}\text{C}$  přechodně i do 1000  $^{\circ}\text{C}$ ), paladia (obdobné teplotní použití), niklu (do 300  $^{\circ}\text{C}$ ), zlata (do 400  $^{\circ}\text{C}$ ) nebo stříbra (do 250  $^{\circ}\text{C}$ ). Samotná čidla odporových teploměrů jsou zhotovena z drátku o průměru 0,01 – 0,1 mm délce zhruba 1 m, jenž je navinut na keramické kostře nebo slídovém rámečku. Čidlo může být také ve formě odporového pásku či tělíska. Nerozšířenější jsou odporová čidla Pt100, kdy drátek z platiny má při teplotě  $t_0 = 0$   $^{\circ}\text{C}$  odpor  $R_0 = 100$   $\Omega$ . Poté jsou také časté niklové odporové teploměry, jenž mají odpor  $R_0 = 20$   $\Omega$ .



Obr. 13 – Digitální teploměr s odporovým čidlem Pt100 pro měření teploty vzduchu [13]

Druhým typem těchto teploměrů jsou polovodičové odporové teploměry, které lze dále dělit na termistory NTC, ty mají záporný teplotní součinitel odporu a termistory PTC s kladným teplotním součinitelem odporu. Posledním typem jsou diody. Teplotní rozsah těchto teploměrů se pohybuje od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a předností je vysoký teplotní součinitel odporu, díky kterému se vyznačují vysokou citlivostí. Mezi nevýhody polovodičových odporových teploměrů patří stárnutí, což se projevuje zhoršením fyzikálních vlastností, a proto je vyžadováno časté cejchování.

### 1.8.1.3 Termoelektrické teploměry

Termoelektrické teploměry mají v sobě zabudované termoelektrické čidlo, termočlánek. Ten se skládá ze dvou různých kovů spojených na jednom konci svarem, popřípadě pájením. Opačný konec je připojen k tzv. svorkovnici. Uplatňuje se zde termoelektrický jev, kdy dochází k přímé přeměně rozdílu tepla na elektrické napětí a naopak. Pokud mají spoje rozdílnou teplotu, dochází na každém ze spojů ke vzniku elektrického potenciálu, jež je zdrojem proudu. V tabulce jsou uvedeny příklady dvojic kovů určených pro termočláneková čidla podle normy ČSN EN 60584-1. [13, 21]



Tab. – Typy termočlánků dle [20]

Značení	Materiály	Barevné značení	Rozsah teplot [°C]
T	Cu - CuNi	oranžová	-200 až 400
J	Fe - CuNi	červená	-200 až 900
L	Fe - Ko	-	-
E	NiCr - CuNi	hnědá	-200 až 900
K	NiCr - NiAl	žlutá	-200 až 1300
S	PtRh10 - Pt	zelená	0 až 1600
R	PtRh13 - Pt	zelená	0 až 1600
B	PtRh30 - PtRh6	fialová	300 až 1800
A	WRe5 - WRe20	-	0 až 2500

Termočlánek sice patří mezi zdroje elektrického proudu, ale využití spočívá především v použití jako čidlo teploty, poněvadž jeho energetická účinnost je velmi malá. Termočlánky měří teplotu v řádech stovek stupňů Celsia, přičemž citlivost se pohybuje v desítkách mikrovoltů na stupeň Celsia. Termočlánky nacházejí své uplatnění i pro měření sálavého tepla, viz ČSN EN ISO 6942, kde je konkrétně uvedena kombinace kovů měď/konstantan. [23]

### 1.8.2 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové metody měření teploty se dělí na zobrazovací a termovizní metody. Mezi zobrazovací metody lze zařadit i fotometrickou metodu. Termovizní metody se dále dělí objektivní a subjektivní metody, kde čidlem zjišťující rozsah teplot je oko, přičemž subjektivní metody se již příliš nevyužívají. [2]

#### 1.8.2.1 Radiační teploměry

Patří mezi bezdotykové teploměry a samotné měření teploty povrchu těles je založeno na zákonech tepelného záření, využívá se zde Planckova, Stefan-Boltzmannova a Wienova zákon, které byly popsány v předcházejících kapitolách 1.1 a 1.7.

Teplota měřeného objektu se tedy určuje z teplotního záření, přičemž rozsah měřitelných teplot se pohybuje od  $-50$  do  $+3500$  °C, avšak nevýhodou těchto typů teploměrů je velká chyba měření, která může dosahovat i desítky °C.

Mezi radiační teploměry patří obecně pyrometry dále jasové pyrometry, pyrometry pásmové a další.

Mezi nejpoužívanější radiační teploměry lze zařadit pyrometr, který je vybaven optickým systémem (čočka či zrcadlo), který veškerou vyzařovanou energii daného tělesa soustředuje do jednoho bodu, na termočlánek. Výsledná teplota měřeného tělesa závisí na emisivitě tělesa, účinnosti zobrazovacího zařízení, a pokud není těleso rovnoměrně zahřáté, také na poloze měření.

Jasové pyrometry patří mezi tzv. subjektivní detektory a jsou založeny na porovnávání záření emitovaného zkoumaným tělesem se zářením vlákna žárovky. Jas žárovky se řídí změnou proudu.



*Obr. 14 – Pásmový pyrometr [2]*

Podle způsobu měření, rozlišujeme následující druhy pyrometrů.

- Přímě měřící, bezdotykové teploměry – pyrometr
- Zobrazovací bezdotykové teploměry – termovize



Obr. 15 – Termovizní kamera FLIR [2]

Podle způsobu detekce záření, rozlišujeme pyrometry.

- Subjektivní – oko jako detektor záření (barvové, jasové pyrometry)
- Objektivní – detekce záření selektivními (Ge, Si) nebo neselektivními detektory záření (termoelektrické, pyroelektrické, bolometrické)

Norma ČSN ISO 31-6 *Veličiny a jednotky, část 6: Světlo a příbuzná elektromagnetická záření* udává základní veličiny používané v pyrometrii, v oblasti měřící teplotu daného tělesa bezkontaktními metodami na základě jeho emisivity.

Tab. 1 – Veličiny v pyrometrii [2]

Veličina	Značka	Definice	Jednotky
Zářivý tok Zářivý výkon	$\Phi$	Výkon přenášený zářením	W
Intenzita vyzařování	$M$	Podíl zářivého toku vycházejícího z elementu povrchu a plochy tohoto povrchu	$W \cdot m^{-2}$
Spektrální hustota Intenzita vyzařování	$M_\lambda$	Podíl intenzity vyzařování v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu	$W \cdot m^{-3}$
Zářivost	$I$	Podíl zářivého toku vycházejícího ze zdroje nebo jeho elementu do elementárního prostorového úhlu a tohoto prostorového úhlu	$W \cdot sr^{-1}$
Zář	$L$	Podíl zářivosti elementu povrchu a plochy kolmého průmětu tohoto elementu do roviny kolmé k danému směru	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
Spektrální hustota záře	$L_\lambda$	Podíl záře v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$
Intenzita ozáření	$E$	Podíl zářivého toku dopadajícího na element povrchu a plochy tohoto elementu	$W \cdot m^{-2}$

### 1.8.2.2 Měření teploty bezdotykovými metodami

Patří mezi nejrozšířenější metody bezdotykového měření teploty povrchů těles. V závislosti na rozsahu měřené teploty daného povrchu objektu, dělíme objektivní metody na následující.

- Optická pyrometrie
- Infračervená radiometrie

Metoda optické pyrometrie se využívá v oblasti vysokých teplot. Pokud má povrch zkoumaného objektu nižší teplotu, jedná se o infračervenou radiometrii. Pojmenování těchto metod souvisí s rozložením spektra vyzářeného daným objektem podle jeho teploty. Objektivní metody lze dále ještě rozdělit.

- Energetické
- Poměrové

### 1.8.2.3 Chyby bezdotykového měření teploty

Přesnost měření teploty povrchu těles bezdotykovými metodami ovlivňují následující parametry.

- Předmět měření

Především materiál, rozměry a tvar měřeného tělesa. Emisivita tělesa i jeho odrazivost, polarizace záření a další faktory.

- Prostředí

Prostředí, ve kterém se měří teplota objektu, je také velmi důležitá. Patří zde např. tlak a vlhkost vzduchu, v neposlední řadě teplota prostředí nebo též vzdálenost měřeného povrchu tělesa od vstupního otvoru pyrometru.

- Měřicí zařízení

Zde je konkrétně myšlen pyrometr a jeho citlivost, rozlišovací schopnosti, šířka a poloha měřeného spektra záření nebo poloha přístroje při měření.

Chybu měření lze snížit např. stanovením emisivity povrchu tělesa pomocí tabulek nebo stanovení pomocí skutečné teploty zjištěné dotykovým, kontaktním způsobem. Použití poměrových pyrometrů lze také docílit větší přesnosti měření bezdotykovými metodami.

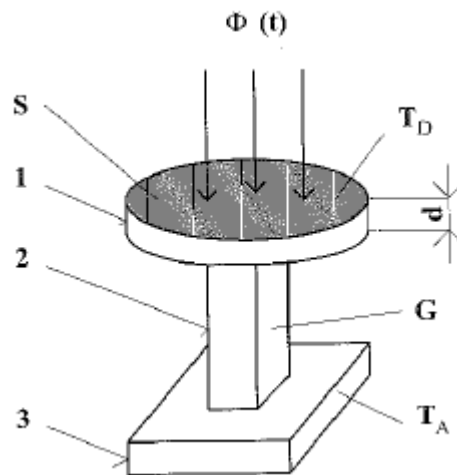
[1]

### 1.8.3 Tepelné detektory

Dopadající vstupní záření je absorbováno aktivní plochou, což vede ke zvýšení teploty daného tepelného detektoru. Vlnová délka dopadajícího záření nemá téměř žádný vliv na výstupní signál, i když pro různé vlnové délky má povrch tepelného detektoru rozdílnou absorpci. Změny teploty lze pozorovat relativně pomalu, s určitým zpožděním. Časová konstanta tepelného detektoru leží v oblasti milisekund, u fotodetektorů se pohybujeme v oblasti mikrosekund. Relativně vysoká citlivost těchto přístrojů je dána poměrně širokým absorbovaným spektrem dopadajícího záření.

Teplotu pomocí tepelných detektorů nelze měřit přímo, převádí se na jinou fyzikální veličinu a podle toho rozdělujeme převodníky.

- Termoelektrické detektory - měří změnu termoelektrického napětí dvou vodičů způsobené rozdílnou teplotou mezi spojem měřicím a srovnávacím.
- Pyroelektrické detektory - měří teplotní změnu elektrostatické polarizace.
- Bolometry – zaznamenává změny elektrického odporu v závislosti na změně teploty, tepelného toku.



Obr. 16 – Konstrukce tepelného detektoru

- Kde
- 1 – citlivá aktivní plocha tepelného detektoru o teplotě  $T_D$ , ploše  $S$  a tloušťce  $d$
  - 2 – tepelný most o tepelné vodivosti  $G$
  - 3 – podložka o teplotě  $T_A$

*Tepelná kapacita detektoru*

Veličina, vyjadřující množství tepla, jímž se těleso ohřeje o 1 K. Tepelná kapacita detektoru lze určit z následujícího vztahu.

$$C = c_p \cdot m = c_p \cdot \rho \cdot V = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot d [J \cdot K^{-1}] \quad (26)$$

Kde  $c_p$  – měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$m$  – hmotnost měřícího detektoru [kg]

$\rho$  – hustota materiálu detektoru [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$V$  – objem měřícího detektoru [ $m^3$ ]

$S$  – velikost aktivní plochy [ $m^2$ ]

$d$  – tloušťka detektoru [m]

*Tepelná vodivost detektoru*

Mezi detektorem a okolním prostředím se teplo sdílí vedením, prouděním a sáláním, přičemž ztráty tepelné vodivosti určující odvod tepla z detektoru do okolního prostředí jsou úměrné změně teploty. Následující vztah definuje kvantum odvedeného tepla za jednotku času.

$$q = \frac{dQ}{dt} = G_v \cdot \Delta T [J] \quad (27)$$

Kde  $Q$  – teplo [J]

$t$  – čas [s]

$G_v$  – ztráty tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\Delta T$  – rozdíl teplot [ $^{\circ}C$ ]

Sálání okolního prostředí na měřící detektor se nebere v potaz, poněvadž emisivita prostředí je velmi malá.

**1.8.3.1 Termoelektrické detektory**

Tyto detektory jsou založeny na tepelných jevech, jako je Seebeckův, Peltierův či Thomsonův jev, přičemž podstatou vzniku těchto jevů je existence kontaktního potenciálu, jež je na povrchu každého kovu. Využívá se zde tzv. emise elektronů. K emisi elektronů do-

chází v případě ohřátí kovu a odtržením valenčních elektronů z obalu atomu určitého kovu. Elektrony se stávají volnými a podaří se jim proniknout na povrch.

Seebeckův jev popisuje přeměnu teplotních rozdílů přímo na elektrické napětí mezi konci dvou kovových tyčí. Vzniklé napětí způsobuje nepřetržité proudění elektronů, v případě, že vodiče utváří uzavřený obvod. Napětí vznikající mezi konci kovových tyčí je velmi malé, několik mikrovoltů na stupeň Celsia.

Peltierův jev je inverzním jevem k Seebeckovu, kdy elektrony putují z tělesa s větší vstupní prací do tělesa s menší vstupní prací. Pohybu elektronů je kladen menší odpor, mají přebytek kinetické energie a tu odevzdávají v podobě tepla.

Thomsonův jev je založen na tom, že se kovová tyč na jednom konci zahřívá, tím se zvyšuje kinetická energie elektronů a ty se snaží přesunout k chladnějšímu konci tyče. Jeden konec tyče je nabit kladně, druhý záporně a ve vodiči vzniká slabé elektrické pole.

### **1.8.3.2 Pyroelektrické detektory**

Pyroelektrické detektory jsou založeny na pyroelektrickém jevu, který spočívá v samovolné polarizaci feroelektrických krystalických materiálů, což je způsobeno teplotní změnou pyroelektrického detektoru.

Dochází k elektronové polarizaci, což je fyzikální děj, při kterém nastane změna rozložení elektrických nábojů ve vodiči či izolantu. Pyroelektrika patří mezi dielektrika neboli izolanty. Polarizační neboli vázaný náboj se nedokáže v dané látce volně posouvat, pohybuje se jen na vzdálenosti velikosti částic – atomů nebo molekul. Zpolarizované částice se stávají tzv. elektrickým dipólem. Polarizace se dělí dle působení elektrického pole na částice na následující.

- Atomová (elektronová)
- Iontová
- Orientační (dipólová)

Zjednodušeně je princip pyroelektrického detektoru založen na ohřevu feroelektrického krystalu zářivým tokem, dojde vlivem změny teploty feroelektrika ke spontánní polarizaci a ta vede ke vzniku elektrického náboje, jenž se zaznamenává a vyhodnocuje. [1]

## 1.9 Měření tepelného toku

Z hlediska přenosu tepelného toku do okolí lze měřit tepelný tok sdílený vedením, konvekcí či zářením. Tato kapitola popisuje pouze přenos tepla zářením.

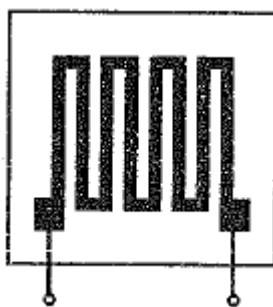
### 1.9.1 Měření tepelných toků při přenosu tepla sáláním.

Velikost tepelného toku při sdílení tepla sáláním se zjišťuje měřením dopadajícího tepelného toku ze zářivého objektu na čidlo měřícího přístroje. Pro měření sálavého toku se používají nejčastěji tzv. bolometry.

#### 1.9.1.1 Bolometry

Bolometr je založen na změně elektrického odporu, což je způsobeno zahříváním odporové části přístroje dopadajícím absorbovaným zářením, přičemž mezi základní odporové elementy těchto přístrojů patří následující.

- Kovové – vrstvy oxidu kobaltu, niklu jsou nanесeny na elektricky nevodivou podložku
- Dielektrické
- Polovodičové
- Supravodivé



*Obr. 17 – Schéma bolometru určeného pro měření tepelného toku vyvolaného zářením*

[13]

Tento typ bolometru spočívá také ve změně odporu, konkrétně platinové fólie, jež se zahřívá právě dopadajícím zářením, přičemž měřící fólie je pokryta sazemí či platinovou černí z důvodu pohlcení veškerého dopadajícího záření. Dochází zde k maximálnímu pohlcení dopadajícího záření, jako v případě absolutně černého tělesa, viz kapitola 1.7.4. [13]



### **1.9.1.2 Peltierův článek**

K měření tepelného toku se využívá také Peltierova článku. Tento článek je založen na tzv. Peltierově efektu, který je popsán v předchozí kapitole 1.8.3.1. Je tvořen dvěma polovodiči typu P a N, které jsou spojeny spojovacím můstkem, přičemž pro přívod energie slouží kontaktní plochy ve spodní části polovodičů. Kontaktní plochy a spojovací můstek teplo vyzařují či absorbují. Druh kovu a jejich teplota ovlivňuje výsledný efekt. [19]

### **1.9.1.3 Další způsoby měření sálavého toku**

Slabý tepelný tok vyvozený zářením tělesa lze měřit také termočlánkem, avšak měl by být upraven tak, aby se všechna dopadající energie přeměnila v teplo (např. kalorimetr ve formě obdélníkového plechu natřený na černo, viz norma ČSN EN ISO 6942 zabývající se měřením sálavého tepla [23]). Dalšími teploměry, které lze použít na měření sálavého tepla jsou radiační teploměry nebo termovize. Tyto teploměry totiž neměří teplotu povrchu, ale sálavý tepelný tok, jenž je emitován z povrchu zkoumaného objektu. [1, 13]

## **1.10 Degradace materiálů**

Norma ČSN EN ISO 6942 se skládá ze dvou částí. Metoda A se zabývá projevy sálavého tepla po vizuální stránce na různých materiálech, Metoda B řeší problematiku prostupu sálavého tepla. Z tohoto důvodu se tato kapitola okrajově zaměří i na degradaci, konkrétně termodegradaci.

V této kapitole je stručně popsána degradace, její základní typy a podrobněji se zaměří na fotodegradaci syntetických materiálů, konkrétně materiálů textilních.

Degradace je proces, při kterém se působením různých vlivů mění pozorované vlastnosti materiálů. Změnou vlastností je myšleno zhoršení mechanických, vzhledových, fyzikálních a jiných parametrů zkoumaného vzorku. Kromě typu a velikosti působícího vlivu, který se negativně projevuje na daný vzorek, je důležitým parametrem čas, po který dochází k expozici. K degradaci dochází nejčastěji při zpracování působením tepla, síly a kyslíku a při aplikaci výrobku vlivem UV záření, tepla, kyslíku a chemikálií. Degradální reakce mohou probíhat v jenom kroku nebo řetězovými reakcemi, při kterých počáteční reakce vede k další a rychlost degradace se tak neustále zvyšuje.

### 1.10.1 Základní typy degradace

Základními typy degradace materiálů jsou:

- Mechanodegradace
- Fotodegradace
- Degradace ionizačním zářením
- Biodegradace
- Chemodegradace
- Termodegradace

#### 1.10.1.1 Mechanodegradace

K mechanodegradaci dochází vlivem působení mechanického napětí ve zkoumaném objektu a v případě polymerních materiálů patří mechanodegradace k vlivům podepisujícím se výrazně na jejich vlastnostech. Mechanodegradace je způsobená deformací, která je vyvíjena na materiál ať již v průběhu zpracování (např. válcování), úprav hotového výrobku např. řezání nebo při samotné aplikaci působením síly. Při mechanodegradaci tedy dochází k působení mechanické energie, čímž dochází k excitovanému stavu. Pohlčená energie se může disipovat a tak dochází k relaxaci napětí. Druhou možností je absorpce energie a poté dochází ke štěpení řetězců v materiálu. Podmínkou štěpení řetězců je působení dostatečně velké energie po určitou dobu. Štěpení probíhá nejčastěji uprostřed molekuly a s vyšší molekulovou hmotností se zvyšuje i rychlost štěpení. Mechanodegradace může probíhat v pevné fázi, kde záleží na krystalinitě, v tavenině, kterou provází vznik radikálů a v roztoku vlivem toku nebo i ultrazvukem. Mechanodegradace se využívá při tzv. mastikaci kaučuků, kdy směs prochází dvouválcem nebo hnětičem, přičemž dochází ke štěpení řetězců a významně se snižuje viskozita směsi. Mastikace se využívá pro snadnější zpracování kaučuků.

#### 1.10.1.2 Fotodegradace

Působením světla dochází k degradaci materiálu a zhoršení nejen mechanických vlastností, ale v neposlední řadě i ke změně vzhledu. Základem je absorpce fotonu za vzniku excitované chemické vazby, čímž dojde k přechodu elektronu do neobsazeného orbitalu s vyšší energií, ať již do singletového, či stabilnějšího tripletového stavu. Kolik fotonů vzorek ab-

sorbuje, tolik poté vznikne excitovaných vazeb, přičemž excitovaná molekula se nemusí rozpadnout, ale může nastat tzv. chemický rozpad na dva radikály, zářivý rozpad, při kterém rozpadlý radikál vyzáří energii. Při nezářivém rozpadu radikál disipuje energii v teplo. Poslední možností je zhášení radikálu. Polymerní materiál má v řetězci zabudované tzv. chromofory. Ty jsou schopné absorbovat fotony. Takovými chromofory jsou např. karbo-nylové skupiny a jejich přítomnost v polymeru je nežádoucí, poněvadž urychlují degradaci materiálu. Zabránit fotodegradaci lze snížením počtu fotonů v materiálu, deaktivace chromoforů, zhášení excitovaných stavů, deaktivace volných radikálů nebo zpomalení fotodegradace různými přísadami.

#### ***1.10.1.3 Degradace ionizačním zářením***

Degradace, při které je působícím činitelem ionizační záření, což je záření, které má vyšší energii než je disociační energie chemických vazeb. Mezi elektromagnetické záření patří tzv. gamma záření, jež vzniká při jaderných reakcích a rentgenové záření, vznikající interakcí vysoce energetického elektronu. Tzv. částicové záření je zastoupeno tzv. rychlými elektrony, vycházející z urychlovače a neutrony produkované atomovými reaktory. Ionizace probíhá ve třech krocích. Nejprve musí dojít k přenosu energie, kdy dochází ke vzniku ionizační stopy a nakonec produkty ionizace reagují s okolím. Štěpení řetězců a síťování je poté důsledkem ionizačního záření. K vyššímu počtu rozštěpených molekul přispívá přítomnost kyslíku, přičemž se polymerní materiály stabilizují aromatickými sloučeninami, tedy cyklickými sloučeninami se systémem dvojných vazeb. Aplikace ionizačního záření je značná, např. v podobě plazmy. [22]

#### ***1.10.1.4 Biodegradace***

Biodegradace se týká především biopolymerů a obecně přírodních materiálů, syntetické materiály jsou poměrně netečné. Při biodegradaci degradují polymery na molekuly, jež jsou dále spotřebovávány organismy. Ty rozklad působícími enzymy katalyzují. Enzymy se dělí podle funkce na hydrolázy, které hydrolyzují např. amidově vazby, proteázy hydrolyzují proteiny, karboxylázy polysacharidy a esterázy hydrolyzují nukleové kyseliny. Testy ukázaly, že odbourávání začíná od konce řetězce. Rychlost biodegradace závisí na větvení řetězců, molekulové hmotnosti, ale i na měrném povrchu. Mezi projevy enzymatického rozkladu patří skvrny, zápach, změna mechanických a elektrických vlastností, změna propustnosti a další. Mezi přírodní biodegradovatelné polymery patří celulóza nebo škrob a v případě syntetických polymerů náchylných k biodegradaci to jsou takové polymery, které

obsahují snadno hydrolyzovatelné skupiny. Např. lineární polyester, modifikované polyamidy a jiné.

#### ***1.10.1.5 Chemodegradace***

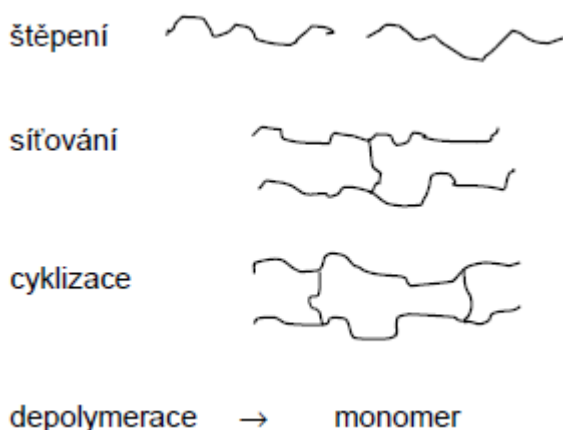
Chemodegradace je rozkladný proces, při kterém na materiál působí chemikálie a dochází k nežádoucím chemickým degradačním reakcím. Solvolýza, hydrolýza a ozonizace patří mezi chemické reakce působící na materiál, kdy dochází k rozkladu pomocí rozpouštědel, v případě hydrolýzy je rozpouštědlem voda. Rychlost těchto rozkladných reakcí závisí hlavně na teplotě, pH, úrovni mechanického napětí. Na solvolýzu či hydrolýzu jsou citlivé především přírodní materiály. Mezi polymery podléhající těmto reakcím patří lineární polyester, polyamidy či polyuretany. Při ozonizaci (tzv. ozonolýza) dochází působením ozonu ke štěpení dvojných olefinických vazeb, při níž vznikají radikály. Ozon rozkládá např. polyolefiny či polyvinylchlorid.

K chemické degradaci dochází i v případě působení nečistot obsažených v ovzduší, což jsou především oxid dusičitý nebo oxid siřičitý. Oxid dusičitý, vyskytující se v ovzduší reaguje s polyetylenem nebo polystyrenem. Rozklad působením oxidu siřičitého urychluje UV záření, které molekuly v materiálu excituje.

Rozpouštědla negativně působící na materiál vnikají do rozpouštěné látky a ta botná. To jak rychle materiál botná je dáno stupněm zesíťování, linearitou polymeru a stupněm krystalizace. V průběhu botnání (rozpouštění) rozpouštědlo může chemicky reagovat s rozpouštěnou látkou a tím rozklad urychluje.

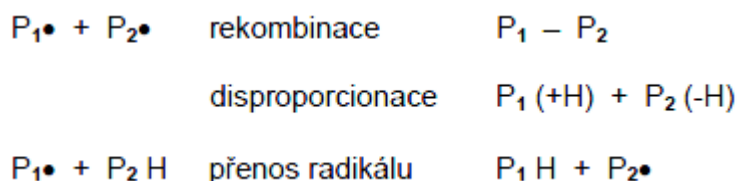
#### ***1.10.1.6 Termodegradace***

Termodegradační reakce jsou reakce, při kterých dochází k rozkladným reakcím působením zvýšených teplot. Anorganické materiály jako jsou např. silikáty, jsou odolnější proti působení tepla než organické materiály. Důvodem jsou kovalentní vazby s nízkou disociační energií, což má za následek vznik radikálů již při relativně nízkých teplotách. Působením vysokých teplot dochází v polymerech ke štěpení řetězce, síťování, cyklizaci popřípadě může nastat depolymerace na výchozí monomery.



