



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPELNÉHO ODPORU RUKAVIC

APPARATUS FOR MEASURING THE THERMAL RESISTANCE OF THE GLOVES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Pelikán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jakub Pelikán**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPELNÉHO ODPORU RUKAVIC

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V moderní společnosti je kladen velký důraz na ochranu zdraví při práci. Zaměstnanci jsou vybavováni ochrannými prostředky, které mají zamezit poškození jejich zdraví, avšak vybrat vhodný ochranný prostředek není vždy jednoduché. Proto byla vytvořena řada norem a předpisů, které popisují požadavky na ochranné prostředky a způsob jejich testování, k čemuž slouží specializovaná, většinou jednoúčelová, zařízení.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je nalézt vhodné materiály pro sestavení zařízení na měření tepelného odporu rukavic.

Seznam literatury:

ČSN EN 511 (2006): Ochranné rukavice proti chladu. ÚNMZ, Praha

Incropera, F. P. (2007): Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley, New York.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce řeší dnes již zcela běžnou problematiku ochrany zdraví při práci. Konkrétně ochranu lidské ruky při práci v extrémně chladném prostředí. Jedná se o rozbor materiálu vhodného pro sestavení umělé ruky, schopné měřit tepelný odpor rukavic.

Byl proveden rozbor řady materiálů, které disponují vhodnými tepelně vodivými vlastnostmi. Každý typ topného segmentu byl experimentálně testován a byla posuzována vhodnost použití pro naši aplikaci. Experimenty probíhaly vždy zahřátím vzorku pomocí elektrického proudu a následným zkoumáním teplotních polí na povrchu topného segmentu. Teplotní pole byla zaznamenávána termokamerou.

Při zkoumání kompozitních tkanin jsme nedosáhli žádných uspokojivých výsledků, které by bylo možné použít pro sestavení umělé ruky. Naproti tomu kaptonová fólie podávala velice zajímavé výsledky, a proto bychom ji nakonec doporučili. Kaptonovou fólii je nutné upravit dle způsobu uvedeného v závěru práce.

Tato práce dává jasný přehled a inspiraci pro další zkoumání variant řešení přístroje vhodného pro měření tepelného odporu rukavic. Najde efektivní využití ve výzkumných ústavech i ve společnostech, které se zabývají výrobou ochranných oděvů.

ABSTRACT

This thesis deals with common problem health protection at work. Namely hand protection during the work in very cold environment. It's an analysis of materials suitable for apparatus used for measuring the thermal resistance of the gloves.

There was analysed a range of materials. Every single sample was tested for heat conductivity and afterwards was assessed the suitability of materials. Heat was generated by electricity. Ocured heat fields was assessed with thermocamera.

After performed experiments of carbon fiber we haven't reached any satisfying results which we could use for manufacturing of this device. On the other hand kapton film has given very interesting results which we would recommend eventually. Kapton film needs to be modify according to the method listed in the conclusion.

This thesis gives us a clear overview and inspiration for additional research of this device. It finds it's place in research facilities and companies manufacturing protective clothing.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přenos tepla, tepelný odpor, kondukce tepla, vedení tepla, teplotní pole, emisivita, termokamera, rukavice, ochranné oděvy, uhlíková tkanina.

KEYWORDS

Heat transfer, thermal resistance, heat conduction, thermal field, emissivity, thermocamera, gloves, protective clothing, carbon fiber.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PELIKÁN, J. *Zařízení pro měření tepelného odporu rukavic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Zařízení pro měření tepelného odporu rukavic, vypracoval samostatně ve spolupráci s mým vedoucím práce, na základě odborné literatury uvedené v práci.

Jakub Pelikán, 20. května 2016 v Brně

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této práce Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D., který mi poskytl cenné rady a byl mi nápomocen při vypracování experimentů a tvorbě diplomové práce jako celku.

Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým, kteří mi byli oporou v těžkých chvílích.