Obr. 18 – Mechanismy tepelné degradace

U polymerů s postranními skupinami dochází k eliminačním rozkladným reakcím (tepelná degradace polyvinylchloridu a eliminace kyseliny chlorovodíkové), popřípadě odštěpení postranní skupiny.



Obr. 19 – Terminační reakce termodegradace

Nepravidelnosti ve struktuře polymeru jako je větvení, počet dvojných vazeb, uspořádání hlava-hlava snižují tepelnou stabilitu. Mimo to, polymer nesmí obsahovat tzv. „slabé“ vazby.

Mezi polymery odolávající vysokým teplotám patří aromatické sloučeniny, sloučeniny s cyklickými prvky ve struktuře nebo látky, které nemají zabudovaný v řetězci uhlík nebo vodík, např. silikony. Pozitivně působí přítomnost fluoru, jehož výskyt ovšem zhoršuje zpracovatelnost. Dalším předpokladem je tzv. žebříková struktura, např. polyakrylonitrilová vlákna odolávající zvýšeným teplotám. K tepelné iniciaci dochází vždy. Některé tepelně odolné materiály obsahují stabilizátory, které reagují s produkty propagační reakce. Tepelnými stabilizátory jsou tzv. antioxidanty. Antioxidanty se dělí na primární, sekundární a deaktivátory kovů. Primární antioxidanty ukončují řetězovou reakci vzniklou působením tepla a příkladem jsou sekundární aromatické aminy. Mezi sekundárními antioxidanty patří např. siričné sloučeniny, ty rozkládají peroxidy. Deaktivátory kovů vážou kovové ionty a jsou jimi např. měď, železo, kobalt. Antioxidanty lze kombinovat a tak dochází synergickému efektu.

K hodnocení tepelné stability se využívá termická analýza, diferenciální skenovací kaloriemie (DSC) nebo termogravimetrická analýza (TGA). Ve výzkumu se využívá k hodnocení spotřeba kyslíku, tzv. limitní kyslíkové číslo, množství odštěpené kyseliny chlorovodíkové, popřípadě chemická analýza pomocí níž se zjišťuje množství těkavých produktů a netěkavého zbytku. [22]

### 1.10.2 Degradace vláken

Degradace vláken je způsobena působením tepla, UV zářením nebo působením chemikálií. Depolymerace a štěpení řetězců jsou dva základní pochody, ke kterým dochází při degradaci vlákenných materiálů. Vlivem depolymerace dochází ke snižování molekulové hmotnosti a tím i k poklesu mechanických vlastností vláken. Štěpení řetězců je závažnější problém, protože pevnost vláken a celkově mechanické vlastnosti klesají mnohem rychleji.

Pokud dochází k tepelným rozkladným reakcím, jedná se o radikálovou depolymeraci nebo cyklizační reakce vedoucí ke ztrátě houževnatosti vláken, vlákna křehnou. Termodegradace může probíhat bez přístupu vzduchu, ve vakuu nebo v jeho přítomnosti, což urychluje degradační reakce, protože dochází ke štěpení řetězců polymeru, z něhož jsou vlákna vyrobena.

V případě fotodegradace jsou účinky UV záření odvislé od intenzity působení a intenzitě světelné energie. Například energie fotonů o vlnových délkách 300-400 nm (300-390 kJ/mol) je podobná jako disociační energie kovalentních vazeb v polymerech (C-C asi 420 kJ/mol). Nejprve při fotodegradaci nastává štěpení primárních vazeb za vzniku radikálů, s čímž souvisí následující proces – depolymerace.

Častá je i hydrolytická degradace, ke které dochází vlivem působení vody a agresivního kapalného prostředí, ve kterém vlákna postupně botnají a rozkládají se – dochází ke štěpení řetězců. [13, 21]

### 1.10.3 Hořlavost vláken

K hoření vláken dojde v případě, že samotný materiál je hořlavý, k dispozici je dostatečně velká tepelná energie a kyslík.

V přítomnosti kyslíku a velké energie dochází u vláken k následujícím pochodům:

- Absorpce tepla a snižování vlhkosti vláken
- Tvorba hořlavých plynů, což je způsobeno tepelným rozkladem (pyrolýzou) vláken

- Vzplanutí hořlavého plynu (dochází k radikálové reakci mezi uvolňujícím se hořlavým plynem a okolním kyslíkem)
- Zvyšující se teplo vlivem hoření vláken, které tvorbu hořlavých plynů dále zvyšuje

Nehoří tedy vlákna, ale uvolněné hořlavé plyny, produkty pyrolýzy. Hořlavá vlákna jsou taková, která obsahují ve své struktuře velký počet vodíků jako je např. polyetylen, celulóza. Naopak nízkou hořlavost vykazují polymery s aromatickými prvky a polymery, které mají zabudované ve struktuře halogenové prvky – chlor, fluor.

Vlákna se opatřují různými úpravami, které vedou k omezení tvorby hořlavých plynů, snížení možnosti rozkladu vláken zvýšením tepelné odolnosti, tvorbou nehořlavého plynu, který s kyslíkem nereaguje, snížení tepelné energie vyvíjené na vlákna, která degradují endotermním rozkladem (nehořlavé materiály) nebo nanesení izolující, porézní např. uhlíkové vrstvy na vlákna.

Limitní kyslíkové číslo se využívá k charakterizaci hořlavosti materiálu, které udává množství kyslíku v kombinaci s dusíkem, jež je potřeba k hoření. Vlákna nepodléhající hoření mají  $LOI = 26$  a více.

Tab. 2 – Hodnoty LOI pro různé typy vláken [21]

klasifikace	druh vlákna	LOI [%]	$T_m, T_g$
nehořlavá	sklo	nehoří	800
tepelně odolná	nomex	30	400
	novoloid (Kynol)	30 - 40	350
	teflon (PTFE)	95	327
	zylon (PBO)	68	550
	uhlíková vlákna	> 60	-
	polybenzimidazol (PBI)	41	450
odolná vůči hoření	polyfenylénsulfid	34	285
	modakryl	27 - 31	160 - 190
	nehořlavý PES	28 - 32	259
	Kevlar	28	480
	PVC (Vynilon)	35 - 37	210
	vlna	24 - 26	-
hořlavá	bavlna	17 - 19	-
	polypropylen (PP)	19 - 20	164 - 170
	nylon	20 - 22	256
	polyester (PES)	20 - 22	258
	akrylová vlákna	20	rozklad
	viskóza	17 - 19	-

Vlákna, aby byla nehořlavá, prochází úpravami podle toho, zda jsou přírodní či syntetického původu. U syntetických vláken se povrchová vrstva nanáší přímo na povrch vlákna, provádí se tzv. zušlechťovací operace, nebo již při přípravě polymeru se zakomponuje potřebný monomer či sloučeniny, které odolávají hoření, tzv. zhášedla. U přírodních vláken je možná pouze povrchová úprava, což se docílí nánosem speciálních vrstev. [8, 13, 14, 21]

### 1.11 Materiály a materiálové kompozice pro ochranu vůči účinkům tepla

Jsou to materiály a materiálové kompozice, které nacházejí uplatnění v ochranných oděvech. Tyto materiály by měly odolávat účinkům sálavého nebo kontaktního tepla. Ochrannými oděvy respektive materiály odolávající prostupu tepla při dotyku se zabývá norma ČSN EN 702 – *Ochranné oděvy – Ochrana proti ohni – Zkušební metoda pro stanovení prostupu tepla ochranným oděvem nebo jeho materiály při dotyku*. [28]

Hasičské zásahové rukavice slouží k ochraně rukou a patří mezi tzv. ochrannou pracovní pomůcku 3. kategorie, přičemž mají odolávat vysokým teplotám a vyhovovat požadavkům normy ČSN EN 659:2004+A1:2008 - *Ochranné rukavice pro hasiče*. Norma ČSN EN 420:2004+A1:2010 – *Ochranné rukavice – Všeobecné požadavky a metody zkoušení* vychází z předešlé normy a navazuje na ni. [26, 27]

Vyjma vysokých teplot jsou na hasičské rukavice také kladeny požadavky na odolnost vůči mechanickému namáhání popsané v normě ČSN EN 388:2004 - *Ochranné rukavice proti mechanickým rizikům*. Konkrétně se jedná například o odolnost proti pořezu, odolnost proti propíchnutí, odolnost proti oděru a odolnost proti trhání. [24]

Mimo to, materiál, ze kterého je rukavice vyrobena, především tedy první vrstva, musí odolávat smrštění teplem, chemikáliím a vodě. [18]

#### 1.11.1 Skladba hasičské rukavice

Hasičská rukavice se skládá z více vrstev materiálu, tvoří tzv. materiálový sendvič. V tomto případě se jedná o hasičskou zásahovou rukavici firmy Holík International, která se skládá ze čtyř vrstev. První vrstva, která je v bezprostředním kontaktu s potenciálním sálavým tokem je vrchní vrstva (1), následuje mezivrstva (2), membrána (3) a podšívka (4), která je v kontaktu s lidskou pokožkou. Vrstvy materiálového sendviče hasičských zásahových rukavic jsou na následujícím obrázku.





Obr. 20 – Skladba hasičské zásahové rukavice

Hasičské rukavice musí především odolávat vysokým teplotám, ale i mechanickému namáhání. Tyto minimální požadavky zahrnují příslušné normy, popsané v předcházející kapitole 1.11.

#### ***1.11.1.1 Vrchní vrstva***

Vrstva, která je v přímém kontaktu s okolním prostředím a jsou na ni kladeny ty nejvyšší požadavky. Musí především odolávat sálavému, kontaktnímu teplu, mechanickému namáhání a v neposlední řadě i pronikání chemikálií či vody. Na vrchní vrstvu se používají ze syntetických materiálů např. Nomex, Kevlar, Kermel a z přírodních materiálů to jsou usně se speciální povrchovou úpravou.

#### ***1.11.1.2 Mezivrstva***

Další vrstvou je mezivrstva, která plní izolační funkci hasičských zásahových rukavic. Napomáhá vrchní vrstvě odolávat sálavému teplu a proto je vyrobena z netkané textilie aramidových vláken, která je známá svou tepelnou stabilitou a izolačními vlastnostmi. Konkrétně se jedná o Kevlar, Nomex a jejich směsi. Mimo jiné mezivrstva chrání i proti mechanickému namáhání, zvyšuje životnost a chrání membránu, další vrstvu rukavice.

#### ***1.11.1.3 Membrána***

Hlavní funkcí membrány je propustnost pro vodní páry, směrem od pokožky do okolí, ale zároveň vodu působící na rukavici z okolí nepropouští. Neplní tolik ochrannou funkci ru-

kavice, jako spíš funkci komfortu nositele. Spolu s chemikáliemi, přes membránu neprojdou také bakterie. Pro své rozměry a hmotnost membrána nijak neovlivňuje tloušťku a výslednou úchopovou účinnost rukavice jako celku. Membrána je vyrobena často z polyuretanu se speciální úpravou, tak aby při případném hoření neodkapával a nepůsobil negativně na okolní vrstvy materiálového sendviče. Další možností může být použití kombinace polytetrafluorethylenu a polyuretanu taktéž s úpravou proti hoření.

#### ***1.11.1.4 Podšívka***

Podšívka je vrstva rukavice, která je v kontaktu s lidskou pokožkou, proto jsou na ni kladeny nároky především v ohledu na komfort. Mimo to, by měla podšívka odvádět pot z pokožky, měla by mít antibakteriální schopnosti a příjemná na omak. Při působení tepla se nesmí tato vnitřní vrstva rukavice tavit, odkapávat či vzplanout. Podšívková pletenina je zhotovena především z Kevlaru, který navíc má vynikající mechanické vlastnosti, jako je odolnost proti propíchnutí či pořezání, případně je vyrobena z bavlny s nehořlavou úpravou. [29]

## **1.12 Materiály vhodné pro použití v hasičské zásahové rukavici**

### **1.12.1 Používané tepelně odolné textilní materiály a useň**

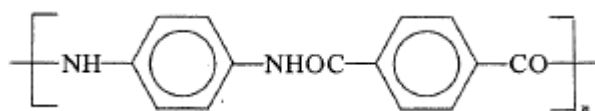
Z důvodu výjimečných tepelných vlastností se nejčastěji na svrchní vrstvy rukavic používají materiály syntetické, konkrétně aromatické polyamidy neboli aramidy. Jako alternativa se nabízí přírodní usně se speciální povrchovou úpravou.

#### ***1.12.1.1 Materiály použité ve vrchních vrstvách***

##### **Kevlar**

Kevlar je obchodní název pro para-aromatické polyamidové vlákno (poly-para-fenyltereftalamid), které bylo vyvinuto v roce 1965 francouzskou firmou DuPont spřádáním vláken krystalického roztoku. Federální obchodní komise definuje Kevlar jako: „Vlákno vyrobené z polyamidu s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem, jehož alespoň 85 % peptidických vazeb spojuje dvě aromatická jádra“. Tuhá struktura Kevlaru je zapříčiněna dlouhými, tuhými uhlovodíkovými molekulovými řetězci, na kterých jsou zabudovány skupiny benzenových jader. Relativně pevné molekuly, ze kterých se struktura Kevlaru skládá, mají tendenci se ukládat do planární listové struktury. K tuhosti vláken také přispívají mezimolekulární síly i velmi vysoký stupeň krystalinity. Při výrobě Kevlaru je nutné

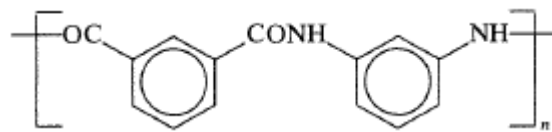
dbát na čistotu, poněvadž především soli nebo vápník reaguje s vazbami mezi vlákny a snižuje výsledné mechanické vlastnosti. Relativní hustota Kevlaru se pohybuje okolo  $1,44 \text{ g/cm}^3$ . Jsou-li vlákna vystaveny vysokým teplotám, netaví se, ale teprve při  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  uhlennatí avšak nedochází ke korozi. Vlákna vynikají jak vysokou pevností ( $3000 \text{ MPa}$ ), tak především výjimečnou tepelnou stabilitou, kterou si uchovává i při velmi nízkých teplotách. Při dlouhodobém vystavení vláken teplotě  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  se snižuje pevnost vláken o  $10 \%$ , při  $260 \text{ }^\circ\text{C}$  až o  $50 \%$ . Při teplotě  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  vlákna Kevlaru sublimují. Velkou nevýhodou je špatná odolnost proti UV záření, obtížná barvitelnost, která se obchází barvením v roztaveném stavu, a navlháním. Použití Kevlaru spočívá především v leteckém a vojenském průmyslu. Pro svou tepelnou odolnost najde tento materiál uplatnění i mezi ochrannými prostředky. Například ochranné hasičské zásahové rukavice jsou vybaveny Kevlarovou podšívkou, která tvoří vnitřní, čtvrtou vrstvu sendvičové struktury rukavice, ale uplatnění lze najít i v kombinaci s Twaronem. [9, 33]



Obr. 21 – Schematický vzorec Kevlaru [9]

### Nomex

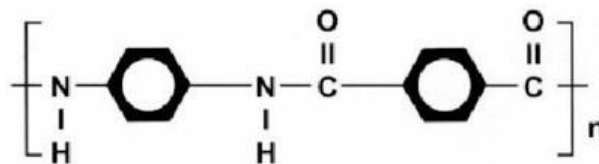
Nomex taktéž patří do skupiny materiálů, který na počátku 60. let minulého století vyvinula firma DuPont. Jedná se o meta-aromatický polyamid, aromatický nylon, variantu para-aromatického polyamidu – Kevlaru a tak vyniká také jako Kevlar vysokou tepelnou odolností a ohnivzdorností. Na rozdíl od Kevlaru, Nomex nemá tak vysokou pevnost v tahu, což je zapříčiněno orientací meta, kdy nelze řetězce molekulárně narovnat. Měrná hustota Nomexu je  $1,4 \text{ gc/m}^3$ . Vyniká odolností proti organickým rozpouštědlům a výhodou je také to, že se vlákna netaví při kontaktu s plamenem, ale uhlennatí. Přes podobnost s Kevlarem, Nomex má významně vyšší dlouhodobou tepelnou odolnost v porovnání s vlákny Kevlaru (až při teplotách  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Mezi další výhody patří vysoká odolnost proti oděru a odolnost proti plísni. Nomex se využívá především v hasičském a závodním průmyslu. Své uplatnění ovšem nalezne tento materiál také v akustice, poněvadž odráží vysokofrekvenční zvuk a středně a nízkofrekvenční zvuk zvyšuje. Je rozpustný v kyselině sírové. Využívá se jako první kontaktní vrstva hasičských zásahových rukavic. [31]



Obr. 22 – Strukturální vzorec Nomexu [9]

Twaron

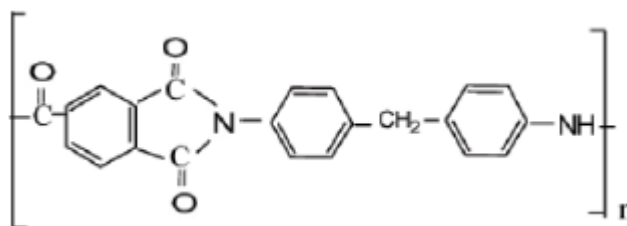
Twaron patří spolu s Kevlarem mezi para-aramidová vlákna. Twaronová vlákna byla vyvinuta v roce 1960 firmou Tejin Aramid. Twaron je strukturou i vlastnostmi velmi podobný Kevlaru. Mezi přednosti tohoto materiálu patří vysoký modul pevnosti (5x větší než ocel) a teplotní stabilita, odolnost proti průstřelu, oděru a vůči organickým rozpouštědlům. Vysoká pevnost v tahu (asi 3000 MPa) a Youngův modul pružnosti Twaronu je dán tuhou a orientovanou molekulovou strukturou. Nevede elektrický proud a nedochází u něj ke korozi. Jeho relativní hustota je 1,44 g/cm<sup>3</sup>. Slabinou vláken vyrobených z Twaronu je citlivost na ultrafialové záření, vlhkost a vlastnosti se též snižují působením salinity. Jako Kevlarová vlákna, i Twaronová mají vynikající tepelné vlastnosti. Při vysokých teplotách se pevnost v tahu snižuje jen o 10 – 20 %. Při nízkých teplotách má dokonce větší mez pevnosti než za pokojových podmínek. [32]



Obr. 23 – Schematický vzorec Twaronu [32]

Kermel

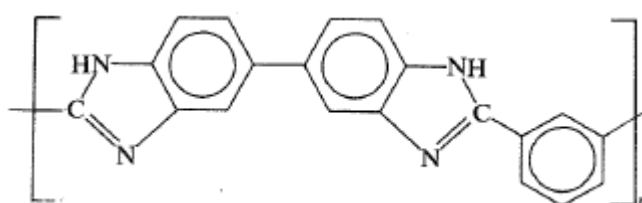
Kermel je obchodní název aromatického polyamidu, který vyvinula francouzská firma Rhodia počátkem 60. let 20. století. Mezi významné vlastnosti patří nehořlavost a odolnost vůči kyselinám a organickým rozpouštědlům. Tkaný Kermel má také dobré mechanické vlastnosti. Má vysokou pevnost v tahu a vyniká odolností vůči oděru. K rozkladu dochází až při teplotách 380 °C a měrná hmotnost je 1,34 g/cm<sup>3</sup>. Lze jej dlouhodobě použít při teplotách do 250 °C.



Obr. 24 – Strukturální vzorec Kermelu [9]

PBI

Polybenzimidazolové vlákno je syntetické vlákno vyznačující se vysokým bodem tání a díky struktuře řetězce, ve kterém jsou zabudované imidazolové skupiny, vyniká mimořádnou chemickou a zvláště tepelnou stabilitou. PBI také patří mezi aromatické polymery. Chemická odolnost se projevuje tím, že vlákno z PBI odolává všem rozpouštědlům. Hůře již odolává koncentrovaným kyselinám. PBI vlákna mají relativně vysoký modul pružnosti (5,9 GPa), pevnost v tahu se pohybuje okolo 160 MPa a vyniká též malou tažností. Mezi další výhody patří nehořlavost (u vláken nedochází ke vznícení) a minimální absorpce vody. Měrná hustota PBI vláken je 1,3 g/cm<sup>3</sup>. PBI vlákna lze dlouhodobě vystavit teplotě 260 °C až 400 °C. Až při teplotě 760 °C dochází k rozkladu, ale vlákna se netaví. Krátkodobě lze vlákna vystavit teplotě 540 °C, kdy nedochází k porušení a vlákna si drží své vlastnosti. PBI nachází uplatnění především v ochranných prostředcích, u rukavic pro hasiče se používá jako ochrana před přímým stykem s žářem, konkrétně ochrana kloubů ruky či jako první vrstva čtyř vrstevového materiálového sendviče. [9]

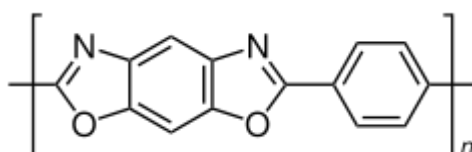


Obr. 25 – Strukturální vzorec PBI [9]

PBO

PBO patří mezi aromatické heterocyklické polymery, který se vyrábí roztokovou polymerací a následným zvlákňováním. Obchodní název tohoto syntetického vlákna je Zylon a jeho chemický název je poly(p-fenylene-benzobisoxazol). Vlákno PBO se vyrábí již od roku 1998 a svými vlastnostmi patří mezi tzv. *high performance fibers*, čímž se řadí k aramidům či uhlíkovým vláknům. Má velmi dobré mechanické vlastnosti, především pevnost v tahu, která dosahuje 5,8 GPa. Měrná hustota PBO vláken je 1,56 g/cm<sup>3</sup>. Vyrábí se ve dvou vari-

antách. Liší se v jemnosti, pružnosti a tažnosti. Vlákna PBO rovněž vynikají výbornou tepelnou stabilitou, kdy je lze použít až do teploty 650 °C. Při této teplotě se začíná vlákno rozpadat, nikoli tavit. Jedinými nedostatky je nízká odolnost proti UV záření a vlhkosti. Možnosti použití PBO vláken je rozsáhlé. Přes ohnivzdorné ochranné prostředky, sportovní potřeby až k výrobě letadel, vesmírných lodí či konstrukci mostů. V hasičské zásahové rukavici nachází uplatnění ve svrchní vrstvě, kde čelí přímému styku s teplem a ohněm. [34]



Obr. 26 – Strukturní vzorec PBI [34]

### Useň

Useň je přírodní materiál s anizotropními vlastnostmi, kdy vlastnosti závisí na směru měření. Jednak vlivem směru měření ale i tím, že useň je přírodní materiál se specifickou strukturou. Skládá se z třech vrstev: pokožky, škáry a podkožního vaziva. Pokožka je pórovitá a dle použitých surovin má i rozdílnou tloušťku. Škára tvoří největší část usně, tvořící hustou spleť vláken, určující mechanické vlastnosti usně jako je pevnost a tažnost. Pokožka je se škárou spojená papilární vrstvou. Podkožní vazivo je se škárou spojeno retikulární vrstvou a tato vrstva také ovlivňuje pevnost či tažnost dané usně. Useň je připravena určitými chemickými postupy ze surové kůže, která je zbavena chlupů, pokožky, podkožního vaziva a mezivlákněných bílkovin. Mezi poslední operace patří vyčištění a požadovaná úprava. Pomocí vyčiňujících látek se z holiny stává materiál, který je již využitelný – useň. Vyčiňující látky se používají pro zlepšení vlastností kůže a pro její zakonzervování. Zvyšuje se odolnost proti působením povětrnostních vlivů či mikroorganismů, lépe odolává chemikáliím či působení tepla. Useň tak získává požadované fyzikálně mechanické vlastnosti. Dalšími úpravami se poté dosahují potřebné užitné a estetické vlastnosti. Oproti běžným materiálům se useň vyznačuje hygienickými vlastnostmi, což je odůvodněné přírodní povahou tohoto specifického materiálu.

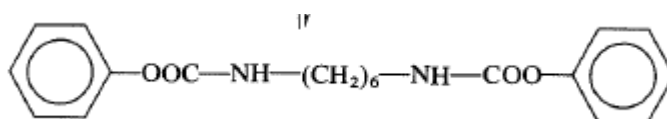
Useň se dle použitých surovin dělí na hověziny, teletiny, koziny, koniny, jehnětiny, vepřovice, divočiny a další. Na vyčištění kůže se v zásadě používají dva typy látek - anorganické a organické. V případě anorganických vyčiňujících látek se využívá nejčastěji sloučenin trojmocného chromu – chromočinění. Mezi organické vyčiňující látky patří syntetické či

přírodní třísloviny jako jsou např. rybí tuky. Postup se poté nazývá třísločinění. Činěním dochází v kůži jednak k difúzi činicích látek do struktury kůže a k chemické reakci mezi činicími látkami a kožními vlákny. Useň nachází své nezastupitelné místo v celém spektru uplatnění, ale její požití je především v oděvním a obuvním průmyslu. V případě hasičských zásahových rukavic se používají lícové a štípané hověziny, teletiny či koziny jako vrchní vrstva rukavice. Zde je ceněna vysoká tepelná odolnost usně, avšak při dlouhodobém působení vysokých teplot dochází k výraznému smrštění. [12]

### 1.12.1.2 Materiály použité na membrány

#### Polyuretan

Polyuretan patří mezi polymery, které vznikají polyadicí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy. Uretany, tedy estery kyseliny karbamové vznikají reakcí isokyanátů s alkoholy. Výhoda polyuretanu je v odolnosti vůči oděru, vodě a celkově odolnosti vůči rozpouštědlům. Polyuretan s tvarovou pamětí, neboli elastomer vzniká, pokud struktura obsahuje segmenty měkkých a tvrdých bloků, přičemž spojení mezi těmito bloky je zajištěno pomocí uretanové vazby. Ke snížení vlastností polyuretanu dojde v případě, že materiál je vystaven tak nízké teplotě, jako je jeho teplota skelného přechodu (kolem  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tehdy dojde ke zmatelnému snížení modulu pružnosti a pohyblivosti měkkých bloků, což v důsledku znamená zvýšení propustnosti pro vzduch a vodní páry. Jako izolace se využívá pěnový polyuretan, který je znám pod obchodním názvem molitan. V hasičských zásahových rukavicích nachází uplatnění u 3. vrstvy, membrány, která chrání ruce, před chemikáliemi a bakteriemi a přitom propouští vodní páry a odvádí vodu. [7, 9]

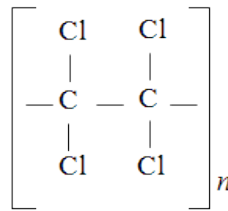


Obr. 27 – Strukturální vzorec polyuretanu [9]

#### PTFE

Polytetrafluorethylen vzniká adicí tetrafluorethylenu a jeho struktura je tvořena nerozvětveným uhlíkovým řetězcem  $\text{---CF}_2\text{---CF}_2\text{---}$  a je téměř zcela krystalickou látkou. Jeho měrná hustota se pohybuje okolo  $2,2\text{ g/cm}^3$ . Mezi výhody patří odolnost vůči všem známým rozpouštědlům a zvláštností je nízká povrchová energie, což způsobuje, že PTFE není smáčitelný. Je nehořlavý a zdravotně nezávadný. Vynikající vlastnosti mají původ ve vazebné energii vazby C – F. PTFE je stálý při  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  se rozkládá a až při teplotě nad

500 °C hoří. V hasičské zásahové rukavici se často používá jako třetí vrstva a zde se také PTFE používá v kombinaci s polyuretanem. [7, 9]



Obr. 28 – Strukturní vzorec PTFE [30]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 2 ZKOUŠENÍ HASIČSKÝCH ZÁSAHOVÝCH RUKAVIC PROTI SÁLAVÉMU TEPLU

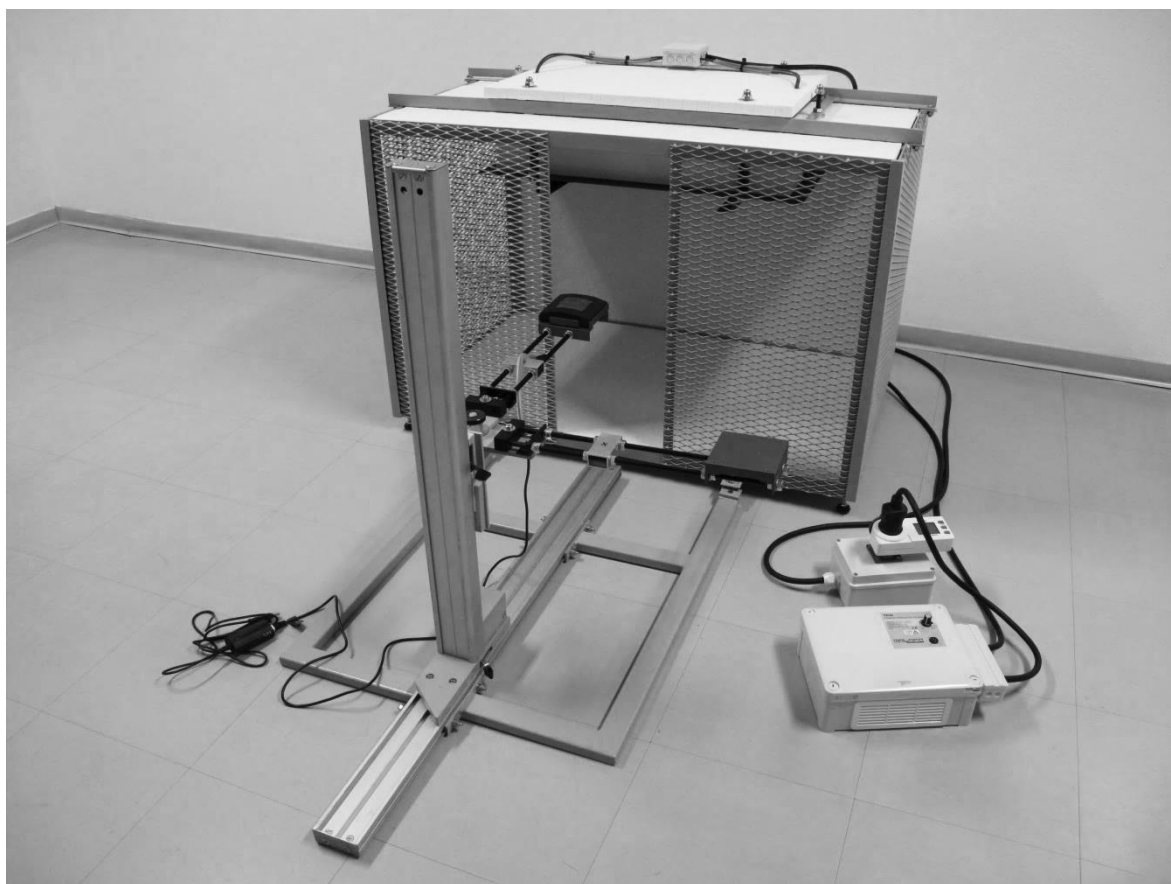
Na hasičskou zásahovou rukavici jsou kladeny velké nároky především týkající se odolnosti proti ohni a tepelnému toku – sálavému nebo kontaktnímu teplu dopadající na povrch rukavice. Nejsou to jediné požadavky. Také musí splňovat určitou mechanickou odolnost, ale tato práce se zabývá pouze tepelnou odolností těchto sendvičových materiálů.

Vlivem sálavého tepla a odolnost textilních materiálů, které se používají na výrobu hasičských zásahových rukavic, se zabývá norma ČSN EN ISO 6942 (83 2744) – *Ochranné oděvy – Ochrana proti teplu a ohni – Zkušební metoda: hodnocení materiálu a kombinací materiálů vystavených sálavému teplu.*

### 2.1 Zkušební zařízení a použité přístroje

#### 2.1.1 Zkušební zařízení

Zařízením na měření účinků sálavého tepla byla degradační pec opatřená zdrojem sálání, zkušebním rámem a držákem zkušebního vzorku, na který byl dle metody A umístěn vzorek a pro metodu B byl držák opatřen kalorimetrem a zařízením k měření a zaznamenávání teploty. Degradační pec byla zkonstruována na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, součásti Fakulty technologické, UTB ve Zlíně, dle požadavků normy ČSN EN ISO 6942. Některé konstrukční úpravy umožnily eliminaci některých součástí testovacího zařízení vyžadovaných normou, při zachování funkčnosti celého zařízení. [23]



Obr. 29 – Měřicí zařízení se všemi komponenty [36]

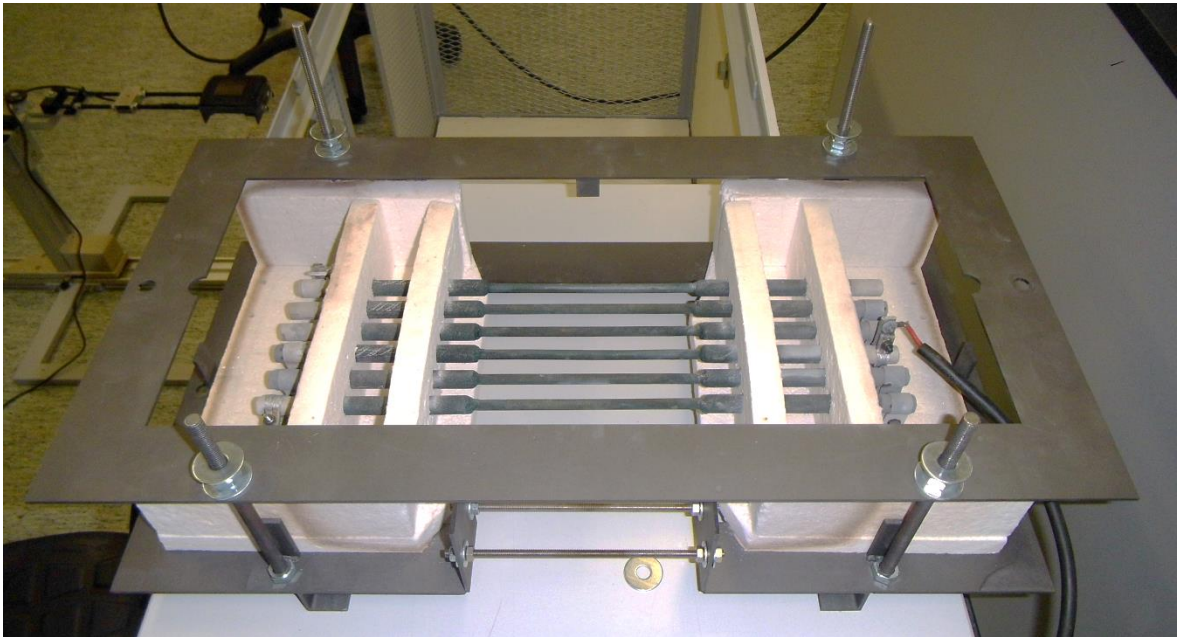
Degradační pec byla vybavena wattmetrem a regulátorem, pomocí něhož je možno nastavit požadovaný příkon.



Obr. 30 – Příklad měřicího aktuálního dodávaného příkonu s regulátorem

### 2.1.1.1 Zdroj sálání

Zdrojem sálání bylo šest siliciumkarbidových (SiC) topných tyčí, jejichž parametry byly dány citovanou normou. Celková délka tyčí byla  $(356\pm 2)$  mm, z toho topná část zaujímalala  $(178\pm 2)$  mm, přičemž průměr tyče činil  $(7,9\pm 0,1)$  mm. Topné tyče byly posuvně uloženy v rámu, jenž byl vyroben z izolačního nehořlavého materiálu. Z důvodu akumulace tepla byly odstraněny části, které měly nepříznivý vliv na kvalitu elektrického připojení.



Obr. 31 – Zdroj sálání

Topné tyče jsou uspořádány do dvou skupin po třech siliciumkarbidových topných tyčích zapojených v sérii, přičemž jsou tyto dvě skupiny paralelně zapojeny a připojeny k napájení 220 V. Připojení topných tyčí do obvodu je vzhledem k vysokým teplotám a značnému zahřívání z důvodu bezpečnosti provedeno tak, že tyče jsou spojeny hliníkovými pásy. Konstrukce držící topné tyče byla upravena tak, aby vzorky mohly být umístěny co nejbližší topných tyčích. Pro dosahování vyššího příkonu a s tím souvisejícího tepelného toku, byly v provozu pouze 3 topné tyče z celkových šesti. [23]

### 2.1.1.2 Držák zkušební vzorku

Držák zkušební vzorku se liší dle použité metody. Držák je vyroben z ocelového plechu, přičemž držák sloužící pro metodu A má širší bočnice, oproti držáku vzorku pro metodu B, jenž nese kalorimetr.

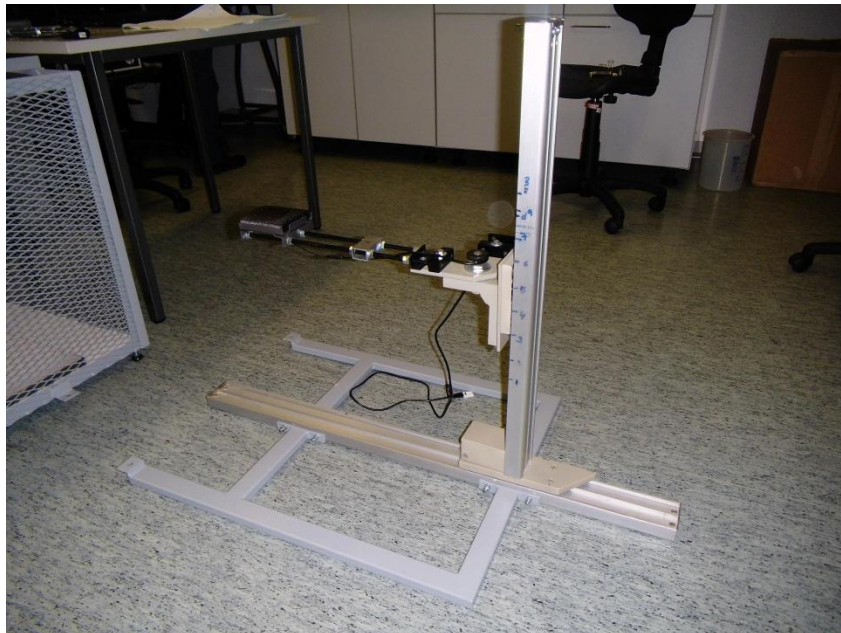


Obr. 32 – Držák zkušebních vzorků určený pro metodu A



Obr. 33 – Držák zkušebních vzorků určený pro metodu B

Držáky zkušebních vzorků jsou připevněny k nosné konstrukci, která je opatřena vodícími prvky pro pohyb držáku v ose x, sloužící pro zasunutí vzorku do topné části, a v ose y, čímž byla korigována vzdálenost držáku se vzorkem od topných tyčí. [23]

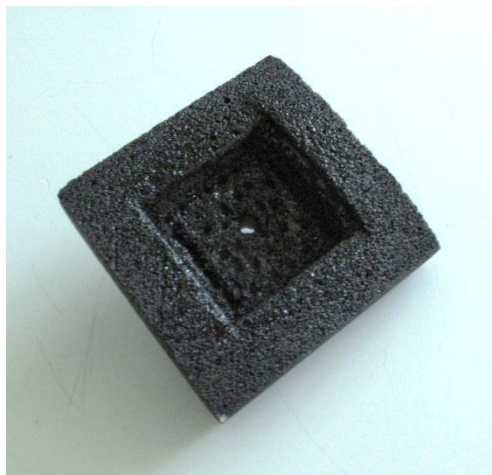


Obr. 34 – Držák zkušebních vzorků s kalorimetrem a nosnou konstrukcí

### 2.1.1.3 Kalorimetr

Kalorimetr je sestaven z měděného plechu, na který je ze zadní strany připevněno bodové odporové čidlo a z nosné desky, která je připevněna k držáku kalorimetru. Měděná obdélníková destička má tloušťku 1,6 mm a rozměry (50 x 50,3) mm.

Měděná destička s odporovým čidlem je zasazena do nosné desky, která je z nehořlavého tepelně izolačního materiálu. Přesné zhotovení a rozměry nosné desky kalorimetru jsou uvedeny v normě. [23]



*Obr. 35 – Základová nosná deska kalorimetru*

Kalorimetr byl opatřen vrstvou černé barvy, jejíž součinitel absorpce  $\alpha$  je větší než 0,9 z důvodu toho, že černá barva povrchu tělesa pohlcuje maximum tepelného toku 1.7.4.



*Obr. 36 – Základová nosná deska s kalorimetrem*

#### **2.1.1.4 Zařízení pro měření a zaznamenávání teploty**

Ke stanovení teploty bylo použito odporové bodové teplotní čidlo, které bylo propojeno prostřednictvím kabelu s počítačem a přes software byla zaznamenávána a vyhodnocována teplota kalorimetru. Odporové čidlo je možno použít do 150 °C a při teplotě 100 °C měří s přesností  $\pm 0,5$  °C. V normě je doporučeno (podle IEC 60584-1) použít termočlánek typu měď/konstantan, ale kalibrace ukázala, že oba typy měřidel měří stejně s minimální odchylkou, viz kapitola 3.1.

Data byla vyhodnocována pomocí počítače a v případě odporového čidla byl použit program Logger Lite, který umožňoval export dat do excelu. V případě zkušebního termočlánku byla teplota snímána teploměrem Voltcraft a zaznamenávána dataloggerem.

### 2.1.1.5 Pomocné přístroje

Pyrometr Testo 845 sloužil k bezdotykovému měření teploty silisiumkarbidových topných tyčí, přičemž teplota topných tyčí byla regulována dodávaným příkonem. Tyto bezkontaktní teploměry měří na principu vyzařování těles, jejich přesnost je však dosti malá. Odchyly měření se pohybují v řádech desítek °C. Tento typ dle výrobce měřil s přesností  $\pm 1$  °C při teplotách nad 100 °C, což nám stačilo, protože bylo třeba znát jen přibližnou teplotu. Teplotní rozsah činil od -35 °C do 1000 °C s rozlišením 0,1 °C.



Obr. 37 – Pyrometr Testo 845

Rozehřáté držáky a nástavce a samotný kalorimetr byl před každým měřením chlazen proudem stlačeného vzduchu za pomoci ofukovací pistole, tak aby bylo dosaženo teploty místnosti.



Obr. 38 – Ofukovací pistole

## 2.2 Stanovení měřených parametrů

### 2.2.1 Podmínky měření

Vzorky určené k měření byly klimatizovány v prostředí o teplotě  $(20 \pm 2)$  °C a při relativní vlhkosti  $(65 \pm 2)$  %. Zkoušené materiály byly testovány v prostředí, ve kterém neproudí vzduch, jenž by měření zásadně ovlivňoval. V místnosti se zkušebním zařízením se teplota pohybovala v rozmezí od 15 do 25 °C, přičemž samotný kalorimetr musí být před každým měřením ochlazen na teplotu místnosti s tolerancí 2 °C.

Úrovně hustoty tepelného toku dopadajícího na materiál stanovuje norma.

- Nízké úrovně – 5 a 10 kW/m<sup>2</sup>
- Střední úrovně – 20 a 40 kW/m<sup>2</sup>
- Vysoká úroveň – 80 kW/m<sup>2</sup>

Pro samotné zkoušení je možno si zvolit jakoukoliv úroveň hustoty dopadajícího tepelného toku. [23]

### 2.2.2 Kalibrace zdroje sálání

Před samotným měřením byla provedena kalibrace zdroje sálání. Cílem bylo zjistit výkon zdroje sálání a určit vzdálenost kalorimetru od zdroje sálání tak, aby byl dosažen požadovaný tepelný tok 10, 20 a 30 kW/m<sup>2</sup>.



Byl zaznamenáván nárůst teploty o 30 °C, přičemž měl být lineární, konstantní. Míra nárůstu teploty byla určována ze směrnice křivky závislosti teploty na čase a hustota dopadajícího tepelného toku  $Q_0$  byla počítána z následující rovnice:

$$Q_0 = \frac{M \cdot C_p \cdot R}{A \cdot \alpha} \quad [W / m^2] \quad (28)$$

Kde  $m$  – hmotnost měděné destičky [kg]

$C_p$  – měrné teplo mědi [kJ/kg°C]

$R$  – nárůst teploty kalorimetru [°C/s]

$A$  – plocha měděné destičky [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  – součinitel absorpce povrchu kalorimetru [-]

Požadovaná hustota tepelného toku byla docílena změnou vzdálenosti kalorimetru od zdroje sálání a ta má dosahovat požadované hodnoty s tolerancí 2 %. [23]

### 2.2.3 Zkouška A

Norma zahrnuje dva způsoby, které popisují a hodnotí účinky sálavého tepla na daný vzorek, přičemž metoda A a B nejsou na sobě nijak závislé. První je subjektivní metoda, kdy byla hodnocena celková degradace vzorku, změna barvy, ožehnutí, zuhelnatění, ztvrdnutí či zkřehnutí povrchu vzorku. Zkušební vzorky mají rozměry (230 x 80) mm 20 mm, přičemž jsou odebírány z lícové strany. Vzorek byl upevněn na držák a byl udržován v napnutém stavu závažím, které vyvozuje tahovou sílu 2N.



Obr. 39 – Upínací spona se závažím

Vyhodnocení vzorku je čistě subjektivní, přičemž byla zaznamenávána jakákoliv změna již změna barevného odstínu, ztvrdnutí, ožehnutí, zuhelnatění povrchu, přetržení, roztavení, přetržení a v případě vícevrstvých materiálů byla zkoumána každá vrstva.

#### 2.2.4 Zkouška B

I v tomto případě byl vzorek napínán závažím vyvolující sílu 2N. Zkušební vzorky měly taktéž rozměry (230 x 80) mm. Vzorky mají být odebrány z lícové strany, vnější vrstvy materiálu 20 mm od okrajů.

Tato metoda je založena čistě na experimentálním měření, kdy se měří čas za který musí teplota vzrůst o 12°C, respektive 24°C. Pro správné vyhodnocení by měla teplota při jednotlivých měření vzrůst minimálně o 30 °C.

Tab. 3 – Úrovně (třída) provedení pro radiační (sálavé) teplo [25]

Úroveň (třída) provedení	Přestup tepla $t_{24}$ [s]
1	$\geq 7$
2	$\geq 20$
3	$\geq 50$
4	$\geq 95$

Úroveň provedení pro sálavé (radiační) teplo je odvislá od předepsané vyžadující třídy bezpečnosti ochranných prostředků. Obecně by neměl index přestupu sálavého tepla ( $t_{24}$ ) klesnout pod 20 s.

Vyhodnocuje se čas, za který vzroste teplota o 12 ( $\pm 0,1$ ) °C –  $t_{12}$ , respektive o 24 ( $\pm 0,2$ ) °C –  $t_{24}$ . Dle příslušné normy se vypočítá rozdíl. Dále byla dle následujícího vztahu určena hodnota hustoty prostupujícího tepelného toku  $Q_c$ :

$$Q_c = \frac{M \cdot C_p \cdot 12}{A \cdot (t_{24} - t_{12})} \left[ W / m^2 \right] \quad (29)$$

Kde  $M$  – hmotnost měděné destičky [kg]

$C_p$  – měrné teplo mědi [kJ/kg°C]

$12/(t_{24}-t_{12})$  – míra nárůstu teploty kalorimetru mezi 12 °C a 24 °C [°C]

$A$  – plocha měděné destičky [m<sup>2</sup>]

Také byl stanoven tzv. součinitel prostupu tepla  $TF(Q_0)$  pro příslušnou hustotu dopadajícího tepelného toku  $Q_0$ :

$$TF(Q_0) = \frac{Q_c}{Q_0} [-] \quad (30)$$

V poslední řadě byl stanoven tzv. index přestupu sálavého tepla  $RHTI(Q_0)$ . Čas, který je potřeba k nárůstu teploty o  $(24 \pm 0,2)$  °C. Jednotlivé časy  $t_{24}$  se zprůměrují a zaokrouhlí na desetinu sekundy. [23]

## 2.3 Zkoušené materiály

Měřením prostupu tepelného toku bylo podrobena celkem dvanáct jednotlivých vrstev, které byly různě kombinovány do skladeb.

### 2.3.1 Jednotlivé vrstvy

#### 2.3.1.1 Vrchní vrstva

Z vrchových materiálů rukavic byla testována hovězinová useň lícová, která se používá jako vrchní vrstva na hřbetě i v dlani rukavic. Tloušťka se pohybovala v rozmezí 0,9 až 1,1 mm. Useň je opatřena WR úpravou, která zajišťuje rukavici odolnost proti vodě a FR úprava zvyšující odolnost usně proti ohni.



Obr. 40 – Hovězinová lícová useň

Štípaná hovězinová useň měla obdobné parametry, odlišnost spočívá v úpravě povrchu seštipnutím vrchní části usně a rozdílnou povrchovou úpravou. [29]



*Obr. 41 – Hovězinová štípaná useň*

Další z materiálů používaných ve vrchní vrstvě, jež byly testovány na prostup sálavého tepla je aramidový úplet se silikonovým zátěrem, který se používá především v dlaňové části rukavic. Přibližná gramáž je 530 g/m<sup>2</sup>.



*Obr. 42 – Aramidová úplet se silikonovým zátěrem – lícová a rubová strana*

Alternativně používaným materiálem je úplet ze směsi polyamidu a aramidu, taktéž se silikonovým zátěrem. Jeho gramáž je vyšší – 620g/m<sup>2</sup> [29]



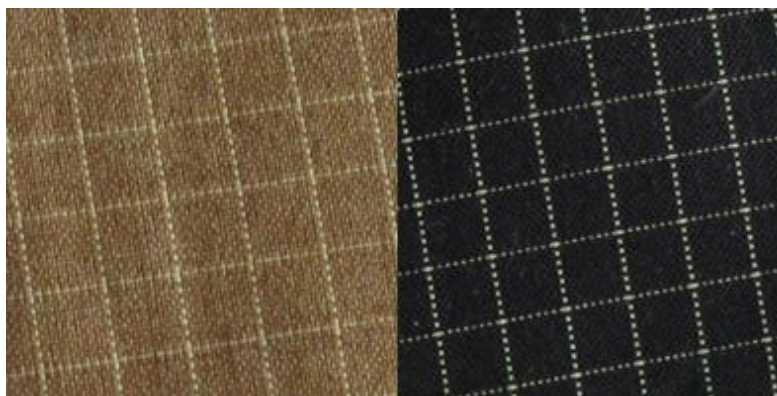
*Obr. 43 – Pletenina ze směsi aramidu a PAD se silikonovým povrstvením – lícová a rubová strana*

Nomex, který byl vyvinut již v 60. letech 19. století byl testován ve dvou variantách. Odlišnost variant spočívá v zátěru na rubu tkaniny. V případě Nomex Delta TA je použit PVC zátěr, na rubu Nomex Outershell Tough je nános silikonu. Oba typy se používají na hřbetové části rukavic.



*Obr. 44 – Nomex*

Posledním vrchovým materiálem byl PBI. Ten byl testován ve dvou variantách. Světlý typ v béžové barvě, jenž byl z rubu opatřen silikonovým zátěrem. Druhý byl v černé barvě, ale bez nánosů silikonu z rubu. [29]



*Obr. 45 – PBI – světlý a tmavý typ*

### **2.3.1.2 Mezivrstva**

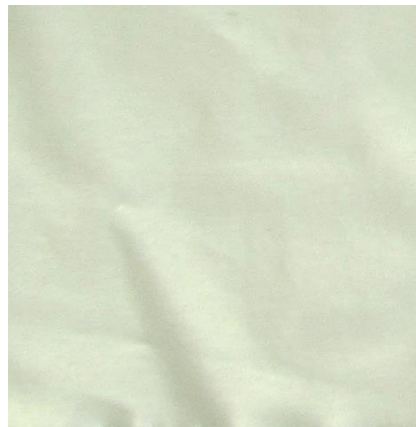
Mezivrstvou neboli druhou vrstvou rukavic je netkaná aramidová textilie. Je vyrobena z Kevlaru a Nomexu v poměru 50:50. Tato vrstva plní izolační funkci a její gramáž se pohybuje okolo 75 g/m<sup>2</sup>.



*Obr. 46 – Netkaná aramidová textilie*

### **2.3.1.3 Membrána**

Třetí vrstvou hasičských zásahových rukavic je membrána, která jako jediná vrstva neplní tepelně izolační funkci, ale pouze zaručuje propustnost vodních par a odolnost proti průniku vody do rukavice. Obchodní název této polyuretanové membrány je P540.



*Obr. 47 – PUR membrána*

### **2.3.1.4 Podšívka**

V případě podšívek, což jsou vrstvy nejbližší lidské pokožce, se měření uskutečnilo na dvou rozdílných typech. Prvním typem byla aramidová podšívka J1063, vyrobená ze směsi Twaronu a Kevlaru. Gramáž této vrstvy činila 290 g/m<sup>2</sup>.



*Obr. 48 – Armaidová podšívka – lícová a rubová strana*

Druhým typem byla Kevlarová podšívka s obchodním názvem IMC-300 a gramáží 200 g/m<sup>2</sup>. Rozdíl mezi oběma podšívkami byl v gramáži a celkové houževnatosti. [29]



*Obr. 49 – Kevlarová podšívka*

Při testování se pro jednoduchost a přehlednost vrstvy označili následovně:

Tab. 4 – Označení použitých typů materiálů

Vrstva	Materiál
Vrstva 1	Hověžinová lícová useň
Vrstva 2	Hověžinová štípaná useň
Vrstva 3	Aramid+Si
Vrstva 4	Nomex Delta TA
Vrstva 5	Aramidová podšívka
Vrstva 6	Netkaná aramidová textilie
Vrstva 7	PUR membrána
Vrstva 8	Aramid+PAD+Si
Vrstva 9	Nomex Outershell Tough
Vrstva 10	PBI světlý + Si
Vrstva 11	PBI tmavý
Vrstva 12	Kevlarová podšívka

### 2.3.2 Skladby

Ze skladeb bylo proměřeno 29 různých kompozicí, ať již se čtyřmi nebo méně vrstvami. Pro společnost Holík International s.r.o. sídlící ve Štípně u Zlína bylo testováno 10 zcela nových kompozicí sloužící na různé typy rukavic. Skladby byly pro jednoduchost a srozumitelnost označeny písmeny nebo čísly.