OBSAH

ÚVOD	13
1 TEPELNÝ KOMFORT	15
1.1 TEPELNÁ ROVNOVÁHA	15
1.2 PŘENOS TEPLA VEDENÍM	17
1.3 PŘENOS TEPLA KONVEKČÍ.....	18
1.4 PŘENOS TEPLA RADIACÍ	20
1.5 PŘENOS TEPLA VYPAŘOVÁNÍM POTU	22
1.6 PŘENOS TEPLA DÝCHÁNÍM	23
1.7 PŘENOS TEPLA ODĚVEM	23
2 TEPELNÝ ODPOR.....	25
2.1 SLOŽENÁ STĚNA	26
2.2 KONTAKTNÍ ODPOR	27
3 RUKAVICE DO CHLADU A JEJICH ZKOUŠENÍ	29
3.1 HODNOCENÍ RUKAVIC	29
3.2 POŽADAVKY NA PROVEDENÍ RUKAVIC	30
3.2.1 <i>Požadavky na mechanické vlastnosti.....</i>	<i>30</i>
3.2.2 <i>Chování při ohybu</i>	<i>30</i>
3.2.3 <i>Propustnost vody</i>	<i>30</i>
3.2.4 <i>Zkouška flexibility při extrémním chladu</i>	<i>30</i>
3.2.5 <i>Konvekční chlad.....</i>	<i>31</i>
3.2.6 <i>Kontaktní chlad</i>	<i>31</i>
3.3 METODY ZKOUŠENÍ RUKAVIC.....	31
3.3.1 <i>Klimatizování.....</i>	<i>32</i>
3.3.2 <i>Chování při ohybu</i>	<i>32</i>
3.3.3 <i>Propustnost vody</i>	<i>32</i>
3.3.4 <i>Zkouška flexibility při extrémním chladu</i>	<i>33</i>
3.3.5 <i>Konvekční chlad.....</i>	<i>33</i>
3.3.6 <i>Kontaktní chlad</i>	<i>34</i>
3.4 POPIS ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ	34
4 KLIMATIZOVANÁ KOMORA PRO TESTOVÁNÍ RUKAVIC.....	37
4.1 NÁVRH KONCEPCE KLIMATIZOVANÉ KOMORY	39

4.1.1	Výparník.....	40
4.1.2	Kompresor	41
4.1.3	Kondenzátor (srážník).....	41
4.1.4	Expanzní ventil.....	41
4.1.5	Popis funkce uzavřeného chladícího okruhu	41
4.2	SPECIFIKACE TEPLONOSNÉ LÁTKY	43
5	ZKUŠEBNÍ MODEL RUKY	45
5.1	PŘÍPRAVA TOPNÝCH SEGMENTŮ DLE NORMY ČSN EN 511.....	46
5.1.1	Grafitový prášek	46
5.1.2	Měděný prášek	46
5.1.3	Hliníkový prášek.....	47
5.1.4	Napájení topného segmentu	49
5.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	55
5.2.1	Měření topného segmentu typu O – čistá tkanina.....	57
5.2.2	Měření topného segmentu typu E – čistý epoxid	58
5.2.3	Měření topného segmentu typu G – epoxid s grafitem.....	59
5.2.4	Měření topného segmentu typu M – epoxid s mědí.....	60
5.2.5	Měření topného segmentu typu H – epoxid s hliníkem.....	61
5.3	POROVNÁNÍ VARIANT NAPÁJENÍ	61
5.3.1	Napájení topného segmentu pomocí vodivé pásky.....	61
5.3.2	Další provedené experimenty	64
	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	77

ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz na ochranu zdraví při práci. Pro naši aplikaci je charakteristická práce v extrémně chladném prostředí. Zaměříme se na ochranu rukou pracovníků. Tato problematika s sebou nese řadu otázek, např. jak vybrat vhodný typ ochranných prostředků. V běžné praxi je tato úloha řešena velmi drahými jednoúčelovými zařízeními. Naším úkolem bude zamyslet se nad možnostmi výroby takového zařízení.