Tab. 5 – Skladby HZR

	Skladba	Vrchní vrstva	Mezivrstva	Membrána	Podšívka
<b>Hřbetové skladby</b>	<b>A</b>	Hověžinová lícovka	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>B</b>	Hověžinová lícovka	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. Podšívka
	<b>C</b>	Hověžinová štípenka	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>D</b>	Hověžinová štípenka	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka
	<b>E</b>	Aramid+Si	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>F</b>	Aramid+Si	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka
	<b>G</b>	Aramid+PAD+Si	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>H</b>	Aramid+PAD+Si	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka
	<b>CH</b>	Nomex Delta TA	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>I</b>	Nomex Delta TA	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka
	<b>J</b>	Nomex Outershell T.	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>K</b>	Nomex Outershell T.	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka
	<b>L</b>	PBI světlý + Si zátěr	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>M</b>	PBI světlý + Si zátěr	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka
	<b>N</b>	PBI tmavý	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
<b>O</b>	PBI tmavý	Netk. text. Kr-No	PUR membrána	Kevlar. podšívka	
<b>Dlaňové skladby</b>	<b>R</b>	Hověžinová štípenka	-	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>S</b>	Hověžinová lícová	-	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>T</b>	Aramid+Si	-	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
	<b>U</b>	Aramid+PAD+Si	-	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063

Tab. 6 – Materiálové sendviče HZR od fy Holik International

Sendvič	Vrchní vrstva	Mezivrstva	3. vrstva	Podšívka
I	Aramid+Si	Vlněná plst 2 mm	3D oranžový	Nomex
II	Aramid+Si	Vlněná plst 2 mm	5 mm antishock KLUTH	Nomex
III	Aramid+Si	Vlněná plst 2 mm	5 mm Neopren	Nomex
IV	Aramid+Si	Vlněná plst 2 mm perf.	5 mm antishock KLUTH	Nomex
V	PBO Europrotect	75 netkanka	PTFE	JT Armaid Tournier
VI	Twin System Twill	75 netkanka	PTFE	JT Armaid Tournier
VII	Nomex	75 netkanka	PTFE	JT Armaid Tournier
VIII	PBO Europrotect	75 netkanka	PUR membrána	JT Armaid Tournier
IX	Twin System Twill	75 netkanka	PUR membrána	JT Armaid Tournier
X	Nomex	75 netkanka	PUR membrána	JT Armaid Tournier

Tab. 7 – Zkušební kompozice HZR

Kompozice	Vrchní vrstva	Mezivrstva	Membrána	Podšívka
I	Hovězonová lícovka	-	-	Aramid. podšívka J1063
II	Hovězinová štípenka	-	-	Aramid. podšívka J1063
III	Nomex Delta TA	-	-	Aramid. podšívka J1063
IV	Nomex Delta TA	-	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
V	Aramid+Si	Hovězinová lícovka	-	-
VI	Aramid+Si	Hovězinová lícovka	PUR membrána	Aramid. podšívka J1063
VII	PBO Europrotect	-	-	Aramid. podšívka J1063

### 3 VÝSLEDKY

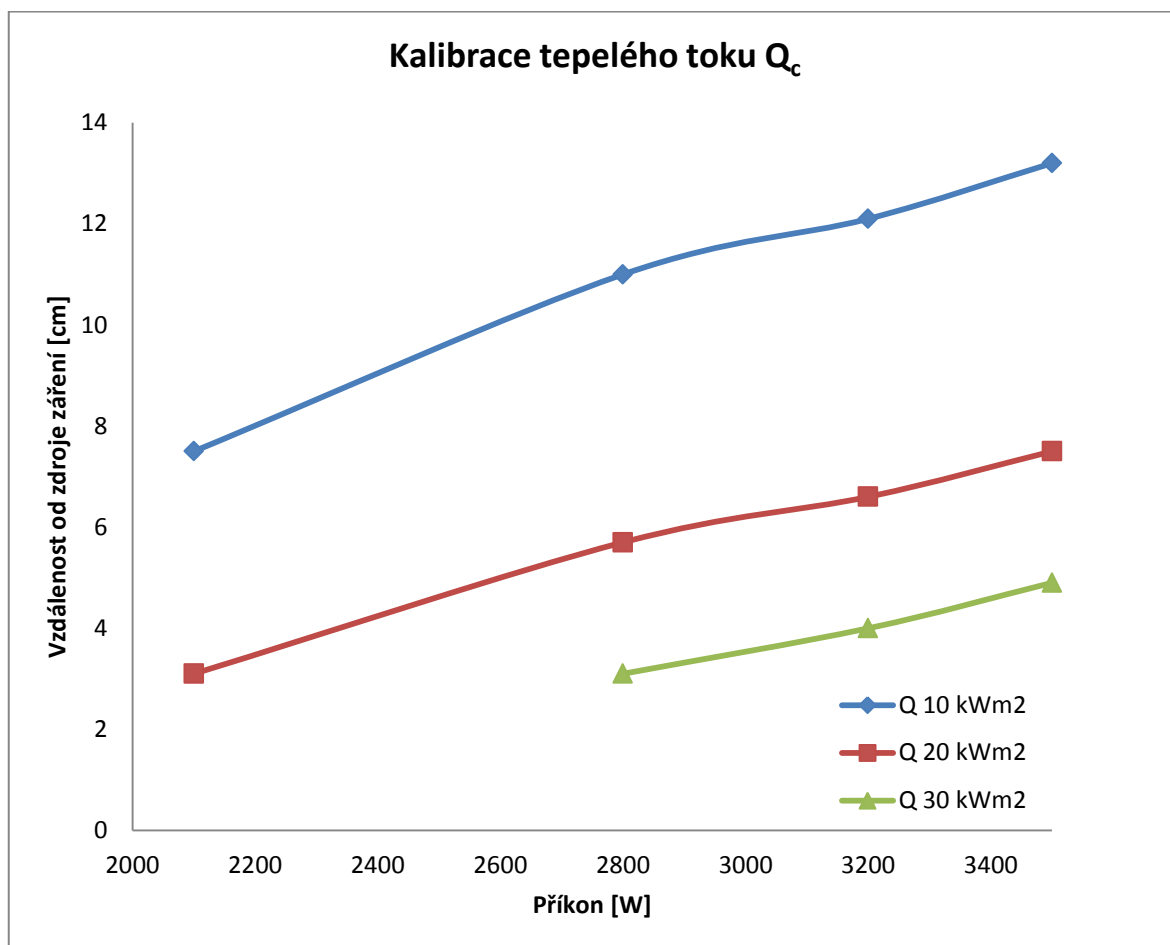
#### 3.1 Kalibrace tepelného toku

Před samotným měřením prostupu sálavého tepla jednotlivými vrstvami a skladbami byla provedena kalibrace zdroje záření na požadované teplené toky 10, 20 a 30 kW/m<sup>2</sup>. Kalibrace byla prováděna pomocí odporového teplotního čidla. Tepelný toku při kalibraci byl poté vypočten podle rovnice (28).

Hmotnost měděné destičky  $M$  je 0,036 kg, měrné teplo mědi  $C_p$  je 0,385 kJ/kg°C, nárůst teploty  $R$  při jednotlivých měřeních tepelného toku je uveden v tabulce č. 8, plocha měděné destičky  $A$  byla 50 mm x 50,3 mm uváděna v m<sup>2</sup> a součinitel absorpce povrchu kalorimetru je 0,95.

Tab. 8 – Kalibrace tepelného toku

Požadovaný tepelný tok $Q$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Příkon $P$ [W]	Přibližná teplota topných tyčí $T_z$ [°C]	Vzdálenost od zdroje [cm]	Nárůst teploty kalorimetru $R$ [°C/s]	Skutečný tepelný tok $Q_0$ [kW/m <sup>2</sup> ]
10	2100	800	7,5	1,84	10,67
	2800	900	11,0	1,80	10,44
	3200	1000	12,1	1,82	10,56
	3500	1000+	13,2	1,85	10,73
20	2100	800	3,1	3,65	21,17
	2800	900	5,7	3,49	20,25
	3200	1000	6,6	3,89	22,57
	3500	1000+	7,5	3,56	20,65
30	-	-	-	-	-
	2800	900	3,1	5,52	32,02
	3200	1000	4,0	5,48	31,79
	3500	1000+	4,9	5,63	32,66

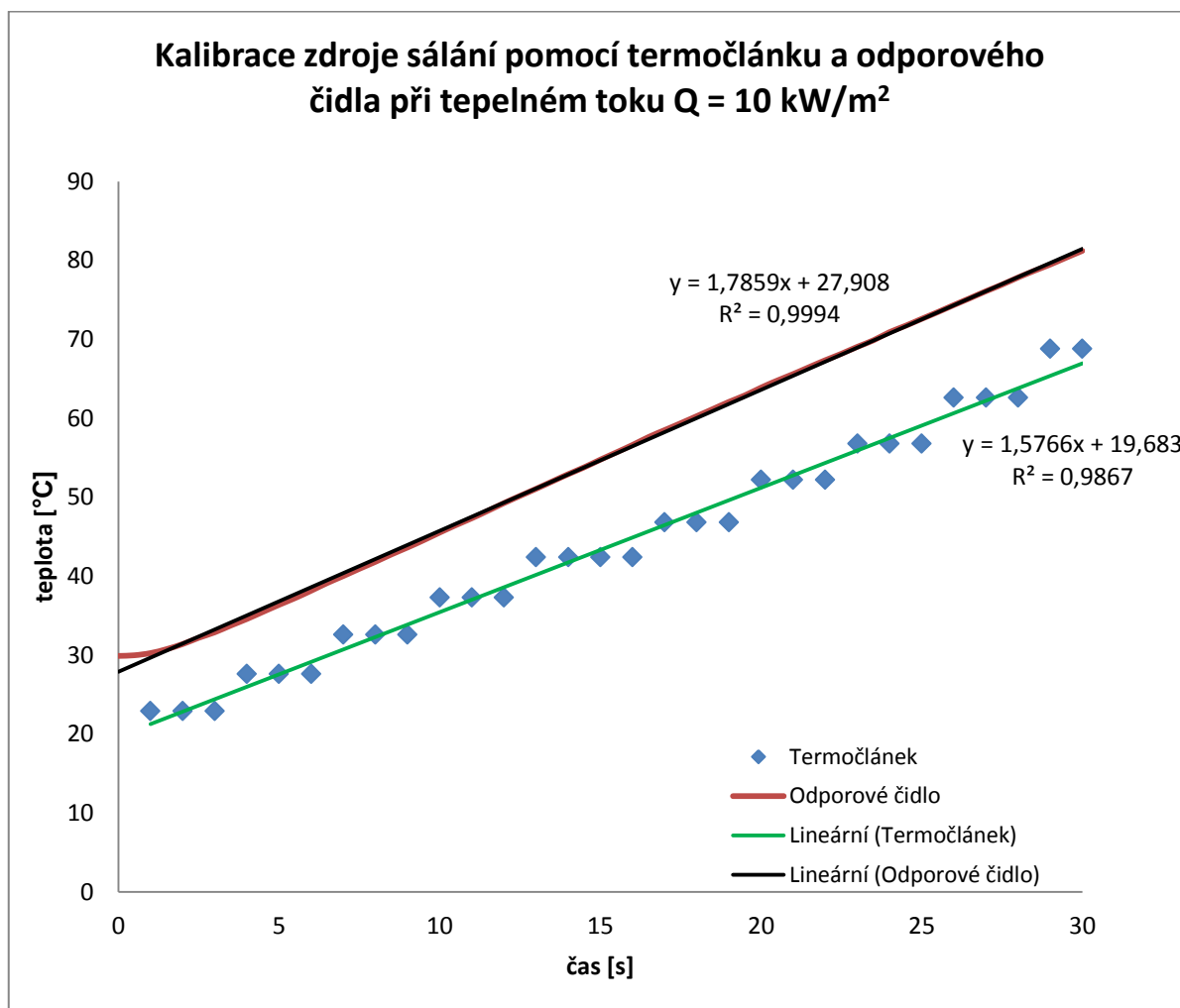


Obr. 50 – Graf kalibrace tepelného toku

Kalibrační křivky požadovaného tepelného toku 10, 20 a 30 kW/m<sup>2</sup> byly sestaveny v závislosti na dodávaném příkonu, který ovlivňoval teplotu topných tyčí, a vzdálenosti kalorimetru od zdroje záření. Z obrázku č. 50 je zřejmé, že kalibrační křivky jsou si navzájem podobné a tak lze usoudit, že zdroj záření vykazuje v závislosti na přiváděném příkonu velmi podobný tepelný výkon.

V normě ČSN ISO 6942 je jako prostředek k měření teploty uváděn termočlánek měď/konstantan, avšak v našem případě bylo pro měření tepelného toku použito odporové čidlo.

V následujícím grafu je uvedeno srovnání termočlátku a odporového čidla při podobné hladině tepelného toku.



Obr. 51 – Graf kalibrace zdroje sálání termočlánekem a odporovým čidlem

Z obrázku č. 51 lze vyčíst, že nárůst teploty při tepelném toku  $10 \text{ kW/m}^2$  je v případě odporového čidla velmi podobný míře nárůstu teploty měřené termočlánekem. Míra nárůstu teploty měřená termočlánekem vykazuje skokový charakter, což bylo dáno nízkou vzorkovací frekvencí použitého dataloggeru.

### 3.2 Testování odolnosti vrstev a skladeb proti sálavému teplu

Měření probíhalo v opačném pořadí, než jak je uvedeno v normě. Nejprve se hodnotily tepelné vlastnosti materiálů podle metody B. Dle normy byly vybrané vrstvy a skladby testovány na prostup tepla a byla vyhodnocována hustota prostupujícího tepelného toku  $Q_c$ , hodnoty součinitele prostupu tepla  $TF(Q_0)$ , jednotlivé časy  $t_{12}$  a  $t_{24}$  udávající čas potřebný k nárůstu teploty o  $12^\circ\text{C}$  a  $24^\circ\text{C}$  a rozdíl mezi nimi. Posledním stanoveným parametrem je index přestupu sálavého tepla  $RHTI(Q_0)$ . Při testování vrstev a skladeb byla teplota místnosti na úrovni  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  a na stejnou teplotu byl chlazen kalorimetr. Relativní vlhkost

v místnosti nepřesáhla 65%, teplota vzduchu, kde byly vzorky kondicionovány, nepřesáhla teplotu 22 °C. Všechny potřebné vztahy byly uvedeny v kapitole 2.2.4 popisující vyhodnocení metody B podle normy ČSN ISO 6942.

Testování bylo uskutečněno pomocí držáku s kalorimetrem a to tak, že vzorek byl upnut na držák, který byl ochlazen na teplotu místnosti, a zatížen závažím, vyvíjejícím sílu 2N. Poté byl vzorek i s držákem zasunut do tepelně degrační pece a byla sledována teplota. Měření bylo u konce, vzrostla-li teplota o 30°C.

### 3.2.1 Jednotlivé vrstvy

Všechny popsané měřené veličiny byly testovány v rámci metody B popsané v příslušné normě pomocí kalorimetru při hustotě tepelného toku  $Q = 10 \text{ kW/m}^2$ , dodávaném příkonu 3200 W, teplota topných tyčí činila 1000°C a vzdálenost kalorimetru se vzorkem od zdroje sálání bylo 12,1 cm. Při těchto parametrech bylo dosaženo stabilních a vyrovnaných tepelných toků a příslušných výsledných časů. Navíc nedocházelo k přetěžování tepelně degrační pece.

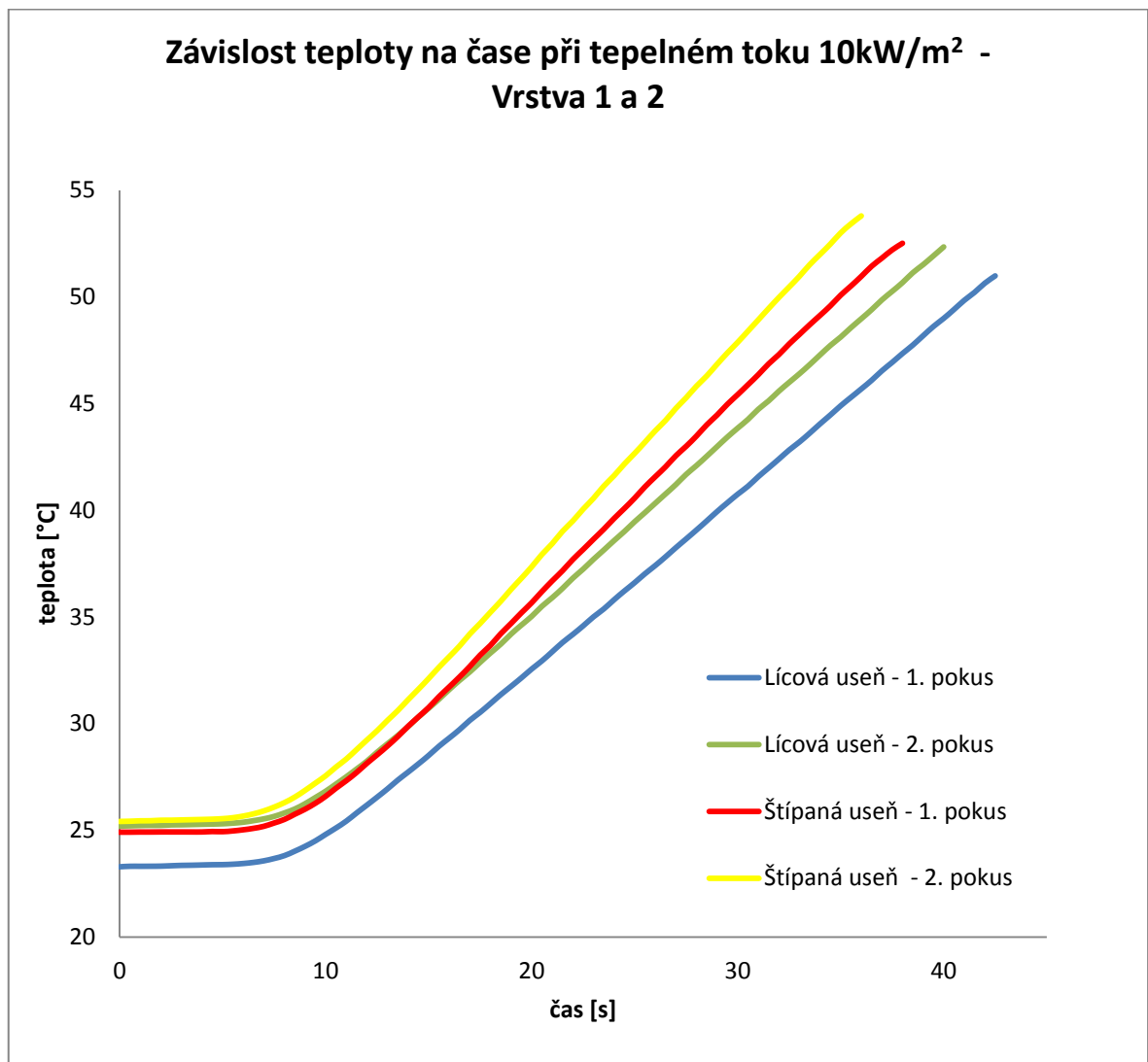
Tab. 9 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla jednotlivých vrstev

Vrstva	Nárůst teploty $R_1$ [°C/s]	Nárůst teploty $R_2$ [°C/s]	Průměrná hodnota $R$ [°C/s]	Směrodatná odchylka [°C/s]	Prostupující tepelný tok $Q_c$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Součinitel prostupu tepla $TF(Q_0)$
1	0,794	0,830	0,812	0,018	4,47	0,45
2	0,928	0,979	0,954	0,026	5,25	0,53
3	0,854	0,874	0,864	0,010	4,76	0,48
4	1,387	1,390	1,389	0,001	7,65	0,77
5	0,738	0,743	0,741	0,003	4,08	0,41
6	1,040	1,135	1,088	0,048	5,99	0,60
7	1,560	1,564	1,562	0,002	8,61	0,86
8	0,787	0,874	0,831	0,044	4,58	0,46
9	1,338	1,338	1,338	0,000	7,37	0,74
10	1,108	1,084	1,096	0,012	6,04	0,60
11	1,289	1,309	1,299	0,010	7,16	0,72
12	0,992	1,043	1,018	0,026	5,61	0,56

RHTI, neboli index přestupu sálavého tepla je průměrná hodnota  $t_{24}$ , kterou lze pozorovat v následující tabulce:

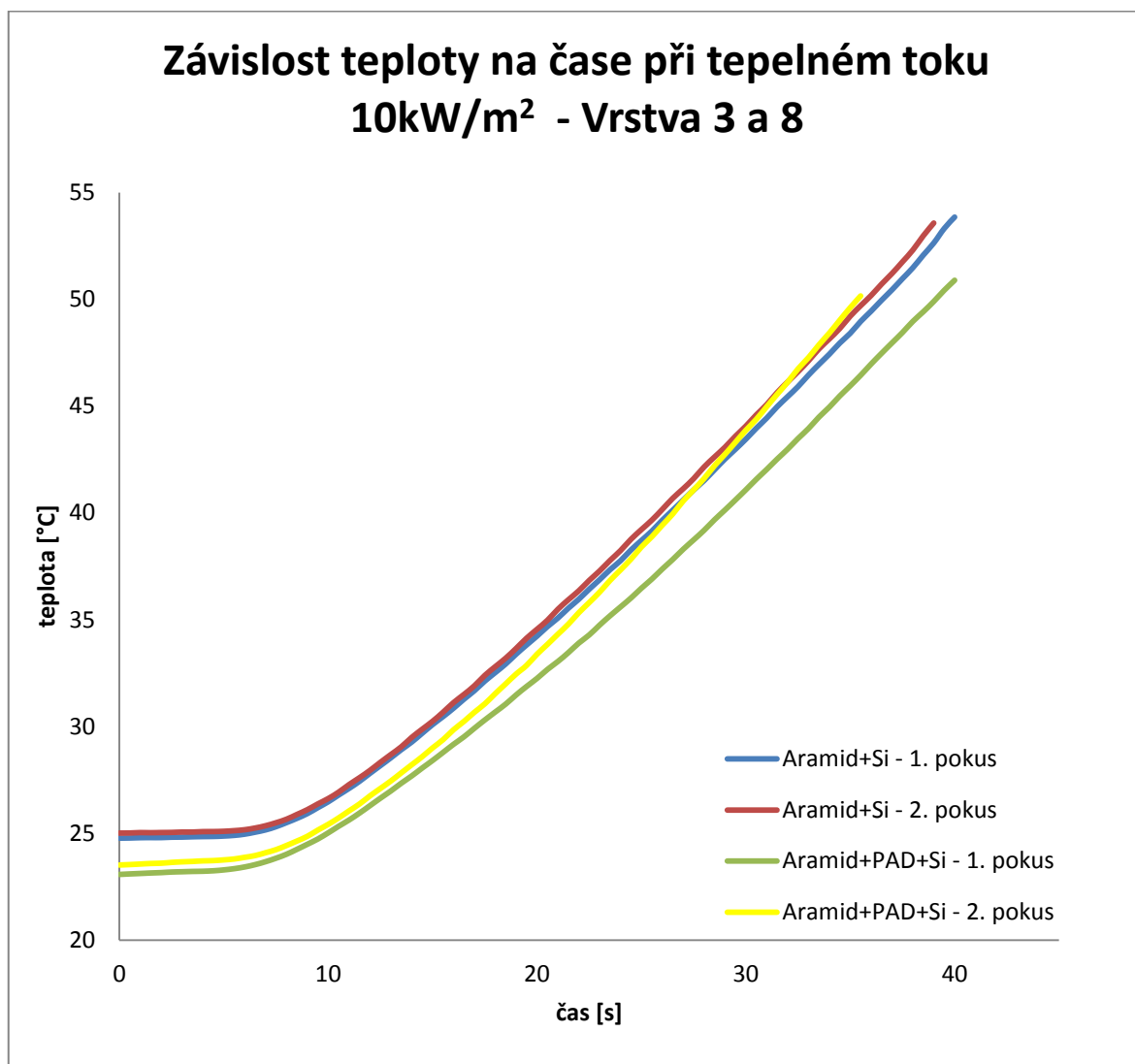
Tab. 10 – Hodnoty časů  $t_{12}$ ,  $t_{24}$  a  $\Delta t$  jednotlivých vrstev hasičských zásahových rukavic

Vrstva	$t_{12}$ [s]				$t_{24}$ [s]				$\Delta t$ [s]			
	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka
<b>1</b>	17,5	17,5	<b>17,5</b>	<b>0,0</b>	32,0	31,5	<b>31,8</b>	<b>0,3</b>	14,5	14,0	<b>14,3</b>	<b>0,3</b>
<b>2</b>	15,5	15,0	<b>15,3</b>	<b>0,3</b>	28,0	26,5	<b>27,3</b>	<b>0,8</b>	12,5	11,5	<b>12,0</b>	<b>0,5</b>
<b>3</b>	17,0	17,0	<b>17,0</b>	<b>0,0</b>	29,5	29,0	<b>29,3</b>	<b>0,3</b>	12,5	12,0	<b>12,3</b>	<b>0,3</b>
<b>4</b>	10,5	11,0	<b>10,8</b>	<b>0,3</b>	18,5	18,5	<b>18,5</b>	<b>0,0</b>	8,0	7,5	<b>7,8</b>	<b>0,3</b>
<b>5</b>	19,5	19,0	<b>19,3</b>	<b>0,3</b>	35,0	34,5	<b>34,8</b>	<b>0,3</b>	15,5	15,5	<b>15,5</b>	<b>0,0</b>
<b>6</b>	13,5	12,5	<b>13,0</b>	<b>0,5</b>	24,0	22,5	<b>23,3</b>	<b>0,8</b>	10,5	10,0	<b>10,3</b>	<b>0,3</b>
<b>7</b>	9,0	9,0	<b>9,0</b>	<b>0,0</b>	16,5	16,0	<b>16,3</b>	<b>0,0</b>	7,5	7,0	<b>7,3</b>	<b>0,3</b>
<b>8</b>	19,5	18,5	<b>19,0</b>	<b>0,5</b>	32,0	29,5	<b>30,8</b>	<b>1,3</b>	12,5	11,0	<b>11,8</b>	<b>0,8</b>
<b>9</b>	10,5	10,0	<b>10,3</b>	<b>0,3</b>	19,0	19,0	<b>19,0</b>	<b>0,0</b>	8,5	9,0	<b>8,8</b>	<b>0,3</b>
<b>10</b>	12,5	13,0	<b>12,8</b>	<b>0,3</b>	22,5	23,5	<b>23,0</b>	<b>0,5</b>	10,0	10,5	<b>10,3</b>	<b>0,3</b>
<b>11</b>	10,0	10,0	<b>10,0</b>	<b>0,0</b>	19,5	19,0	<b>19,3</b>	<b>0,3</b>	9,5	9,0	<b>9,3</b>	<b>0,3</b>
<b>12</b>	14,0	13,0	<b>13,5</b>	<b>0,5</b>	25,5	24,5	<b>25,0</b>	<b>0,5</b>	11,5	11,5	<b>11,5</b>	<b>0,0</b>

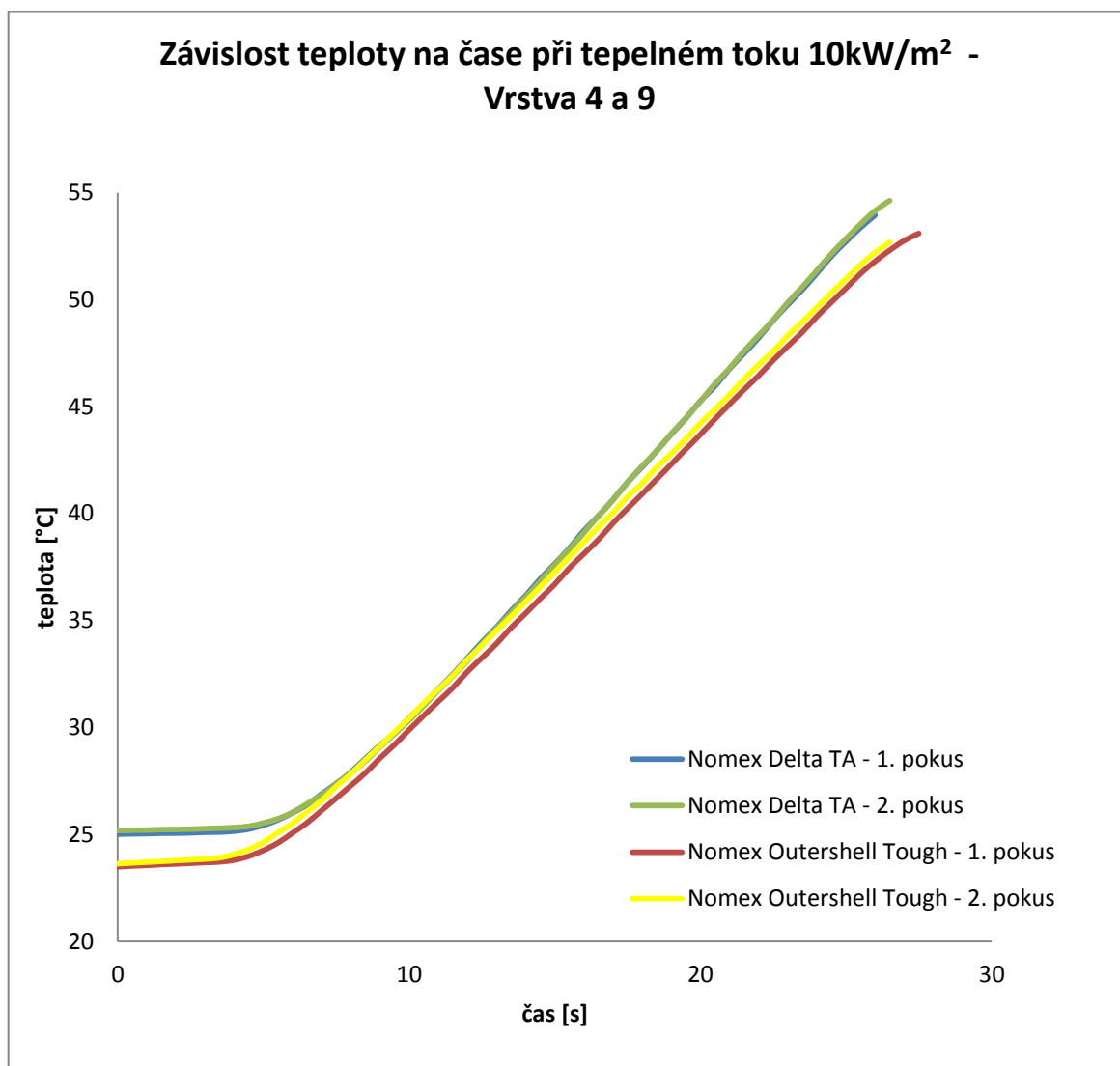


Obr. 52 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování hovězínových usní

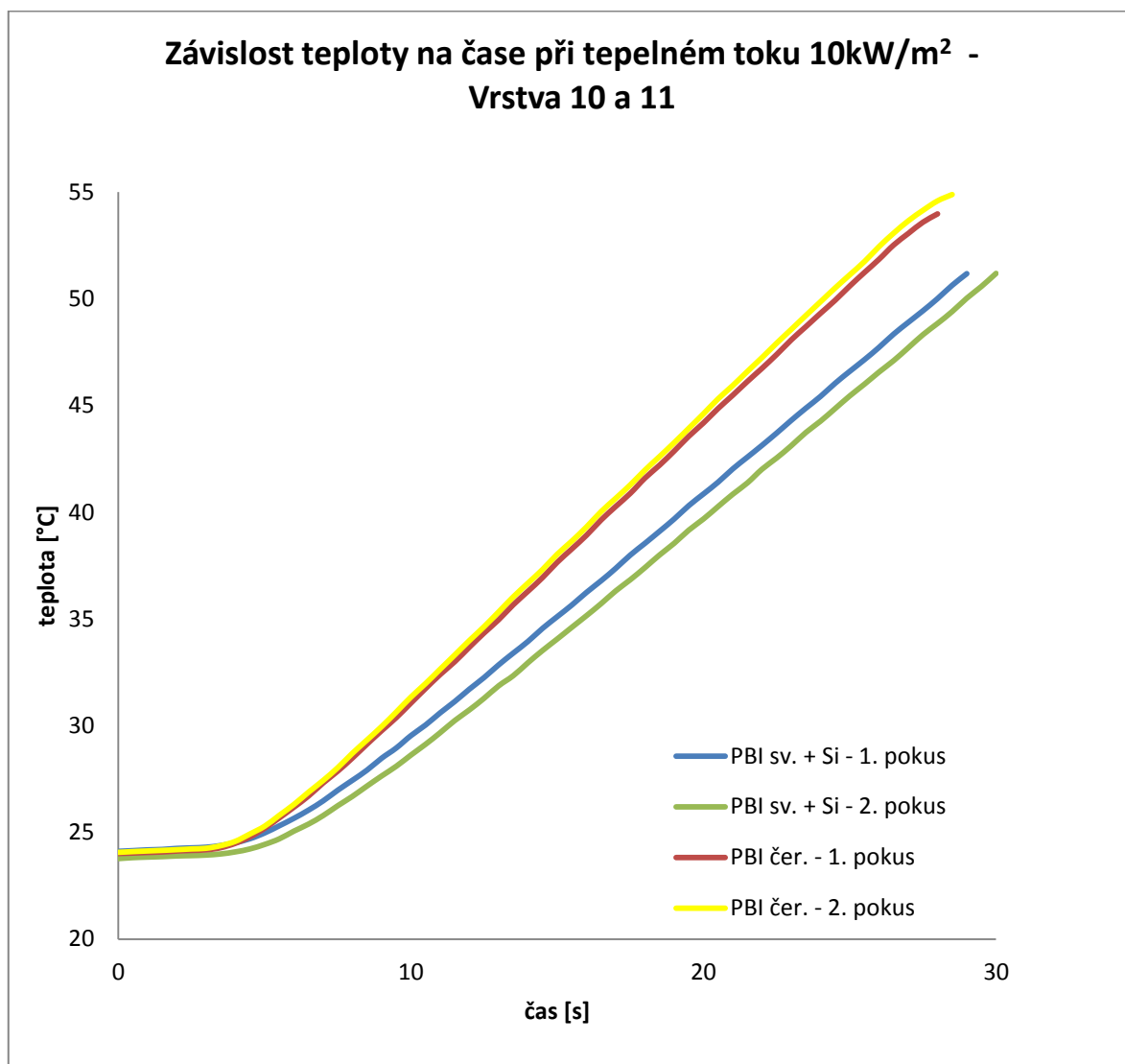




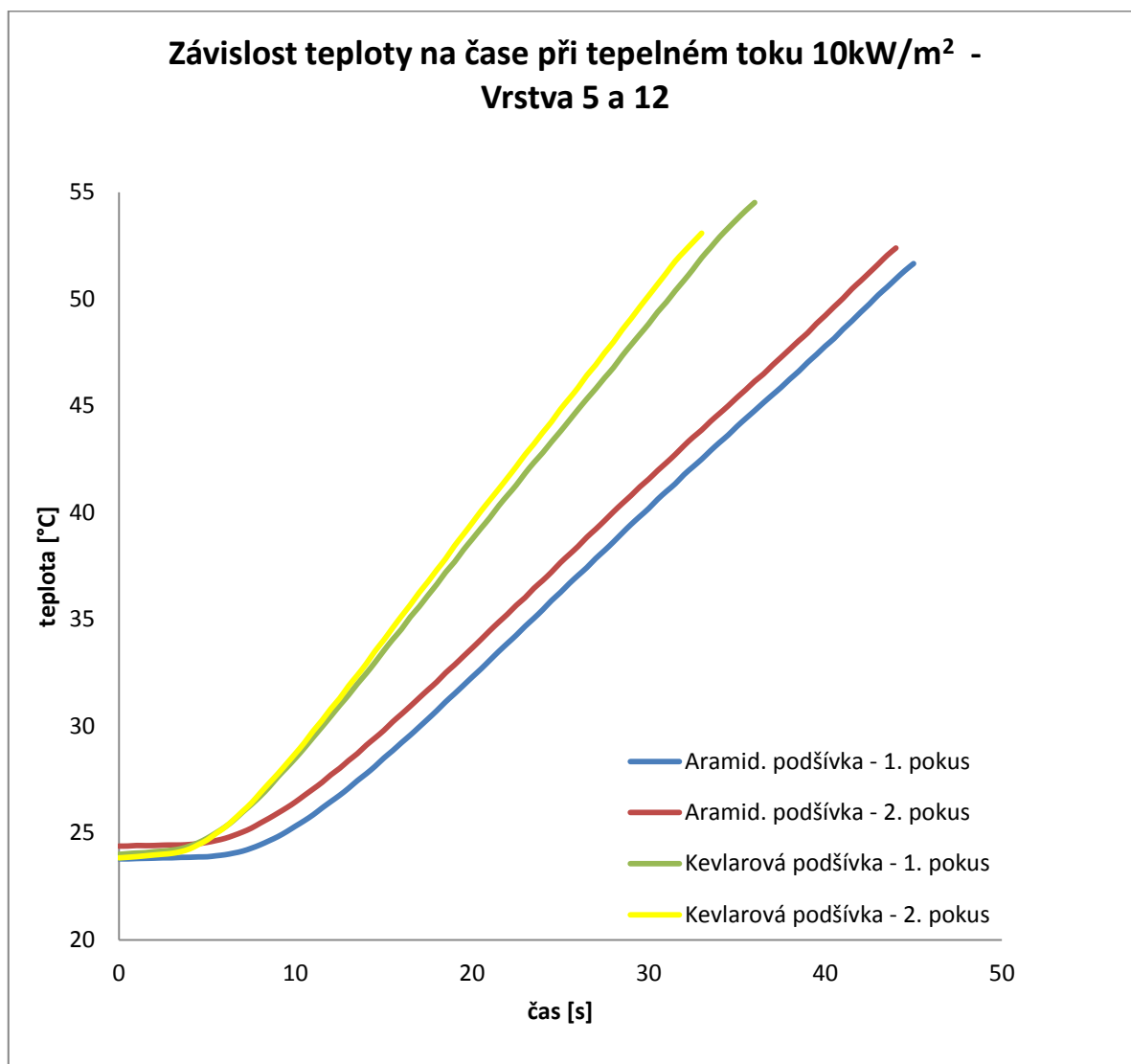
Obr. 53 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování aramidových úpletů



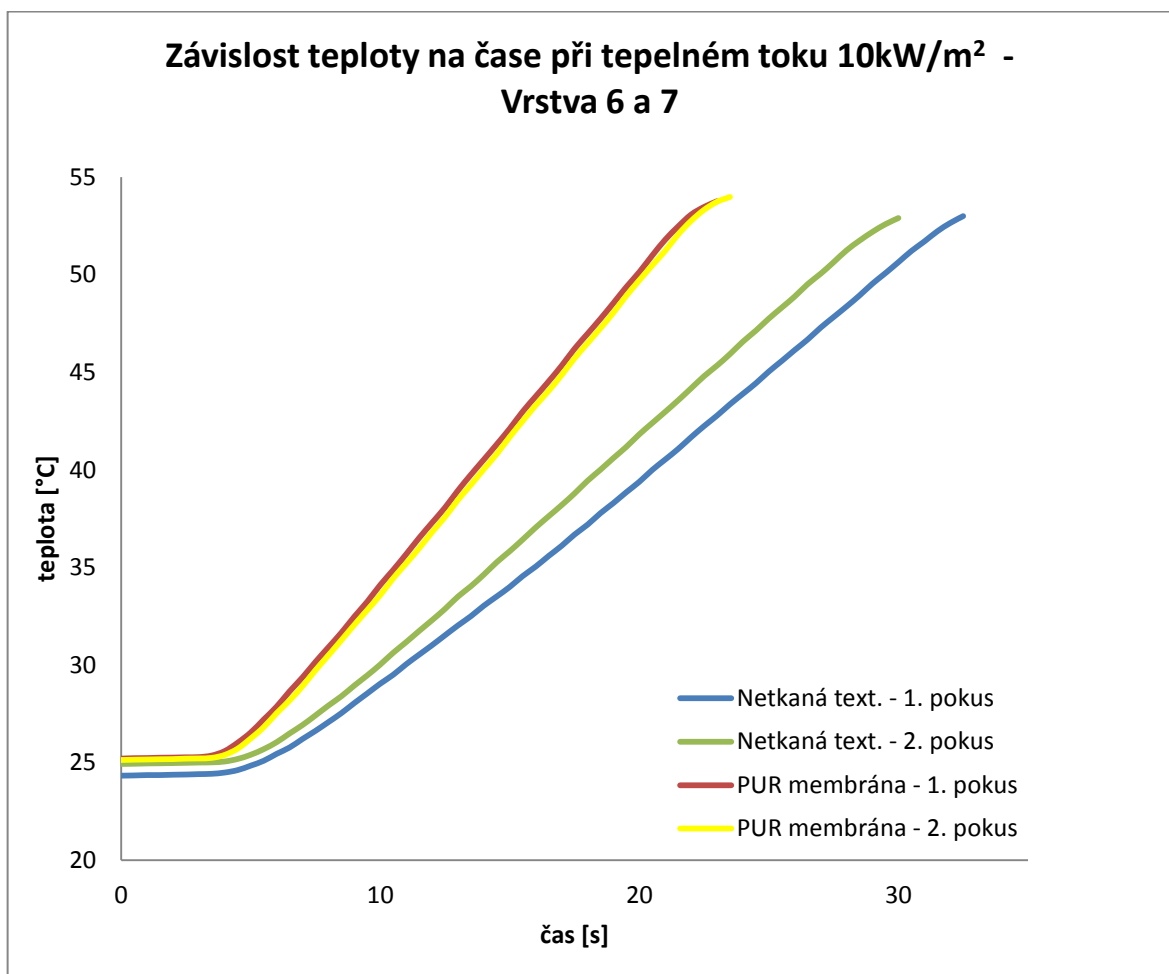
Obr. 54 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování Nomexu



Obr. 55 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování PBI



Obr. 56 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování podšívek



Obr. 57 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování netkané textilie a membrány

### 3.2.1.1 Diskuze

Z tabulek č. 9 a 10 lze vypožorovat, že aramidová podšívka (vrstva 5) má nejlepší tepelně izolační vlastnosti, což u této vrstvy je velmi žádané, protože je to poslední vrstva HZR, vrstva nejbližší lidské pokožce. Velmi dobré výsledky vykazovala i lícová useň, aramidový úplet se silikonovým zátěrem a pletenina ze směsi aramidu PAD se silikonovým povrstvením. Nejhorší dopadla membrána, která ovšem nemá plnit izolační vlastnosti, nýbrž zajišťuje odvod vodních par a jiných kapalin. Mezi vrstvami, které patří mezi vrchové, dopadl nejhůř tmavý PBI. Jedním z důvodů byla absence nánosu silikonu z rubové strany.

Z grafů závislosti nárůstu teploty na čase byly porovnávány následující vrstvy:

### *Hovězinové usně*

Štípaná useň má nepatrně lepší izolační schopnosti oproti lícové. Důvodem je především smršťení lícové usně a tím byly výsledky lehce zkresleny.

*Aramidové úplety: Aramidový úplet se silikonovým zátěrem a Pletenina ze směsi aramidu a PAD se silikonovým povrstvením.*

Z obrázku č. 52 vyplývá., že prostup tepla je přes oba materiály přibližně stejně rychlý. Oba materiály byly vyvinuty, aby chránily HZR především proti přímému kontaktnímu teplu (např. oheň).

### *Nomex*

Měření tepelné stability Nomexu s PVC zátěrem a silikonovým zátěrem dopadlo velmi podobně. V porovnání s ostatními vrchovými vrstvami dopadl spolu s PBI hůře.

### *PBI světlý a tmavý typ*

Z obrázku č. 55 můžeme vidět, že světlý typ má lepší izolační vlastnosti oproti tmavému. Důvodem je nejspíše nános silikonu z rubu a uplatní se zde i vliv prostupu tepla na barvě povrchu materiálu, čímž se zabývá kapitola 3.3.3.

### *Mezivrstva a membrána*

Obě vrstvy patří mezi materiály nejméně odolávající účinkům teplotního sálání. V případě membrány je příčina dána funkcí v HZR. Netkaná textilie má nízkou gramáž i vzhledem ke zvýšení citlivosti rukavice, např. v dlaňové části HZR tuto vrstvu nenalezneme.

### *Podšívky*

Porovnáním aramidové a Kevlarové podšívky, bylo zjištěno, že aramidová má lepší vlastnosti. Nárůst teploty nebyl tak rychlý jako v případě Kevlarové podšívky. Na lepší tepelně izolační vlastnosti má také velký vliv houževnatost aramidové podšívky, což je dáno gramáží.

## **3.2.2 Vrchové skladby**

Skladby byly testovány při stejných podmínkách. Jednotlivé skladby byly navrženy výrobcem Holík International k porovnání starých a nových typů kompozic pro výrobu hasičských zásahových rukavic.

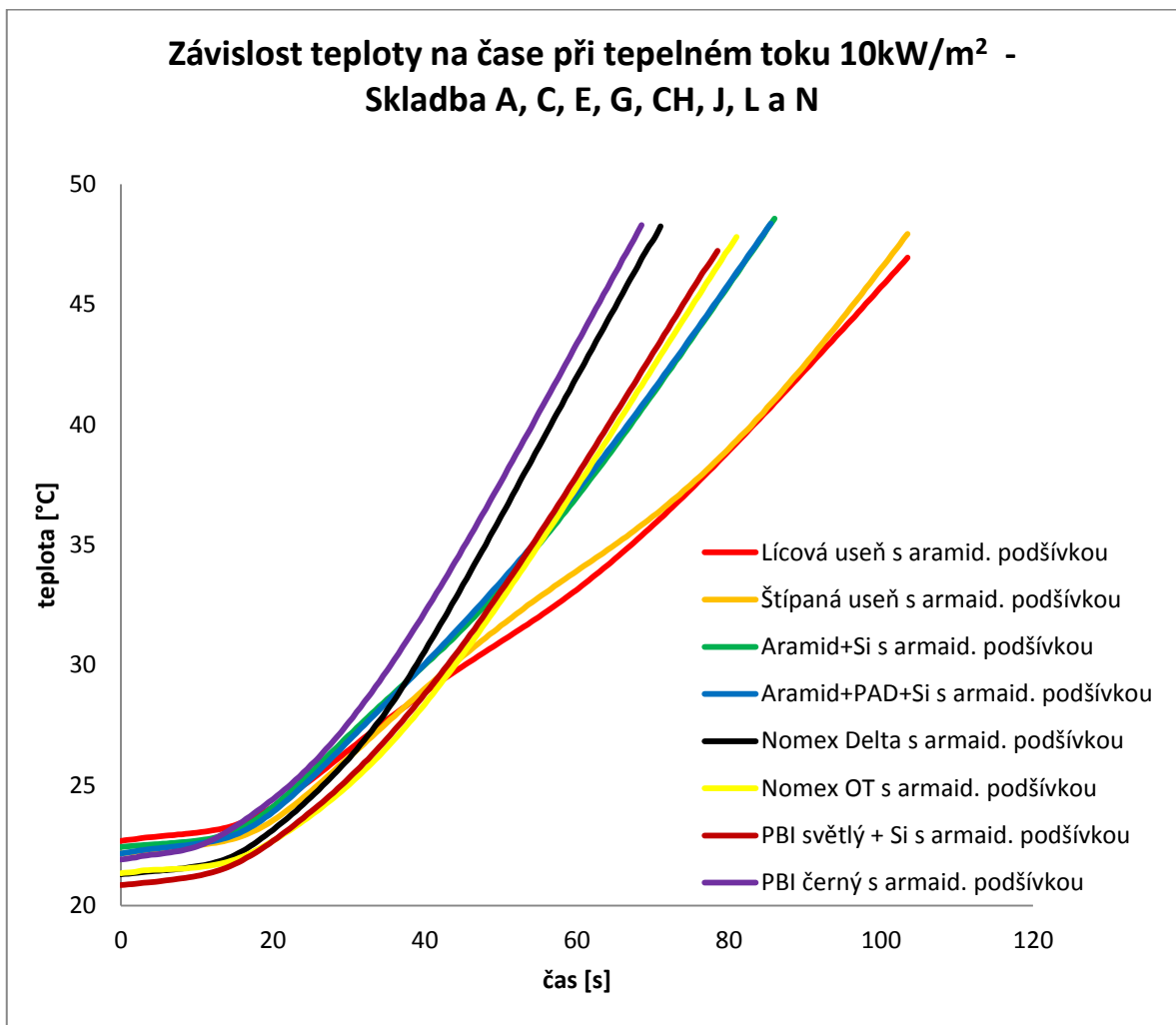
Tab. 11 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla vrchových skladeb HZR

Skladba	Nárůst teploty $R_1$ [°C/s]	Nárůst teploty $R_2$ [°C/s]	Průměrná hodnota $R$ [°C/s]	Směrodatná odchylka [°C/s]	Prostupující tepelný tok $Q_c$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Součinitel prostupu tepla $TF(Q_0)$
A	0,265	0,249	0,257	0,008	1,42	0,14
B	0,309	0,310	0,310	0,001	1,71	0,17
C	0,261	0,257	0,259	0,002	1,43	0,14
D	0,317	0,331	0,324	0,007	1,79	0,18
E	0,329	0,325	0,327	0,002	1,80	0,18
F	0,402	0,420	0,411	0,009	2,26	0,23
G	0,323	0,330	0,327	0,004	1,80	0,18
H	0,400	0,401	0,401	0,001	2,21	0,22
CH	0,414	0,405	0,410	0,004	2,26	0,23
I	0,502	0,514	0,508	0,006	2,80	0,28
J	0,355	0,351	0,353	0,002	1,95	0,19
K	0,462	0,463	0,463	0,001	2,55	0,25
L	0,363	0,374	0,369	0,006	2,03	0,20
M	0,451	0,440	0,446	0,006	2,46	0,25
N	0,409	0,418	0,414	0,005	2,28	0,23
O	0,492	0,505	0,499	0,007	2,75	0,27

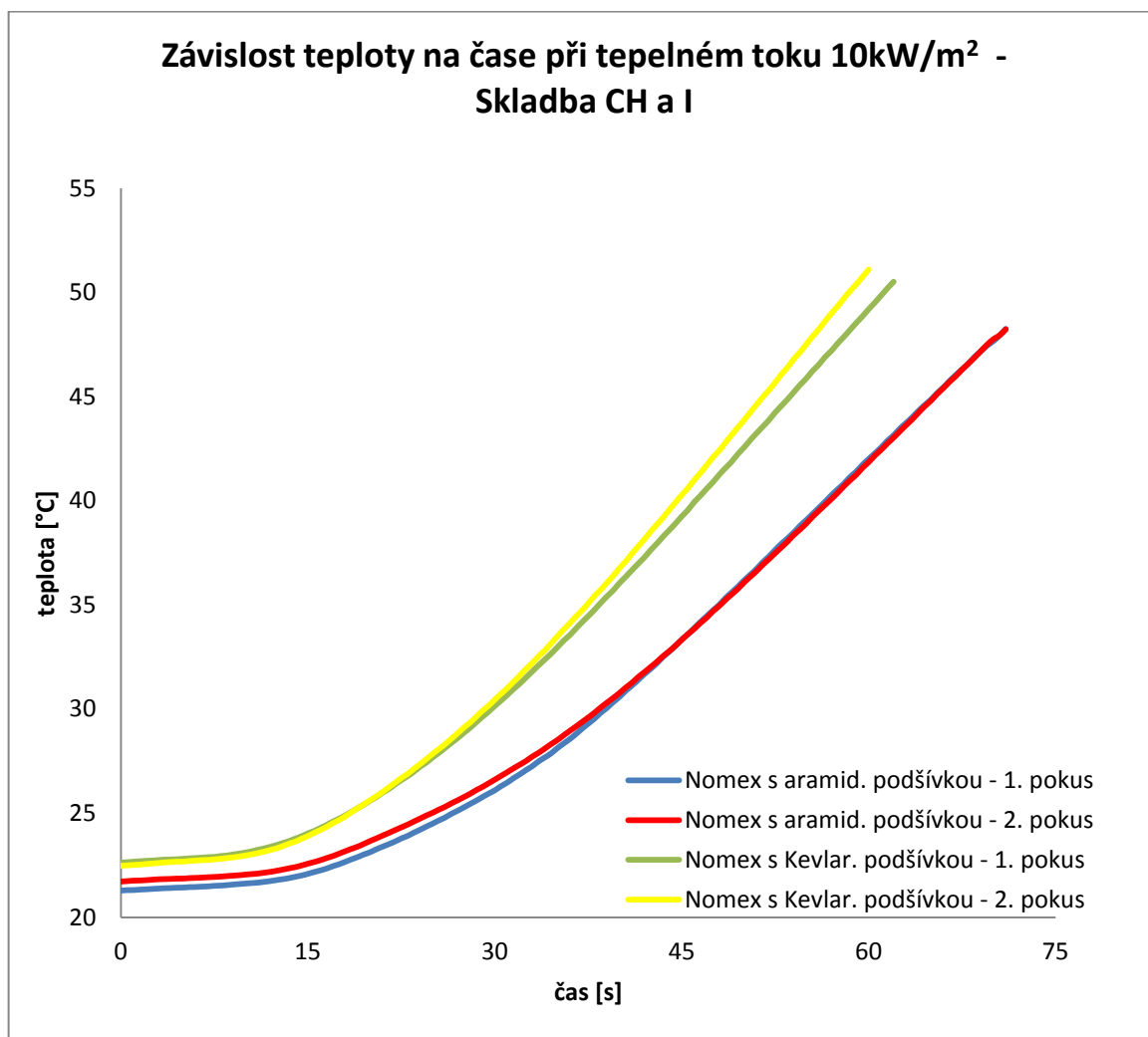
Tab. 12 – Hodnoty časů  $t_{12}$ ,  $t_{24}$  a  $\Delta t$  vrchových skladeb HZR