Předmětem této diplomové práce je provést analýzu materiálů vhodných k sestavení zařízení pro měření tepelného odporu rukavic. Jedná se o aparát, který stanovuje množství metabolického tepelného toku odvedeného z povrchu lidské ruky vlivem termoregulace lidského těla a vlivem mechanismů přestupu tepla v extrémně chladných podmínkách. Rukavice zde slouží jako vložený odpor, který tento ztrátový tepelný tok snižuje na minimum a zabraňuje tedy snížení teploty konečků prstů pod kritickou hranici. Právě prsty jsou nejvíce náchylným místem z hlediska poklesu teploty.

Za efektivitu, se kterou rukavice ovlivňují množství odvedeného tepelného toku, je odpovědný zejména materiál, plocha, přes kterou teplo uniká z lidské ruky, množství švů a dalších konstrukčních prvků nutných pro výrobu rukavice.

Materiál přístroje pro měření tepelného odporu rukavic je nutné navrhovat tak, aby bylo zařízení v souladu s normou ČSN EN 511, tato norma je českou verzí evropské normy EN 511:2006. Předmětem normy je specifikace požadavků a metod zkoušení rukavic chránících proti chladu až do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Norma specifikuje odolnost rukavic vůči chladu sdílenému konvekcí (prouděním) a vůči chladu sdílenému kondukcí (vedením). Následně stanovuje jednotlivé třídy provedení, které jsou rozlišeny speciálními požadavky. Pro náš účel je nejdůležitější poslední část normy, která popisuje provedení zkušebního zařízení, tj. umělé ruky včetně napájecího systému. Měřicí zařízení je ekvivalentní tepelnému manekýnovi, kterého vlastní VUT v Brně, stejně tak jako klima komora, která simuluje chladné podmínky pro testování rukavic.

Toto zařízení má široké využití pro textilní společnosti, které se zabývají výzkumem nových materiálů, spojených s ochranou lidského těla před extrémními teplotními podmínkami. Dále najde uplatnění u společností přímo vyrábějících ochranné oděvy. Návrh zařízení pro měření tepelného odporu rukavic bude realizován pro potřeby určování vlastností materiálů používaných při výrobě rukavic do chladného prostředí. Rukavice budou sloužit hasičskému a záchranářskému sboru, dále vojenskému sektoru a v neposlední řadě loveckým a módním účelům. Dané typy rukavic budou vyráběny firmou Holík International, s.r.o. se sídlem ve Zlíně.



Obr. 1 Svlечený tepelný manekýn Newton [1]



Obr. 2 Oblečený tepelný manekýn Newton [1]

Tato práce má technický charakter, pro správné porozumění je tedy nezbytné nutné, aby osoba, která ji bude studovat, měla všeobecný přehled o fyzikálních mechanismech, jež doprovázejí přestup tepla. To nám také pomůže při pochopení rovnic a vztahů, které kvantifikují množství energie přenesené za jednotku času.

CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je vytvořit návrh materiálu, který bude možné použít pro výrobu umělé ruky určené pro měření tepelného odporu rukavic.

NÁSLEDUJÍCÍ DÍLČÍ CÍLE

- Shromáždit dostatečné množství potřebných informací týkajících se návrhu daného materiálu a rekapitulace aktuálních trendů používaných v měření tepelného odporu oděvů.
- Na základě získaných požadavků zvolit typ řešení, kterým se budeme zabývat v další fázi diplomové práce.
- Definování podmínek, za kterých bude zařízení schopno pracovat a podávat vypovídající výsledky.
- Návrh koncepce klimatizační komory.
- Sestrojení topných segmentů.
- Provedení analýzy jednotlivých topných segmentů.
- Zhodnocení použitelnosti v praxi pro daný typ řešení.