Skladba	$t_{12}$ [s]				$t_{24}$ [s]				$\Delta t$ [s]			
	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka
<b>A</b>	59,0	62,5	<b>60,8</b>	<b>1,8</b>	94,5	99,0	<b>96,8</b>	<b>2,3</b>	35,5	36,5	<b>36,0</b>	<b>0,5</b>
<b>B</b>	44,5	46,5	<b>45,5</b>	<b>1,0</b>	83,0	81,5	<b>82,3</b>	<b>0,8</b>	38,5	35,0	<b>36,8</b>	<b>1,8</b>
<b>C</b>	59,0	58,0	<b>58,5</b>	<b>0,5</b>	93,0	95,5	<b>94,3</b>	<b>1,3</b>	34,0	37,5	<b>35,8</b>	<b>1,8</b>
<b>D</b>	45,0	42,5	<b>43,8</b>	<b>1,3</b>	81,5	79,0	<b>80,3</b>	<b>1,3</b>	36,5	36,5	<b>36,5</b>	<b>0,0</b>
<b>E</b>	49,0	49,5	<b>49,3</b>	<b>0,0</b>	76,0	77,5	<b>76,8</b>	<b>0,0</b>	27,0	28,0	<b>28,0</b>	<b>0,5</b>
<b>F</b>	41,5	38,5	<b>40,0</b>	<b>1,5</b>	63,0	60,5	<b>61,8</b>	<b>1,3</b>	21,5	22,0	<b>21,8</b>	<b>0,3</b>
<b>G</b>	49,5	48,5	<b>49,0</b>	<b>0,5</b>	79,0	77,0	<b>78,0</b>	<b>1,0</b>	29,5	28,5	<b>29,0</b>	<b>0,5</b>
<b>H</b>	40,0	40,0	<b>40,0</b>	<b>0,0</b>	65,0	65,0	<b>65,0</b>	<b>0,0</b>	25,0	25,0	<b>25,0</b>	<b>0,0</b>
<b>CH</b>	41,0	42,0	<b>41,5</b>	<b>0,5</b>	62,0	63,0	<b>62,5</b>	<b>0,5</b>	21,0	21,0	<b>21,0</b>	<b>0,0</b>
<b>I</b>	33,0	33,0	<b>33,0</b>	<b>0,0</b>	51,0	50,0	<b>50,5</b>	<b>0,5</b>	18,0	17,0	<b>17,5</b>	<b>0,5</b>
<b>J</b>	48,0	49,0	<b>48,5</b>	<b>0,5</b>	72,0	72,0	<b>72,0</b>	<b>0,0</b>	24,0	23,0	<b>23,5</b>	<b>0,5</b>
<b>K</b>	36,5	36,5	<b>36,5</b>	<b>0,0</b>	55,5	55,0	<b>55,3</b>	<b>0,3</b>	19,0	18,5	<b>18,8</b>	<b>0,3</b>
<b>L</b>	46,0	44,5	<b>45,3</b>	<b>0,8</b>	70,0	68,0	<b>69,0</b>	<b>1,0</b>	24,0	23,5	<b>23,8</b>	<b>0,3</b>
<b>M</b>	36,5	37,5	<b>37,0</b>	<b>0,5</b>	56,0	58,0	<b>57,0</b>	<b>1,0</b>	19,5	20,5	<b>20,0</b>	<b>0,5</b>
<b>N</b>	41,0	39,5	<b>40,3</b>	<b>0,8</b>	62,0	60,5	<b>61,3</b>	<b>0,8</b>	21,0	21,0	<b>21,0</b>	<b>0,0</b>
<b>O</b>	34,0	33,0	<b>33,5</b>	<b>0,5</b>	51,5	50,0	<b>50,8</b>	<b>0,8</b>	17,5	17,0	<b>17,3</b>	<b>0,3</b>





Obr. 58 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování skladeb s aramidovou podšívkou se všemi vrchovými vrstvami



Obr. 59 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování skladeb s aramidovou a Kevlarovou podšívkou s Nomexem ve vrchní vrstvě

### 3.2.2.1 Diskuze

Z obrázku č. 58 je patrné, že nejlépe čelí sálavému teplu skladby HZR s usní na povrchu. Tepelně izolační vlastnosti jsou dány charakterem usní a jejich úpravou. V našem případě byly hověžinové lícově a štípané usně opatřeny ochranou vůči vodě, ale především vůči ohni a teplu obecně.

Naopak nejrychleji docházelo k nárůstu teploty v případě materiálových skladeb s PBI a Nomexem ve svrchní vrstvě. Tyto materiály už svou houževnatostí nemůžou konkurovat usní, či aramidovému úpletu se silikonovým zátěrem. Hlavní předností PBI a částečně i Nomexu je mechanická odolnost.

Každá materiálová skladba byla testována se dvěma typy podšívky. Z obrázku č. 59 je patrné, že nástupce Kevlarové podšívky – aramidová je tepelně odolnější. Důvodem je mimo jiné i již zmíněná houževnatost charakter vrstvy, který k těmto vlastnostem velmi přispívá.

### 3.2.3 Dlaňové skladby

V případě dlaňových skladeb bylo vycházeno z rukavic, které společnost Holík International vyrábí. Podle toho byly sestaveny následující 4 dlaňové skladby používaných v hasičských zásahových rukavicích. Od klasických vrchových skladeb byly rozdíly v tom, že mají pouze 3 vrstvy. Chybí mezivrstva v podobě netkané textilie.



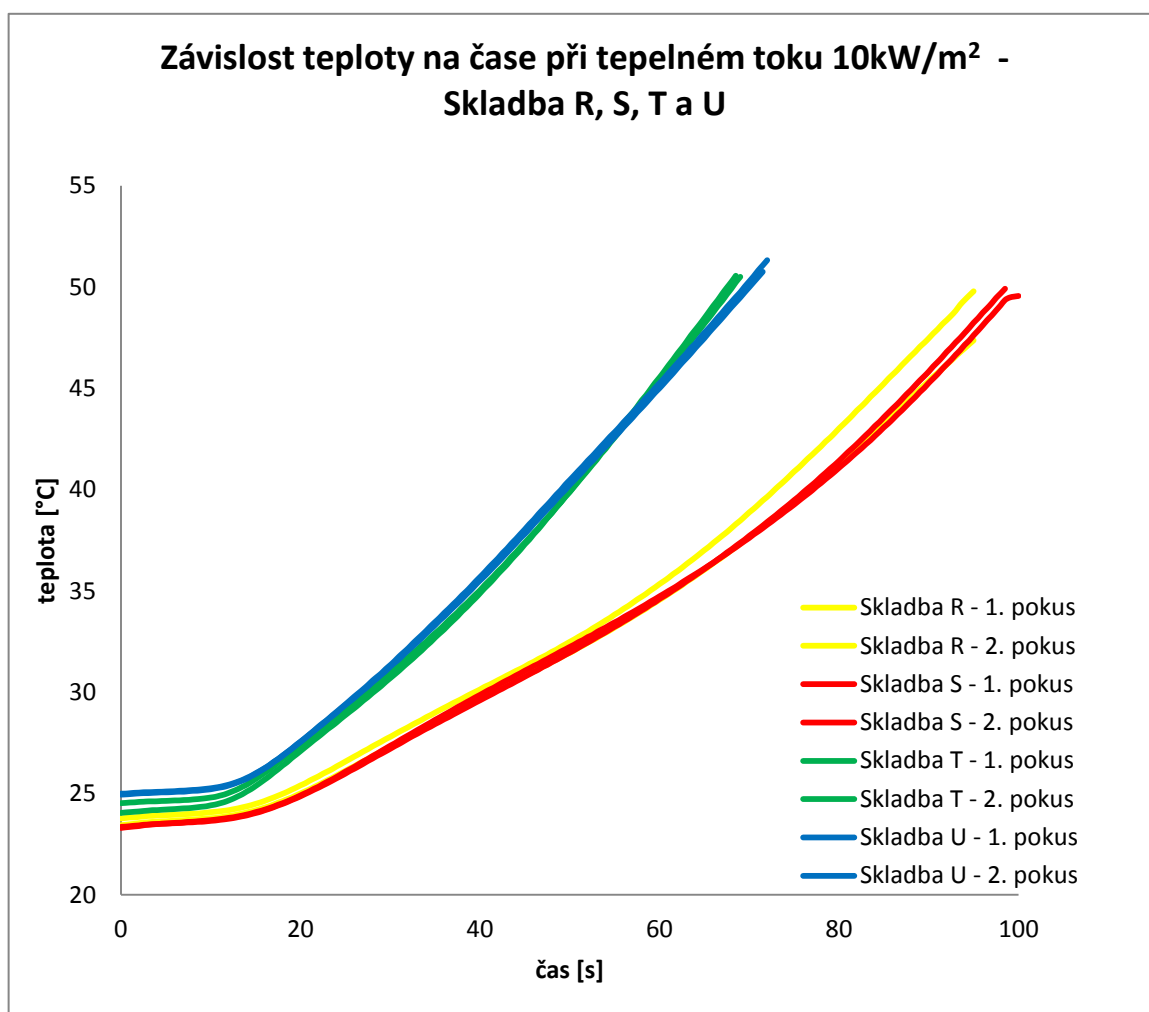
Obr. 60 – Ukázka pořadí vrstev ve vrchové a dlaňové části HZR

Tab. 13 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla dlaňových skladeb HZR

Skladba	Nárůst teploty $R_1$ [°C/s]	Nárůst teploty $R_2$ [°C/s]	Průměrná hodnota $R$ [°C/s]	Směrodatná odchylka [°C/s]	Prostupující tepelný tok $Q_c$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Součinitel prostupu tepla $TF(Q_0)$
R	0,268	0,277	0,273	0,005	1,50	0,15
S	0,266	0,268	0,267	0,001	1,47	0,15
T	0,417	0,409	0,413	0,004	2,28	0,23
U	0,409	0,405	0,407	0,002	2,24	0,22

Tab. 14 – Hodnoty časů  $t_{12}$ ,  $t_{24}$  a  $\Delta t$  dlaňových skladeb HZR

Materiál	$t_{12}$ [s]				$t_{24}$ [s]				$\Delta t$ [s]			
	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka
R	59,5	59,0	59,3	0,3	91,5	88,0	89,8	1,8	32,0	29,0	30,5	1,5
S	59,0	60,0	59,5	0,5	91,0	90,5	90,8	0,3	32,0	30,5	31,3	0,8
T	39,0	39,5	39,3	0,3	60,5	61,5	61,0	0,5	21,5	22,0	21,8	0,3
U	39,0	39,5	39,3	0,3	63,5	64,0	63,8	0,3	24,5	24,5	24,5	0,0



Obr. 61 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování dlaňových skladeb

### 3.2.3.1 Diskuze

V dlaňových skladbách jsou pouze 3 vrstvy, chybí mezivrstva v podobě netkané textilie. Absence mezivrstvy vede ke zvýšení citlivosti rukavice. V oblasti dlaně je tento prvek velmi důležitý a nepatrně větší prostupující tepelný tok touto kompozicí ve srovnání se

stejnou skladbou, která obsahuje netkanou textilií, není tak výrazný. Dlaňové části rukavic jsou více namáhány kontaktním teplem. Ze skladeb určených na dlaňovou část HZR dopadly nejlépe skladby s hovězinovou usní ve svrchní části kompozice. Useň má velmi dobrou odolnost vůči sálavému teplu, ale v její neprospěch je její vysoká cena a v případě delší expozice sálavého tepla dochází k výrazné degradaci, především smrštění.

### 3.2.4 Materiálové sendviče od fy Holík International

Tyto materiálové sendviče zahrnují nové typy materiálů, které rovněž naleznou využití u rukavic pro hasiče. Skladby také vynikaly tím, že třetí vrstvou nebyla membrána jako v případě předešlých testovaných kompozic. Jako všechny předešlé materiály, i zde byly kompozice materiálů testovány při tepelném toku  $10 \text{ kW/m}^2$ , příkon  $3200 \text{ W}$ , teplota topných tyčí činila  $1000^\circ\text{C}$  a vzorky byly měřeny ve vzdálenosti  $12,1 \text{ cm}$  od zdroje sálání. U 3. skladby neproběhlo měření času  $t_{24}$ , vlivem nadměrného zápachu a kouře, který příslušná kompozice vyvinula. Z času  $t_{12}$  a křivky nárůstu teploty však lze pozorovat, že tato skladba nejlépe odolávala tepelnému toku.

*Tab. 15 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla testování materiálových sendvičů HZR*

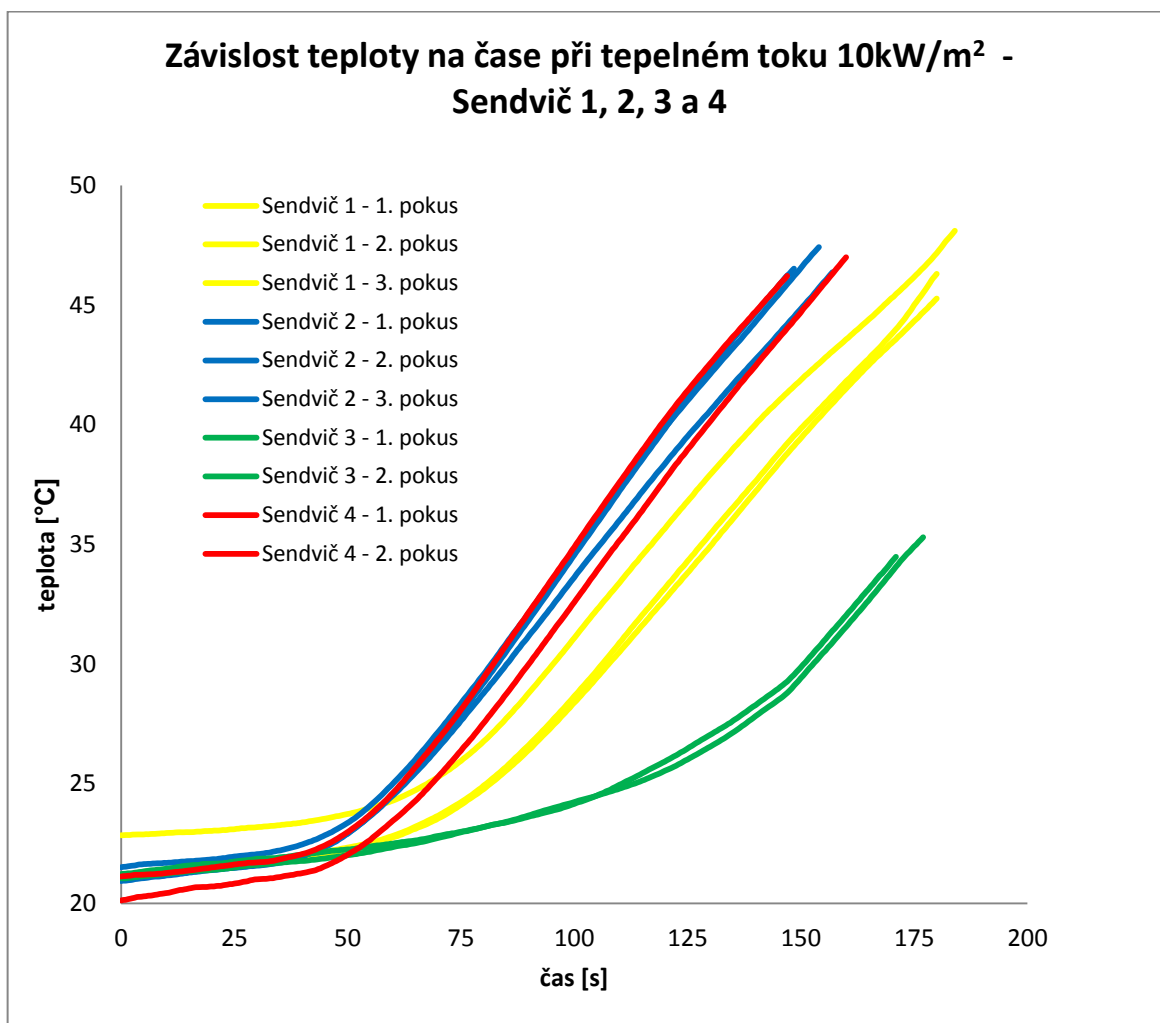
Materiálový sendvič	Nárůst teploty $R_1$ [ $^\circ\text{C/s}$ ]	Nárůst teploty $R_2$ [ $^\circ\text{C/s}$ ]	Nárůst teploty $R_3$ [ $^\circ\text{C/s}$ ]	Průměrná hodnota $R$ [ $^\circ\text{C/s}$ ]	Směrodatná odchylka [ $^\circ\text{C/s}$ ]	Prostupující tepelný tok $Q_c$ [ $\text{kW/m}^2$ ]	Součinitel prostupu tepla $TF(Q_0)$
1	0,150	0,150	0,160	0,153	0,005	0,85	0,08
2	0,193	0,184	0,195	0,191	0,005	1,05	0,11
3	0,064	0,064	-	0,064	0,000	0,35	0,04
4	0,197	0,185	-	0,191	0,006	1,05	0,11
5	0,363	0,360	0,352	0,358	0,005	1,97	0,20
6	0,417	0,400	0,409	0,409	0,007	2,25	0,23
7	0,434	0,454	-	0,444	0,010	2,45	0,24
8	0,372	0,366	0,372	0,370	0,003	2,04	0,20
9	0,416	0,418	0,416	0,417	0,001	2,30	0,23
10	0,461	0,258	-	0,360	0,102	1,98	0,20

Tab. 16 – Hodnoty časů  $t_{12}$  a  $t_{24}$  materiálových sendvičů HZR

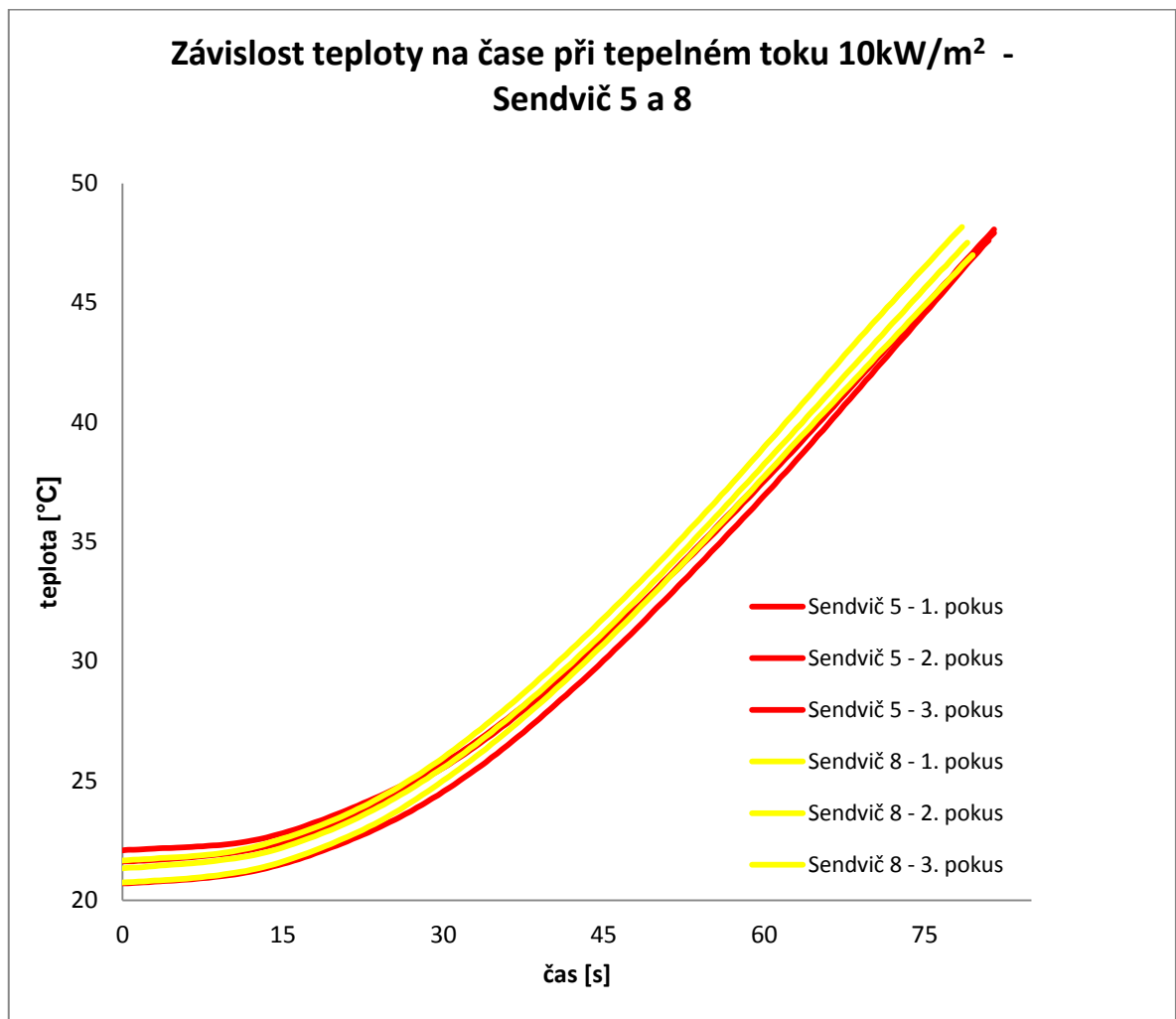
Materiálový sendvič	$t_{12}$ [s]					$t_{24}$ [s]				
	1	2	3	průměr	odchylka	1	2	3	průměr	odchylka
1	-	116,5	115,5	<b>116,0</b>	<b>0,5</b>	-	174,0	171,0	<b>172,5</b>	<b>1,5</b>
2	89,0	92,0	88,5	<b>89,8</b>	<b>1,5</b>	139,0	145,0	136,0	<b>140,0</b>	<b>3,7</b>
3	161,5	160,0	-	<b>160,8</b>	<b>0,8</b>	-	-	-	-	-
4	88,0	93,0	-	<b>90,5</b>	<b>2,5</b>	136,0	142,0	-	<b>139,0</b>	<b>3,0</b>
5	45,5	45,5	47,0	<b>46,0</b>	<b>0,7</b>	70,0	71,0	71,5	<b>70,8</b>	<b>0,6</b>
6	40,5	42,0	41,5	<b>41,3</b>	<b>0,6</b>	61,0	63,5	62,0	<b>62,2</b>	<b>1,0</b>
7	-	38,5	38,0	<b>38,0</b>	<b>0,3</b>	-	58,0	55,5	<b>56,8</b>	<b>1,3</b>
8	44,0	45,0	44,5	<b>44,5</b>	<b>0,4</b>	69,0	69,5	68,5	<b>69,0</b>	<b>0,4</b>
9	40,5	40,0	40,5	<b>40,3</b>	<b>0,2</b>	62,0	61,0	61,5	<b>61,5</b>	<b>0,4</b>
10	38,0	37,0	-	<b>37,5</b>	<b>0,5</b>	55,0	53,0	-	<b>54,0</b>	<b>1,0</b>

Tab. 17 – Hodnoty časů  $\Delta t$  materiálových sendvičů HZR

Materiálový sendvič	$\Delta t$ [s]				
	1	2	3	průměr	odchylka
1	-	57,5	55,5	<b>56,5</b>	<b>1,0</b>
2	50,0	53,0	47,5	<b>50,2</b>	<b>2,2</b>
3	-	-	-	-	-
4	48,0	49,0	-	<b>48,5</b>	<b>0,5</b>
5	24,5	25,5	24,5	<b>24,8</b>	<b>0,5</b>
6	20,5	21,5	20,5	<b>20,8</b>	<b>0,5</b>
7	-	19,5	17,5	<b>18,5</b>	<b>1,0</b>
8	25,0	24,5	24,0	<b>24,5</b>	<b>0,4</b>
9	21,5	21,0	21,0	<b>21,2</b>	<b>0,2</b>
10	17,0	16,0	-	<b>16,5</b>	<b>0,5</b>

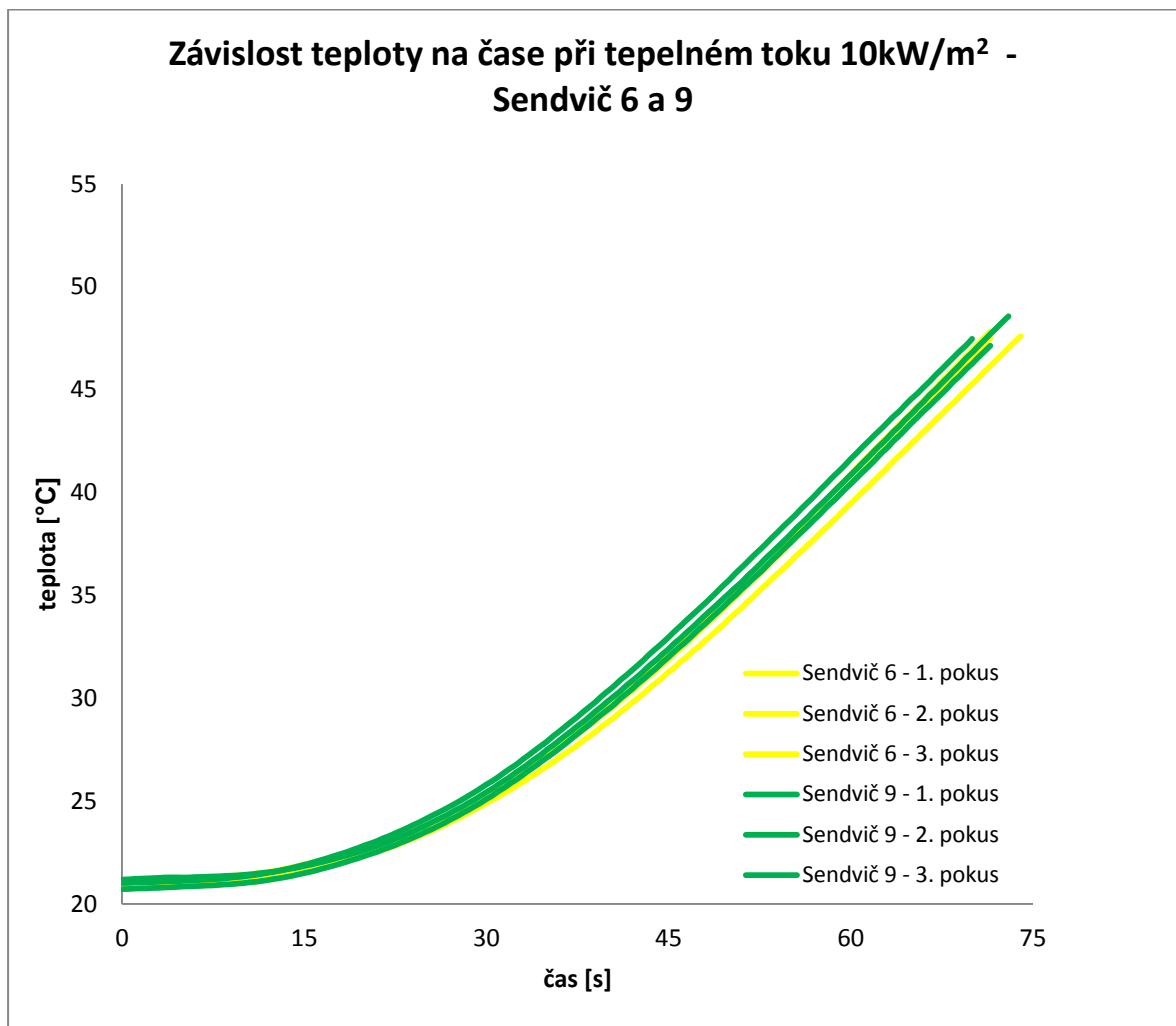


Obr. 62 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s aramidovým úpletem se silikonovým zátěrem ve vrchní vrstvě

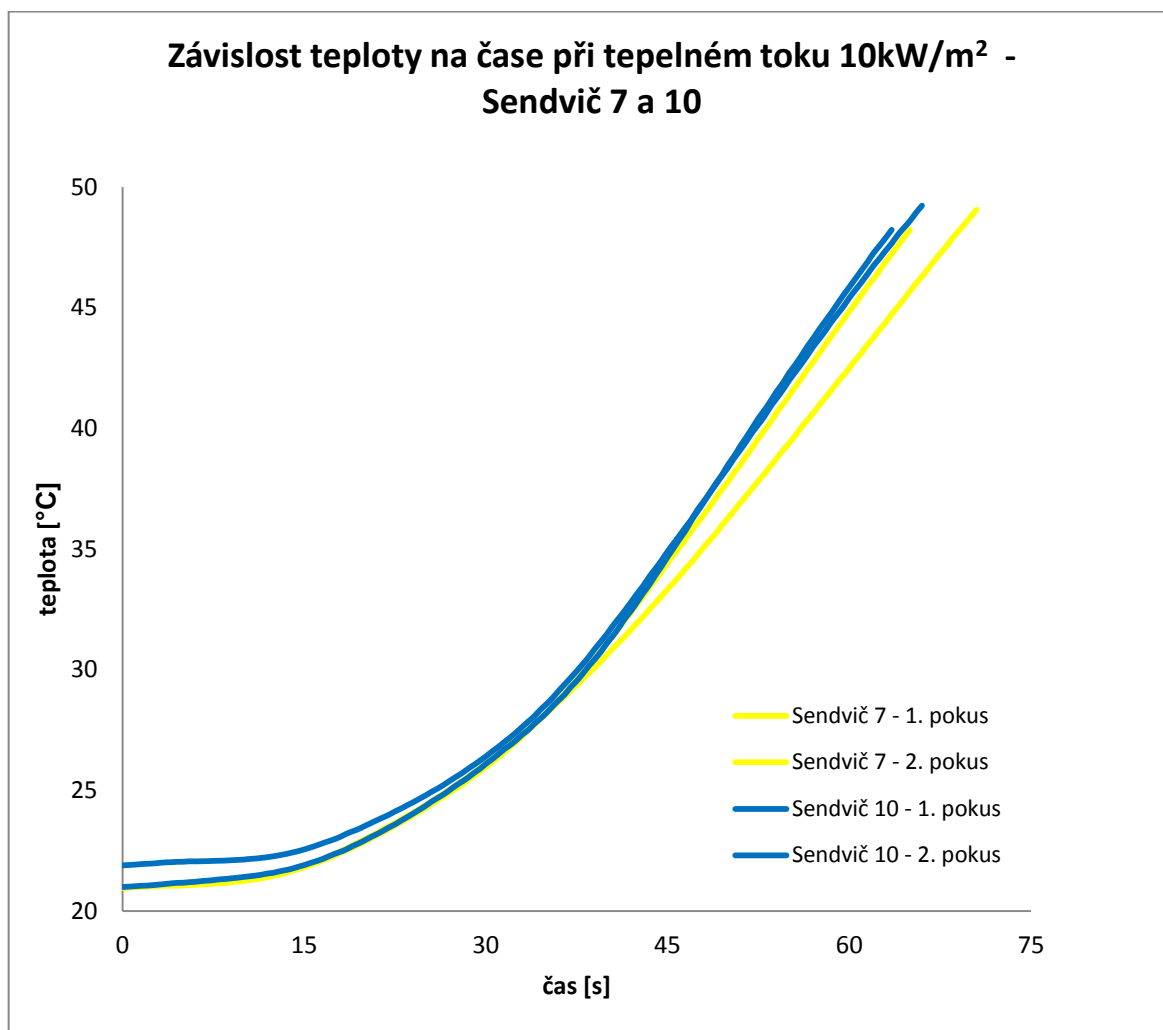


Obr. 63 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s PBO ve vrchní vrstvě





Obr. 64 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s Twin System Twill ve vrchní vrstvě



Obr. 65 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s Nomexem ve vrchní vrstvě

### 3.2.4.1 Diskuze

Z tabulek i grafů je patrné, že nejlepší tepelnou odolnost vůči sálavému teplu měl sendvič č. 3. Tento sendvič se skládal z aramidového úpletu se silikonovým zátěrem, vlněné plsti, neoprenu a Nomexu. Vzhledem ke složení ostatních vrstev lze usuzovat, že největší vliv na tak pomalý nárůst teploty měl neopren. Na druhou stranu tento materiálový sendvič působením tepla výrazně zapáchal a vyvíjel nadměrné množství kouře. Tolik, že bylo nutno měření předčasně ukončit a byl změřen pouze čas  $t_{12}$ , čas nárůstu teploty o  $12^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.5 Zkušební skladby

Následující skladby byly podrobeny tepelné zátěži při shodných podmínkách měření jako předešlé skladby. Tyto kompozice materiálů nevycházely z doporučení od výrobce a větší-

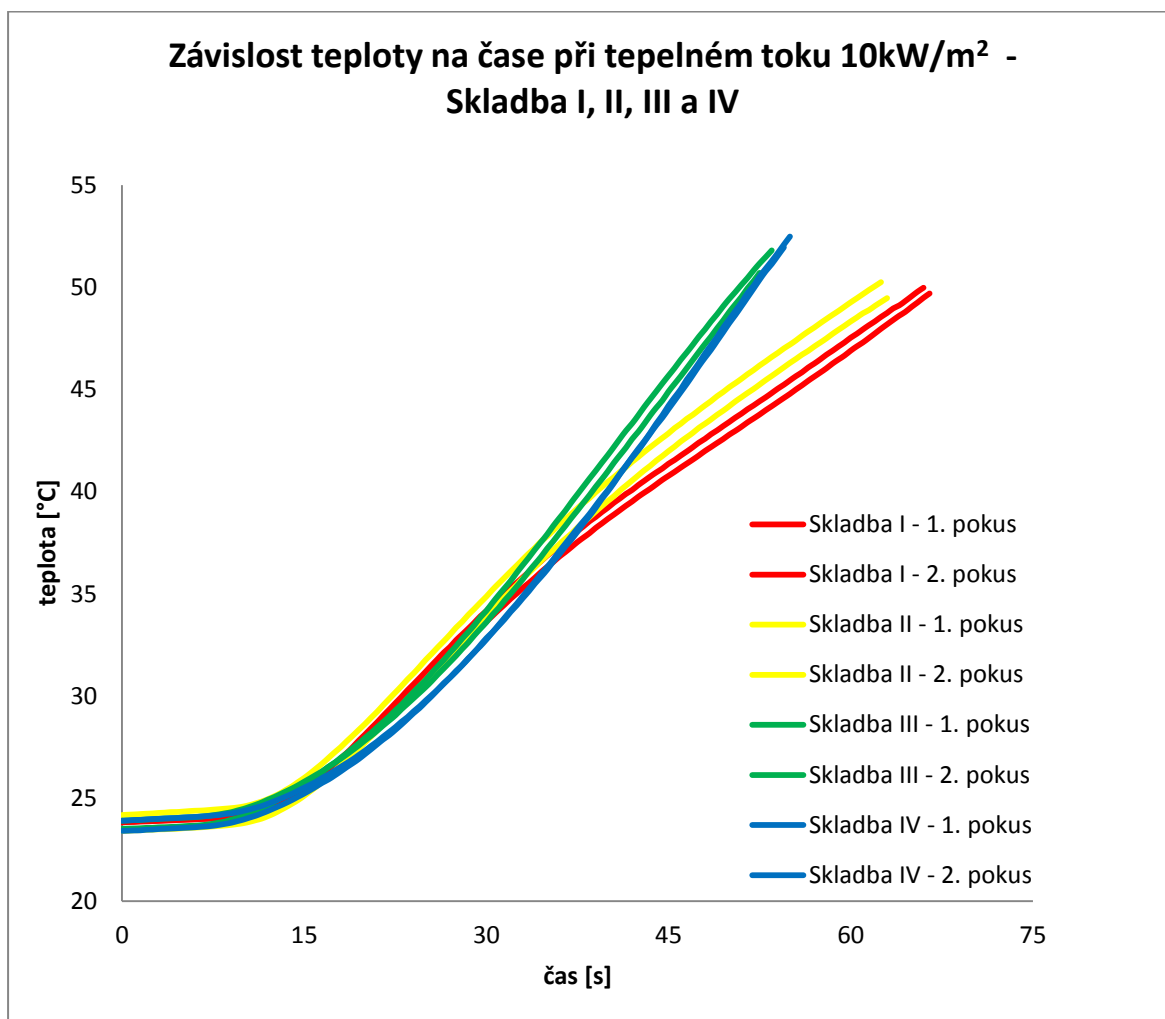
na skladeb nemá ani požadované 4 vrstvy, jak to vyžaduje konstrukce hasičské zásahové rukavice.

Tab. 18 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla zkušebních skladeb

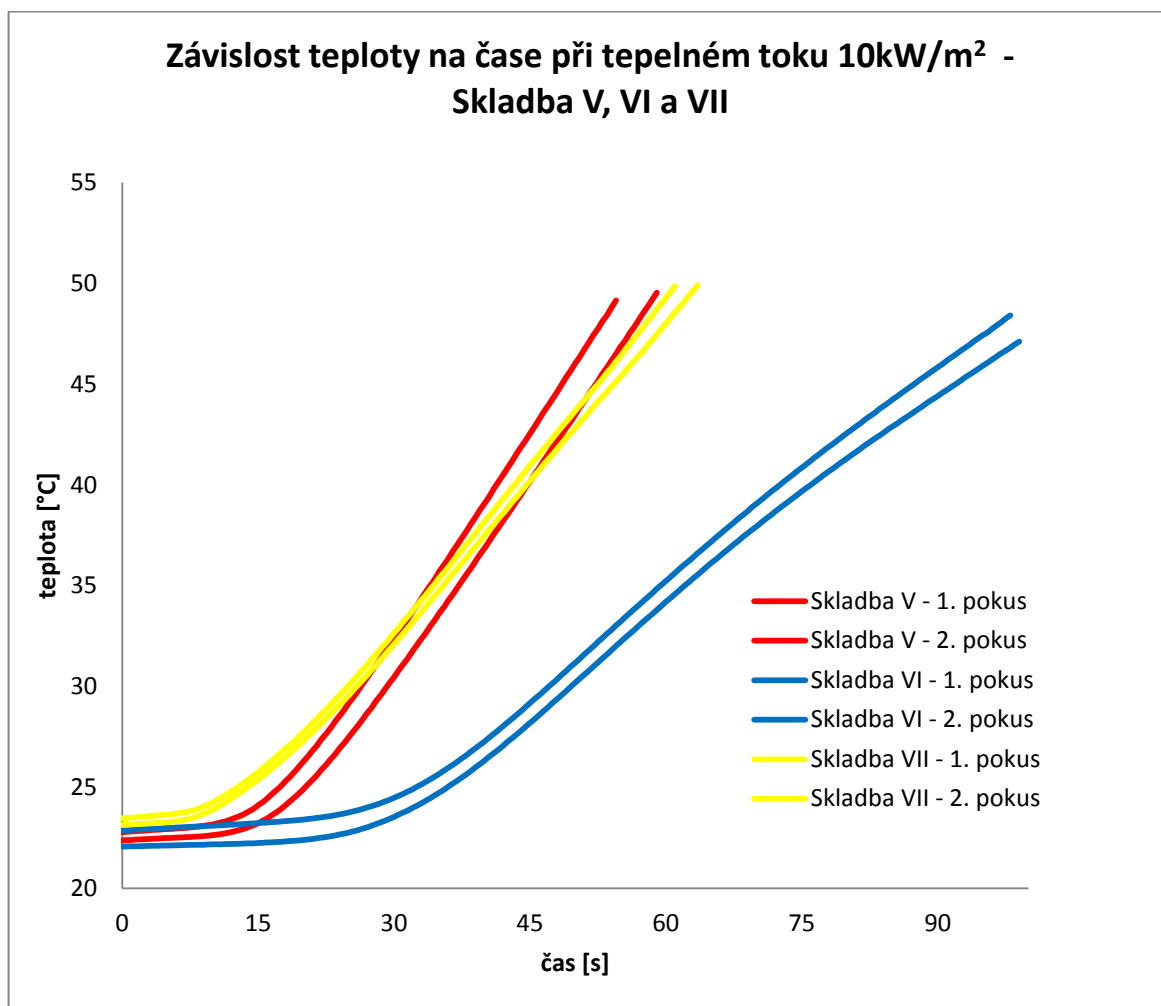
Typ skladby	Nárůst teploty $R_1$ [°C/s]	Nárůst teploty $R_2$ [°C/s]	Průměrná hodnota $R$ [°C/s]	Směrodatná odchylka [°C/s]	Prostupující tepelný tok $Q_c$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Součinitel prostupu tepla $TF(Q_0)$
Skladba I	0,480	0,465	0,473	0,007	2,60	0,26
Skladba II	0,516	0,514	0,515	0,001	2,84	0,28
Skladba III	0,581	0,593	0,587	0,006	3,23	0,32
Skladba IV	0,565	0,56	0,563	0,002	3,10	0,31
Skladba V	0,524	0,559	0,542	0,018	2,98	0,30
Skladba VI	0,301	0,305	0,303	0,002	1,67	0,17
Skladba VII	0,477	0,489	0,483	0,006	2,66	0,27

Tab. 19 – Hodnoty časů  $t_{12}$ ,  $t_{24}$  a  $\Delta t$  dlaňových skladeb HZR

Materiál	$t_{12}$ [s]				$t_{24}$ [s]				$\Delta t$ [s]			
	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka	1	2	průměr	odchylka
Skladba I	28,5	29,5	29,0	0,5	56,5	57,5	57,0	0,5	28,0	28,0	28,0	0,0
Skladba II	27,5	27,5	27,5	0,0	53,0	53,5	53,3	0,3	25,5	26,0	25,8	0,3
Skladba III	28,5	28,0	28,3	0,3	44,0	43,5	43,8	0,3	15,5	15,5	15,5	0,0
Skladba IV	30,0	30,0	30,0	0,0	44,5	45,0	44,8	0,3	14,5	15,0	14,8	0,3
Skladba V	32,5	30,0	31,3	0,0	50,5	47,5	49,0	0,0	18,0	17,5	17,8	0,0
Skladba VI	56,0	54,5	55,3	0,8	91,5	89,5	90,5	1,0	35,5	35,0	35,3	0,3
Skladba VII	32,0	31,5	31,8	0,3	54,5	53,5	54,0	0,5	22,5	22,0	22,3	0,3



Obr. 66 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování zkušebních skladeb



Obr. 67 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování zkušebních skladeb

### 3.2.5.1 Diskuze

Nejlepší tepelně izolační vlastnosti vykazovala materiálová skladba č. 6. Zde byl svrchní vrstvou aramidový úplet se silikonovým zátěrem, druhou tvořila hovězinová lícová useň, membrána a poslední vrstvu tvořila aramidová podšívka. V této skladbě byly použity 2 vrstvy určené na vrchovou část HZR, což je důvod tak pomalého nárůstu teploty kalorimetru pod zmíněnou skladbou.

Useň zde potvrdila velmi dobré tepelné vlastnosti, což je patrné z obrázku č. 66. Nárůst teploty má zpočátku stejně rychlý jako Nomex, ale zhruba po 30 sekundách se prostup tepla v případě Nomexu urychluje. Useň se chová teplotně velmi specificky, což je dáno strukturou tohoto přírodního materiálu.

### 3.3 Testování degradace vrstev a skladeb proti sálavému teplu

Norma, která popisuje testování materiálů podrobených sálavému teplu, pojednává o metodě A, kdy byly projevy sálavého tepla hodnoceny subjektivně. Hodnocení bylo založeno na porovnání změn vzhledu vrstev. V případě metody A byly vzorky testovány za poněkud jiných podmínek z důvodu pozorovatelné degradace vzorků. Tepelný tok dosahoval hodnoty  $20 \text{ kW/m}^2$ , dodávaný příkon byl stejný,  $3200 \text{ W}$ , rovněž teplota topných tyčí byla na hodnotách okolo  $1000^\circ\text{C}$ . Vlivem shodného příkonu ve srovnání s metodou B, bylo nutno vzorek s držákem přiblížit ke zdroji sálání na  $6,6 \text{ cm}$ . Při této metodě nebyl měřen prostup tepla, tak byl použit držák bez kalorimetru. Zkouška byla provedena tak, že materiál byl připevněn na držák a zatížen závažím vyvíjející sílu  $2\text{N}$ . Měření trvalo 3 minuty a doplňkem k testování jednotlivých vrstev a skladeb byla naměřená teplota povrchu materiálu po 3 minutách působení tepla. Poté byl vzorek hodnocen pomocí pěti stupňové škály podle způsobené degradace.

Tab. 20 – Stupně odolnosti materiálů vůči sálavému teplu

Odolnost vůči sálavému teplu	Stupeň
výborná	1
velmi dobrá	2
dobrá	3
uspokojivá	4
neuspokojivá	5

Jediným parametrem, který byl hodnocen objektivně, bylo měření smrštění vzorku. To bylo počítáno jako procentuální úbytek z původní šířky.

#### 3.3.1 Jednotlivé vrstvy

Tepelně degradačním účinkům byly vystaveny stejné vrstvy, jako v případě metody B. Vlivem zvýšeného tepelného toku došlo v některých případech ke vzplanutí.

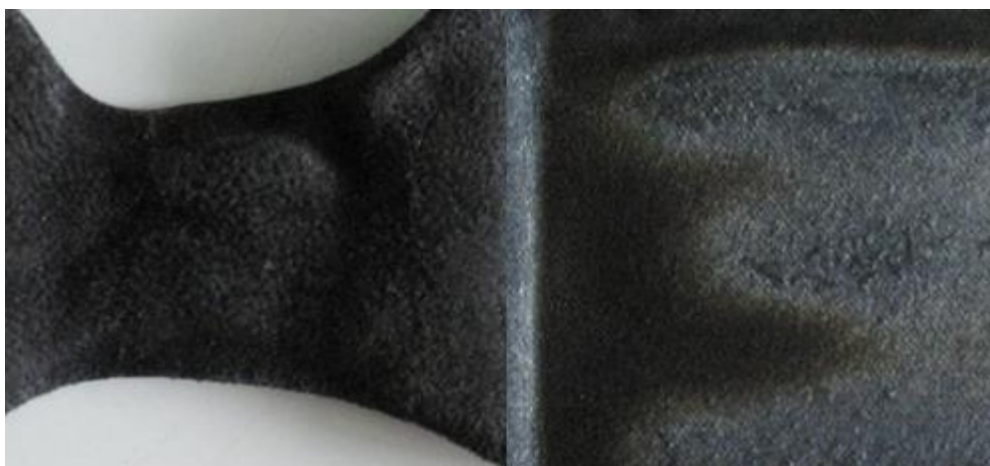
Tab. 21 – Hodnocení tepelné degradace jednotlivých vrstev

Vrstva	Barevná stálost	Zuhelnatění	Smrštění [%]	Zkřehnutí	Celková degradace	Teplota povrchu [°C]
1	2	4	54,0	4	4	235
2	1	1	12,5	2	2	250
3	2	2	-	2 L	3 R	380
4	2	3 R	-	3	4 R	270
5	4 R	2	-	1	3 R	310
6	3 R	2	15,0	1	3 R	280
7	3 R	1	4,0	1	2	175
8	1	1	5,0	4	3	360
9	1	3 R	-	3	4	235
10	2 R	1	-	2	2	205
11	2	1	-	1	2	220
12	1	1	-	1	1	265

Pozn.: Písmeno R v tabulce udává, že daná degradace se projevila především z rubové strany materiálu.



Obr. 68 – Nejméně degradovaná vrstva – Kevlarová podšívka



Obr. 69 – Nejvíce degradované vrstvy – hovězinová lícová useň z rubu a Nomex OT z rubu

### 3.3.1.1 Diskuze

#### *Hovězinové usně*

Usně, ať již lícová nebo štípaná se během zkoušky chovaly podobně. V obou případech docházelo k nadměrnému vývinu kouře a charakteristického zápachu. Působením tepla deformovány – docházelo k velkému smrštění. Lícová useň navíc velmi ztvrdla a po 110 sekundách vzplála. Teplota povrchu obou materiálů byly v průběhu měření shodné.

#### *Aramidové úplety*

U obou materiálů byl výrazný zápach v průběhu měření, ale aramidový úplet se silikonovým zátěrem (3) oproti pletenině ze směsi aramidů a PAD se silikonovým povrstvením (8) nevyvíjel tolik kouře a celková degradace vrstvy č. 3 nebyla nijak výrazná, jen rub jevil známky ohoření. Vrstva č. 8 byla více tepelně degradovaná a povrch materiálu byl výrazně zkřehlý a lehce prosvítal přes malé trhlinky.

#### *Nomex*

Nomexy vykazovaly podobnou tepelnou degradaci. Oba vzorky měly především ohořenou rubovou stranu. Jinak tyto materiály vykazovaly stejné znaky degradace jako ostatní materiály.

#### *PBI*

Světlý typ PBI po testování jevil oproti tmavému typu z rubu známky ohoření. Je to nejspíš následek nánosu silikonu. Tmavý typ byl téměř bez jakékoliv degradace. Mimo to světlý typ byl lehce zkřehlý. Oba materiály vyvinuly kouř jen zpočátku.



Na netkané textílii byl patrné známky degradace z obou stran, navíc došlo k mírnému smrštění, což ovšem mohlo mít za následek závaží, díky kterému byl materiál v napnutém stavu.

Polyuretanová membrána měla vlivem sálavého tepla nejnižší teplotu povrchu po 3 minutách měření. Po skončení jevila známky degradace, konkrétně došlo k mírnému zbarvení. Během testování nedocházelo k vývinu kouře ani zápachu. Mírné smrštění lze přisuzovat také závaží.

#### *Podšívky*

Opět se testovaly dva typy. Aramidová a Kevlarová. V průběhu měření vykazovaly podobné známky tepelné degradace. Oba typy vyvinuly kouř jen do 1. minuty měření. Avšak Kevlarová podšívka oproti aramidové po ukončení testu nejevila téměř žádné známky degradace. Ze všech vrstev projevila nejvyšší odolnost proti sálavému teplu.

### **3.3.2 Skladby**

Testovaných skladeb nebylo tolik, jako v případě metody B.

Měřené skladby byly rozděleny do dvou skupin. V první byly zastoupeny kompozice materiálů, které vykazovaly vysokou tepelnou odolnost, dle měření podle metody B.

Tab. 22 – Hodnocení tepelné degradace tepelně izolačních kompozic

Skladba	Vrstva	Barevná stálost	Zuhelnatění	Smrštění [%]	Zkřehnutí	Celková degradace	Teplota povrchu [°C]
A	hov. lícovka	2	4	51,0	3	4	250 VZNÍCENÍ (40s)
	netk. text.	1 K	1	10,0	1	1	
	PUR memb.	1 K	1	5,0	2	2	
	Ar. podš.	1	1	-	1	1	
C	hov. štípenka	2	2	34,0	5	4	270 VZNÍCENÍ (40s)
	netk. text.	2 K	1	9,0	1	2	
	PUR memb.	2 K	1	8,0	2	2	
	Ar. podš.	1	1	-	1	1	
E	Aramid+Si	3 (R 5)	3	9,0	4	4	440
	netk. text.	4	3	2,5	2	3	
	PUR memb.	4	3	2,5	2	3	
	Ar. podš.	2	1	-	1	2	
G	Aramid+PAD+Si	2	4	10,0	4	5	425
	netk. text.	5	4	4,0	2	4	
	PUR memb.	4	2	2,5	2	3	
	Ar. podš.	3	1	-	1	2	

Pozn.: Písmeno R v tabulce udává, že daná degradace se projevila především z rubové strany materiálu a písmeno K značí, že kraje byly více degradovány, což bylo způsobeno smrštěním vrchní usňové vrstvy skladby.



Obr. 70 – Nejvíce degradovaná kompozice – skladba G

I přes to, že byly testovány skladby, které byly vyhodnoceny jako nejlépe tepelně izolační, dvě materiálové skladby se vznítily. Byly to skladby, které měly ve svrchní části kompozice

ce hovězínovou useň. Nehořela ovšem useň, ale vzplanula netkaná textilie, které po smrštění usně byla v přímém kontaktu se sálavým teplem topných tyčí. Měření tak muselo být předčasně ukončeno, v obou případech materiál vzplanul po 40 sekundách. V obou případech useň produkovala výrazný kouř. V případě skladby s lícovou usní, jednotlivé vrstvy spojeny nebyly. U skladby se štípanou usní došlo ke spojení vrstev. Vzplanuly též skladby s Nomexem v 1. vrstvě.

Jediné skladby, z této skupiny kompozic, které se nevznítily, byly materiálové sendviče s aramidovým úpletem a aramidovou pleteninou. Obě skladby jevíly známky smrštění, především 1. vrstvy. Ohořené byly i ruby těchto svrchních vrstev a netkaná textilie. Kromě vrchní vrstvy, byly všechny ostatní slepeny.

Ve druhé skupině jsou skladby, které svými tepelně izolačními vlastnostmi nevyňikaly.

Tab. 23 – Hodnocení tepelné degradace kompozic méně tepelně odolných materiálů

Skladba	Vrstva	Barevná stálost	Zuhelnatění	Smrštění [%]	Zkřehnutí	Celková degradace	Teplota povrchu [°C]
I	Nomex D.	3	4 R	9,0	4	4	380 VZNÍCENÍ (30s)
	netk. text.	4	3	2,5	2	4	
	PUR memb.	4	3	2,5	2	3	
	Kevlar. p.	2	1	-	1	2	
O	černé PBI	3	3	-	2	3	365
	netk. text.	3	3	-	2	3	
	PUR memb.	3	3	-	2	2	
	Kevlar. p.	1	1	-	1	1	
K	Nomex OT	2	1	6,0	2	2	245 VZNÍCENÍ (20s)
	netk. text.	2	1	4,0	1	1	
	PUR memb.	2	1	2,5	1	1	
	Kevlar. p.	1	1	-	1	1	
M	světlé PBI +Si	3	5 R	2,5	2	4	360
	netk. text.	4	3	2,5	2	4	
	PUR memb.	4	4	2,5	4	4	
	Kevlar. p.	2	1	-	1	2	

*Pozn.:* Písmeno R v tabulce udává, že daná degradace se projevila především z rubové strany materiálu.



*Obr. 71 – Nejméně degradovaná kompozice – skladba O*

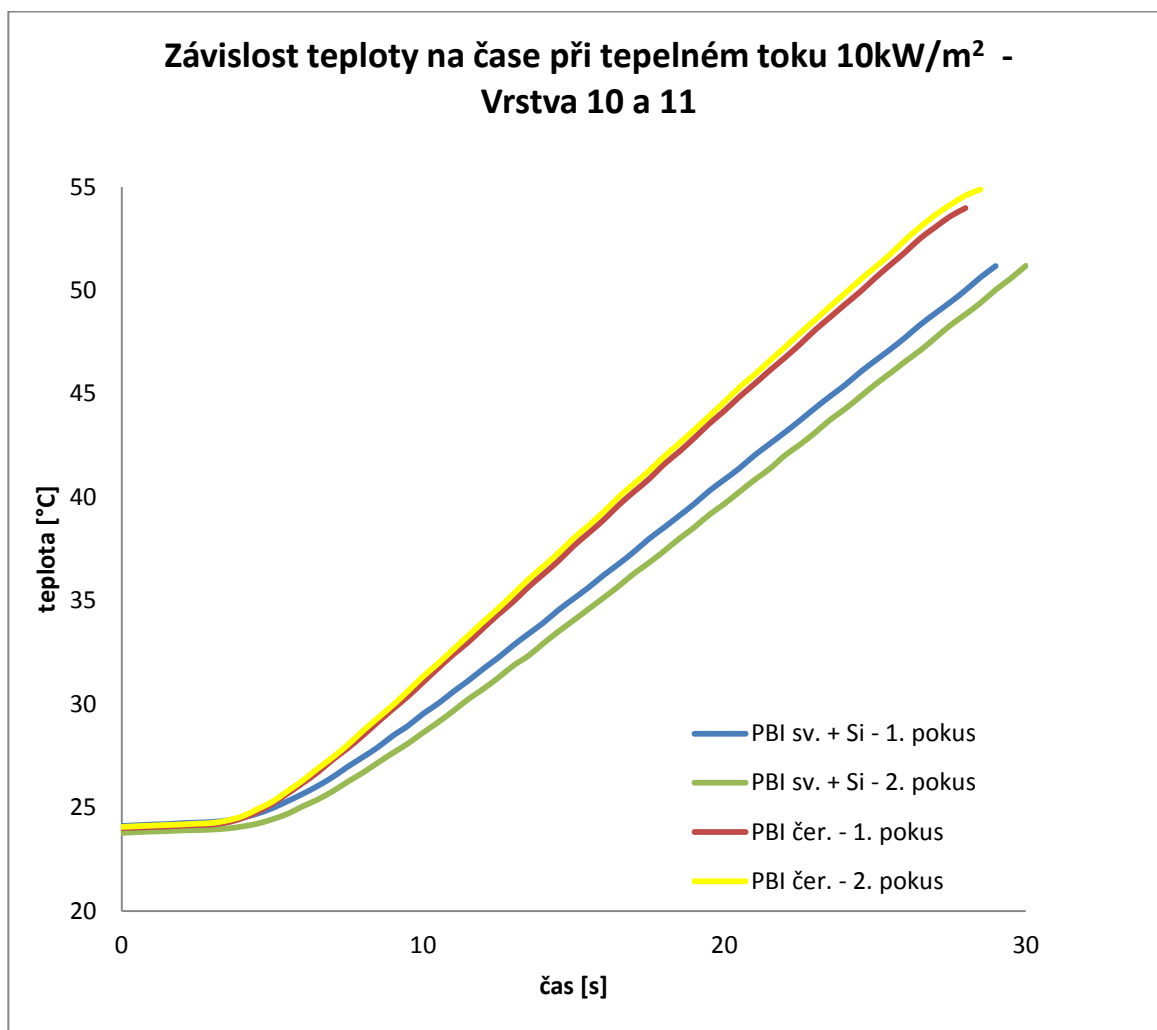
### **3.3.2.1 Diskuze**

V této skupině tedy byly zastoupeny materiálové skladby méně odolné vůči prostupu tepla. V tomto případě také vzplály dvě kompozice. V obou případech tvořil vrchní vrstvu Nomex a oba vzplály zhruba po 30 sekundách působení tepelného toku o hodnotě 20 kW/m<sup>2</sup>. Až na 1. vrstvu, byly všechny vrstvy navzájem spojeny a v obou případech došlo k mírnému smrštění. Vrchní vrstva jevila evidentně známky zčehnutí.

Skladby, v nichž bylo zakomponováno PBI, nevzplály a neprodukovaly tak výrazný kouř jako ostatní testované kompozice. Zajímavostí bylo to, že teplota povrchu PBI rostla přibližně do 90 sekund a poté v obou případech klesala. Z nejvyšší naměřené teploty činil pokles 20 °C. Všechny vrstvy až na PBI byly spojeny. Světlý typ PBI měl na rozdíl od tmavého typu ohořenou rubovou stranu, což je přikládáno silikonovému zátěru.

### **3.3.3 Vliv emisivity (barvy materiálu) na prostup tepla**

U vrstev PBI byl také sledován prostup tepla v závislosti na barvě povrchu. K dispozici byl světlý PBI se silikonovým zátěrem na rubu a tmavý PBI bez nánosu na rubu.



Obr. 72 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování PBI

Již z obrázku č. 72 lze vypořadovat, že tmavým PBI rychleji prostupuje teplo vlivem absence silikonového zátěru. Materiál tepelné záření pohlcuje v maximálním množství. Tento fakt potvrzuje i teplota povrchu černého i světlého PBI po 3 minutách vystaveného tepelnému toku  $20\text{ kW/m}^2$ . Teplota tmavého povrchu byla stanovena na  $220^\circ\text{C}$ , v případě světlého PBI činila teplota po 3 minutách  $205^\circ\text{C}$ .

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá problematikou odolnosti a tepelných vlastností materiálů a materiálových sendvičů mající své uplatnění v ochranných prostředcích sloužící armádě, policistům, příslušníkům speciálních jednotek či hasičům.

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN 6942, která popisuje zařízení, postup a samotné metody měření. Materiály a materiálové sendviče se vyhodnocovaly dle normy z hlediska degradace prostřednictvím sálavého tepla a prostupu tepla. V prvním případě se stanovovaly požadované parametry nárůstu teploty a s nimi související prostupující tepelný tok, součinitele prostupu tepla a index přestupu sálavého tepla, v případě druhé metody se materiály hodnotily vizuálně. Z výsledků měření bylo zjištěno, že ze zkoušených materiálových vrstev má nejlepší tepelně izolační vlastnosti aramidový úplet se silikonovým zátěrem a pletenina ze směsi aramidu a PAD se silikonovým povrstvením. Jediným testovaným přírodním materiálem byla useň, a konkrétně hovězinová useň lícová vykazovala velmi malý prostup tepla, s charakteristickým nárůstem teploty během měření. Na rozdíl od ostatních materiálů se nárůst teploty zhruba po 30 sekundách měření zpomalil, což je dáno specifickou strukturou usně, činěním a povrchovými úpravami. Všechny tři zmíněné materiály jsou vrchními vrstvami HZR. Ze dvou testovaných podšívek byla nejodolnější aramidová podšívka oproti tomu přes membránu byl prostup sálavého tepla nejrychlejší. Ovšem PUR membrána neplní v HZR funkci tepelně izolační, nýbrž hygienickou.

Mezi skladbami vykazovala nejnižší prostup tepla kompozice s usní, která potvrdila tepelnou odolnost z měření jednotlivých vrstev i mezi skladbami určenými do dlaňové části rukavice. Ze speciálních materiálových sendvičů sestavených firmou Holík International byl nejpomalejší prostup tepla v případě skladby s aramidovým úpletem se silikonovým zátěrem a neoprenem v 3. vrstvě. Tato skladba vykazovala ze všech měřených materiálových kompozic nejlepší tepelně izolační vlastnosti. Nejrychlejší prostup tepla vykazovaly skladby s tmavým PBI a Nomexem s PVC zátěrem. V případě Nomexu docházelo k nadměrnému vývinu hořlavých plynů, které následně vzplály. Ze zkušebních vrstev vykazovala nejlepší výsledky skladba s usní a aramidovým úpletem se silikonovým zátěrem. důvodem je spojení vynikajících tepelných vlastností obou použitých materiálů.

V druhé části měření byly vzorky materiálů testovány na odolnost vůči tepelné degradaci. Z jednotlivých vrstev se nejméně projeví účinky sálavého tepla na Kevlarové podšívce, která nevykazovala téměř žádné známky jakékoliv degradace. Známky působení tepla se

nejvíce projevily na lícové usni a Nomexu s PVC zátěrem. V případě usně se degradace projevila výrazným smrštěním a Nomex jevil známky ohoření z rubu. Mezi skladbami byla nejméně degradovaná kompozice s tmavým PBI ve vrchní vrstvě. Důvod větších projevů degradace u světlého typu byl nejspíše vlivem silikonového zátěru. Nejhuře tepelné degradaci vzdorovala kompozice s pleteninou ze směsi aramidů a PAD se silikonovým povrstvením. Důvodem byla přítomnost PAD, který nevyniká tepelnou stálostí při vysokých teplotách. Některé skladby se působením vysokých teplot vznítily. V případě usně byl důvod smrštění a následné vznícení netkané textilie ve druhé vrstvě. Ve skladbách s Nomexem se vznítily uvolňující se hořlavé plyny, produkty pyrolýzy.

Posledním, okrajovým měřením, které nezasahovalo do citované normy, byl vliv emisivity materiálu (barvy povrchu materiálu) na prostup tepla. Měření se provádělo na dvou vzorcích PBI, světlého a tmavého typu. Nárůstem a teplotou povrchu bylo potvrzeno, že těleso s tmavším povrchem záření více pohlcuje a méně odráží než materiál se světlým povrchem.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teploty*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 153 s. ISBN 80-7300-180-2
- [2] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 239 s. ISBN 80-7300-145-4
- [3] HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla*. 3. vyd. Praha: ČVUT, Jaderná a fyzikálně inženýrská fakulta, 1999. 186 s. ISBN 80-0101-982-9
- [4] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. 3. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2001. 266 s. ISBN 80-2480-003-9
- [5] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. 160 s. ISBN 80-2142-029-4
- [6] KUTATELADZE, Samson Semenovič. *Příručka sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 527 s.
- [7] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [8] ŠVÉDOVÁ, Jarmila. *Technické textilie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 453 s.
- [9] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-8592-072-7.
- [10] ŠORIN, S. *Sdílení tepla: přel. z rus. orig.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 398 s.
- [11] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. *Experimentální metody v technice prostředí*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, 1997, 215 s. ISBN 80-2140-970-3.
- [12] MLÁDEK, Milan, Ferdinand LANGMAIER a Martina LEDVINKOVÁ. *Nauka o materiálech (pro kožedělnou výrobu)*. Vyd. 1. Zlín: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta technologická ve Zlíně, 2000, 128 s. ISBN 80-2141-688-2.
- [13] KRČMA, Ladislav. *Degradace textilních vláken a ochrana proti ní*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976, 163 s.
- [14] HLADÍK, Vladimír, Zdeněk MIKLAS a Tomáš KOZEL. *Textilní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 225 s.



- [15] BLAŽEJ, Anton a Štefánia ŠUTÁ. *Vlastnosti textilných vlákien*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1982, 430 s.
- [16] INCROPERA, F.P. et. all.. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2007, 997s. ISBN 978-80-7372 170-1
- [17] ČVUT v Praze, *Katedra materiálového inženýrství a chemie*. Tepelné a akustické vlastnosti stavebních materiálů [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaIII\\_IZMA.pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaIII_IZMA.pdf)>..
- [18] Smolíková, Lenka. *Návrh vhodné skladby sendviče proti tepelným rizikům*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní
- [19] Materiály pro elektrotechniku, *Peltierův článek*. [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://studentkmt.hostuju.cz/Materialy/LS\\_2/IMPEE/IMPEE\\_Zapocet3.pdf](http://studentkmt.hostuju.cz/Materialy/LS_2/IMPEE/IMPEE_Zapocet3.pdf)>..
- [20] ČSN EN 60584-1 (25 8331). *Termoelektrické články - Část 1: Referenční tabulky*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [21] MILITKÝ, Jiří. *Technické textilie – vybrané kapitoly*. 2. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 238 s. ISBN 978-80-7372-170-1
- [22] HAGEN, Vladislav. *Únava a stárnutí materiálu*. 2. vyd. Brno: VUT, 1981, 76 s.
- [23] ČSN EN ISO 6942 (83 2744) – *Ochranné oděvy- Ochrana proti teplu a ohni – Zkušební metoda: Hodnocení materiálu a kombinací materiálů vystavených sálovému teplu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [24] ČSN EN 388 (83 2350) – *Ochranné rukavice proti mechanickým rizikům*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [25] ČSN EN 407 (83 2326) – *Ochranné rukavice proti tepleným rizikům (teplu a/nebo ohni)*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [26] ČSN EN 420 (83 2300) – *Ochranné rukavice – Všeobecné požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [27] ČSN EN 659 (83 2300) – *Ochranné rukavice pro hasiče*. Praha: Český normalizační institut, 2008
- [28] ČSN EN 702 (83 2752) – *Ochranné oděvy proti teplu a ohni – Zkušební metoda pro stanovení prostupu tepla ochranným oděvem nebo jeho materiály při dotyku*. Praha: Český normalizační institut, 1996

- [29] Holík International s.r.o.. *Zásahové rukavice pro hasiče* [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.holik-international.cz/>>.
- [30] Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky. *Elektrování těles a nové materiály*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/12-03-Hubenak.html/>>.
- [31] Odetka. *Specifikace materiálu: Nomex*. [online]. Dostupný z WWW: <[http://www.odetka.cz/net20/de/specmat\\_nomex.aspx/](http://www.odetka.cz/net20/de/specmat_nomex.aspx/)>.
- [32] Odetka. *Specifikace materiálu: Twaron*. [online]. Dostupný z WWW: <[http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_twaron.aspx/](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_twaron.aspx/)>.
- [33] Fiberlovers. *Kevlar*. [online]. Dostupný z WWW: <[http://firelovers.cz/clanky2.php?pod\\_sekce=868&sekce=8/](http://firelovers.cz/clanky2.php?pod_sekce=868&sekce=8/)>.
- [34] Kořínek, Zdeněk. *Vlákna pro kompozity* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf/>>.
- [35] ElektriKa.cz. *Principy (31.) Objev, který zrušil vzdálenosti* [online]. Dostupné z WWW: <<http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2005-02-26.6962238066/>>.
- [36] MINAŘÍK, Antonín a SMOLKA, Petr a kolektiv. *Systém pro měření odolnosti materiálů vůči účinkům sálavého tepla*. Zlín 2012 – Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Tzv.	Tak zvaně
Např.	Například
HZR	Hasičská zásahová rukavice
R	rub
K	kraj
K	Kelvin
Pozn.	Poznámka
E	Energie [J]
h	Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s)
f	Frekvence [Hz]
c	Rychlost světla ( $3 \cdot 10^8$ m/s)
$\lambda$	Vlnová délka [nm]
m	Hmotnost
$C_p$	Tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
T	Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ , K]
$\Delta$	Změna veličiny
Q	Teplo [J]
u	Rychlost [m/s]
$\dot{Q}, \dot{q}$	Tepelný tok [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
S	Plocha [ $\text{m}^2$ ]
x	Vzdálenost [m]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\Lambda, G$	Tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
R	Tepelný odpor [ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]

$\mu$	Zaplnění [%]
$V$	Objem [ $\text{m}^3$ ]
$\rho$	Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ ]
$r, \rho$	Reflektance
$a, \alpha$	Absorptance
$t, \tau$	Transmittance
$E_0$	Zářivost černého tělesa [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$\sigma$	Stefan – Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,669\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ )
$\phi$	Zářivý tok [W]
$M_e, E$	Intenzita vyzařování, emisivita [ $\text{W}\cdot\text{m}^2$ ]
$I$	Intenzita průchodu světla [lx]
$\beta$	Absorpční koeficient [-]
$\delta, d$	Tloušťka vrstvy [m]
$I_0$	Intenzita prošlého světla při nulové tloušťce vrstvy [lx]
$\lambda_{\max}$	Vlnová délka při maximálním vyzařování tělesa [nm]
$b$	Wienova konstanta ( $b=2,898 \text{ mm}\cdot\text{K}$ )
$\varepsilon$	Emisivita tělesa [-]
$H_e$	Vyzařování zkoumaného povrchu tělesa [ $\text{W}\cdot\text{m}^2$ ]
$H_{e0}$	Vyzařování absolutně černého tělesa [ $\text{W}\cdot\text{m}^2$ ]
$R_0$	Odpor při teplotě $t_0$ [ $\Omega$ ]
$t_0$	Teplota při měření odporu $R_0$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha$	Teplotní součinitel odporu [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\rho_{el}$	Měrný elektrický odpor materiálu tělesa při $100^{\circ}\text{C}$ [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]
$M_\lambda$	Spektrální hustota [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$I$	Zářivost [ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ]

L	Zář [ $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$L_\lambda$	Spektrální hustota záře [ $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
P	Produkt
LOI	Limitní kyslíkové číslo [%]
$G_v$	Ztráty tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
PBI	Polybenzimidazol
PBO	Polyfenylenbenzobisoxazol
PUR	Polyuretan
PTFE	Polytetrafluoretylen
PAD	Polyamid
SiC	Siliciumkarbid
R	Nárůst teploty [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ]
TF( $Q_0$ )	Součinitel prostupu tepla [-]
RHTI( $Q_0$ )	Index přestupu sálavého tepla [s]
$t_{12}$	Čas nárůstu teploty o 12 $^{\circ}\text{C}$ [s]
$t_{24}$	Čas nárůstu teploty o 24 $^{\circ}\text{C}$ [s]
$Q_0$	Hustota dopadajícího tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$Q_c$	Hustota prostupujícího tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$T_m$	Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_g$	Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta t$	Rozdíl časů $t_{24}$ a $t_{12}$ [s]
P	Příkon [W]
$T_z$	Teplota topných tyčí [ $^{\circ}\text{C}$ ]
W	Práce [J]
F	Síla [N]
s	Dráha [m]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Schéma konvektivního přenosu tepla .....</i>	16
<i>Obr. 2 – Schéma vedení tepla rovinnou stěnou .....</i>	17
<i>Obr. 3 – Vedení tepla přes složenou stěnu.....</i>	18
<i>Obr. 4 – Tepelná vodivost kovů, kapalin a plynů v závislosti na teplotě.....</i>	19
<i>Obr. 5 – Vliv objemové hmotnosti a pórovitosti vláken na součiniteli tepelné vodivosti [17].....</i>	21
<i>Obr. 6 – Model elektromagnetického vlnění [35].....</i>	23
<i>Obr. 7 – Rozsah vlnových délek elektromagnetického záření .....</i>	23
<i>Obr. 8 – Rozdělení dopadající energie .....</i>	24
<i>Obr. 9 – Zrcadlový a difúzní odraz paprsku .....</i>	25
<i>Obr. 10 – Schéma pohlcení paprsku v dutině tělesa .....</i>	28
<i>Obr. 11 – Grafy závislostí emisivity pro a) šedé a b) selektivní zářiče .....</i>	28
<i>Obr. 12 - Schéma konstrukce bimetalových pásků: a) plochý nosník, b) disk, c) spirála, d) šroubovice [1] .....</i>	31
<i>Obr. 13 – Digitální teploměr s odporovým čidlem Pt100 pro měření teploty vzduchu [13].....</i>	32
<i>Obr. 14 – Pásmový pyrometr [2] .....</i>	34
<i>Obr. 15 – Termovizní kamera FLIR [2].....</i>	35
<i>Obr. 16 – Konstrukce tepelného detektoru .....</i>	37
<i>Obr. 17 – Schéma bolometru určeného pro měření tepelného toku vyvolaného zářením [13] .....</i>	40
<i>Obr. 18 – Mechanismy tepelné degradace .....</i>	45
<i>Obr. 19 – Terminační reakce termodegradace.....</i>	45
<i>Obr. 20 – Skladba hasičské zásahové rukavice .....</i>	49
<i>Obr. 21 – Schematický vzorec Kevlaru [9].....</i>	51
<i>Obr. 22 – Strukturní vzorec Nomexu [9].....</i>	52
<i>Obr. 23 – Schematický vzorec Twaronu [32] .....</i>	52
<i>Obr. 24 – Strukturní vzorec Kermelu [9].....</i>	53
<i>Obr. 25 – Strukturní vzorec PBI [9] .....</i>	53
<i>Obr. 26 – Strukturní vzorec PBI [34] .....</i>	54
<i>Obr. 27 – Strukturní vzorec polyuretanu [9] .....</i>	55
<i>Obr. 28 – Strukturní vzorec PTFE [30] .....</i>	56

<i>Obr. 29 – Měřicí zařízení se všemi komponenty [36]</i> .....	59
<i>Obr. 30 – Přístroj měřící aktuální dodávaný příkon s regulátorem</i> .....	59
<i>Obr. 31 – Zdroj sálání</i> .....	60
<i>Obr. 32 – Držák zkušebních vzorků určený pro metodu A</i> .....	61
<i>Obr. 33 – Držák zkušebních vzorků určený pro metodu B</i> .....	61
<i>Obr. 34 – Držák zkušebních vzorků s kalorimetrem a nosnou konstrukcí</i> .....	61
<i>Obr. 35 – Základová nosná deska kalorimetru</i> .....	62
<i>Obr. 36 – Základová nosná deska s kalorimetrem</i> .....	62
<i>Obr. 37 – Pyrometr Testo 845</i> .....	63
<i>Obr. 38 – Ofukovací pistole</i> .....	64
<i>Obr. 39 – Upínací spona se závažím</i> .....	65
<i>Obr. 40 – Hovězinová lícová useň</i> .....	67
<i>Obr. 41 – Hovězinová štípaná useň</i> .....	68
<i>Obr. 42 – Aramidová úplet se silikonovým zátěrem – lícová a rubová strana</i> .....	68
<i>Obr. 43 – Pletenina ze směsi aramidů a PAD se silikonovým povrstvením – lícová a rubová strana</i> .....	68
<i>Obr. 44 – Nomex</i> .....	69
<i>Obr. 45 – PBI – světlý a tmavý typ</i> .....	69
<i>Obr. 46 – Netkaná aramidová textilie</i> .....	70
<i>Obr. 47 – PUR membrána</i> .....	70
<i>Obr. 48 – Aramidová podšívka – lícová a rubová strana</i> .....	71
<i>Obr. 49 – Kevlarová podšívka</i> .....	71
<i>Obr. 50 – Graf kalibrace tepelného toku</i> .....	76
<i>Obr. 51 – Graf kalibrace zdroje sálání termočlánkem a odporovým čidlem</i> .....	77
<i>Obr. 52 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování hověziny usní</i> .....	80
<i>Obr. 53 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování aramidových úpletů</i> .....	81
<i>Obr. 54 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování Nomexu</i> .....	82
<i>Obr. 55 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování PBI</i> .....	83
<i>Obr. 56 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování podšívky</i> .....	84
<i>Obr. 57 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování netkané textilie a membrány</i> .....	85

<i>Obr. 58 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování skladeb s aramidovou podšívkou se všemi vrchovými vrstvami .....</i>	89
<i>Obr. 59 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování skladeb s aramidovou a Kevlarovou podšívkou s Nomexem ve vrchní vrstvě.....</i>	90
<i>Obr. 60 – Ukázka pořadí vrstev ve vrchové a dlaňové části HZR.....</i>	91
<i>Obr. 61 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování dlaňových skladeb.....</i>	92
<i>Obr. 62 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s aramidovým úpletem se silikonovým zátěrem ve vrchní vrstvě .....</i>	95
<i>Obr. 63 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s PBO ve vrchní vrstvě .....</i>	96
<i>Obr. 64 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s Twin System Twill ve vrchní vrstvě.....</i>	97
<i>Obr. 65 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování materiálových sendvičů s Nomexem ve vrchní vrstvě .....</i>	98
<i>Obr. 66 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování zkušebních skladeb .....</i>	100
<i>Obr. 67 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování zkušebních skladeb .....</i>	101
<i>Obr. 68 – Nejméně degradovaná vrstva – Kevlarová podšívka .....</i>	103
<i>Obr. 69 – Nejvíce degradované vrstvy – hověžinová lícová useň z rubu a Nomex OT z rubu.....</i>	104
<i>Obr. 70 – Nejvíce degradovaná kompozice – skladba G.....</i>	106
<i>Obr. 71 – Nejméně degradovaná kompozice – skladba O.....</i>	108
<i>Obr. 72 – Graf závislosti nárůstu teploty kalorimetru na čase při testování PBI .....</i>	109



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 – Veličiny v pyrometrii [2]</i> .....	35
<i>Tab. 2 – Hodnoty LOI pro různé typy vláken [21]</i> .....	47
<i>Tab. 3 – Úrovně (třída) provedení pro radiační (sálavé) teplo [25]</i> .....	66
<i>Tab. 4 – Označení použitých typů materiálů</i> .....	72
<i>Tab. 5 – Skladby HZR</i> .....	73
<i>Tab. 6 – Materiálové sendviče HZR od fy Holik International</i> .....	74
<i>Tab. 7 – Zkušební kompozice HZR</i> .....	74
<i>Tab. 8 – Kalibrace tepelného toku</i> .....	75
<i>Tab. 9 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla jednotlivých vrstev</i> .....	78
<i>Tab. 10 – Hodnoty časů <math>t_{12}</math>, <math>t_{24}</math> a <math>\Delta t</math> jednotlivých vrstev hasičských zásahových rukavic</i> .....	79
<i>Tab. 11 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla vrchových skladeb HZR</i> .....	87
<i>Tab. 12 – Hodnoty časů <math>t_{12}</math>, <math>t_{24}</math> a <math>\Delta t</math> vrchových skladeb HZR</i> .....	88
<i>Tab. 13 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla dlaňových skladeb HZR</i> .....	91
<i>Tab. 14 – Hodnoty časů <math>t_{12}</math>, <math>t_{24}</math> a <math>\Delta t</math> dlaňových skladeb HZR</i> .....	92
<i>Tab. 15 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla testování materiálových sendvičů HZR</i> .....	93
<i>Tab. 16 – Hodnoty časů <math>t_{12}</math> a <math>t_{24}</math> materiálových sendvičů HZR</i> .....	94
<i>Tab. 17 – Hodnoty časů <math>\Delta t</math> materiálových sendvičů HZR</i> .....	94
<i>Tab. 18 – Hodnoty prostupujícího tepelného toku a součinitele prostupu tepla zkušebních skladeb</i> .....	99
<i>Tab. 19 – Hodnoty časů <math>t_{12}</math>, <math>t_{24}</math> a <math>\Delta t</math> dlaňových skladeb HZR</i> .....	99
<i>Tab. 20 – Stupně odolnosti materiálů vůči sálavému teplu</i> .....	102
<i>Tab. 21 – Hodnocení tepelné degradace jednotlivých vrstev</i> .....	103
<i>Tab. 22 – Hodnocení tepelné degradace tepelně izolačních kompozic</i> .....	106
<i>Tab. 23 – Hodnocení tepelné degradace kompozic méně tepelně odolných materiálů</i> .....	107