1 TEPELNÝ KOMFORT

Jako zdroj pro přesné vysvětlení tepelného komfortu a tepelné rovnováhy byla použita publikace *Technika prostředí*, sepsaná docentkou Janotkovou. Přesněji její online verze dostupná na stránkách VUT v Brně. Zdroj je značený jako [2] v seznamu použitých zdrojů.

Tepelná pohoda prostředí se také někdy nazývá pohoda tepelně vlhkostní a někdy také tepelný komfort. Obvykle tento pojem definujeme jako subjektivní pocit spokojenosti člověka s tepelným stavem prostředí, nebo také s tepelně vlhkostním mikroklimatem. Další definice, která přichází v úvahu, plyne z normy ČSN EN ISO 7730 a její znění je následující: „*Tepelný komfort je definován jako stav mysli vyjadřující uspokojení s tepelným prostředím.*“ Platnosti výše zmíněných definic je možné dosáhnout pouze tehdy, pokud je splněna rovnováha tepelného režimu člověka, nutná k udržení stálé teploty lidského těla, která u zdravého jedince činí $36,5 \pm 0,5$ °C, a proto musí být teplo odváděné do okolí. K přenosu tepla do okolí dochází vedením, konvekcí, radiací, vypařováním, dýcháním a velikost přenosu tepla ovlivňuje termoregulační centrum těla.

Z lidského těla se odvádí metabolické teplo (metabolický tepelný tok) \dot{Q}_m , aby byla zajištěna stálá teplota lidského těla. Metabolické teplo vzniká v lidském těle vlivem látkových přeměn, které také můžeme nazývat jako biochemické oxidační pochody. Lidské tělo automaticky reguluje množství odváděné energie, a to především na základě lidské činnosti a hmotnosti člověka. Tato energie se z větší části přenáší do okolí ve formě tepla ($90 \div 100$ %) a jen minimálně formou mechanické práce ($10 \div 0$ %).

1.1 Tepelná rovnováha

Podmínkou tepelné rovnováhy člověka je, aby energie produkovaná v těle, zmenšená o energii přenášenou formou mechanické práce konané člověkem, byla rovna energii odvedené z lidského těla formou tepla do okolí vedením, konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním. Tepelnou rovnováhu lze vyjádřit rovnicí:

$$\dot{Q}_m (1 - \eta) = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d \quad [\text{W}] \quad (1.1),$$

kde:

\dot{Q}_m	metabolický tepelný tok	[W]
η	mechanická účinnost lidského těla	[-]
\dot{Q}_{ved}	tepelný tok odvedený vedením tepla	[W]
\dot{Q}_k	tepelný tok odvedený konvekcí	[W]
\dot{Q}_r	tepelný tok odvedený radiací	[W]
\dot{Q}_v	tepelný tok odvedený vypařováním	[W]
\dot{Q}_d	tepelný tok odvedený dýcháním	[W]

Metabolický tepelný tok lze vyjádřit rovnicí:

$$\dot{Q}_m = \dot{q}_m \cdot S_T \quad [\text{W}] \quad (1.2),$$

kde:

\dot{q}_m	hustota metabolického tepelného toku	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
S_T	plocha povrchu těla	$[\text{m}^2]$

Plocha povrchu těla pro průměrného dospělého muže se uvažuje $S_T = 1,9 \text{ m}^2$ a pro průměrnou ženu $S_T = 1,75 \text{ m}^2$. Pokud podmínky vyžadují přesnější určení povrchu těla, tak lze využít vztahu:

$$S_T = 0,202 \cdot m_{cl}^{0,425} \cdot h_{cl}^{0,725} \quad [\text{m}^2] \quad (1.3),$$

kde:

m_{cl}	hmotnost člověka	$[\text{kg}]$
h_{cl}	výška člověka	$[\text{m}]$

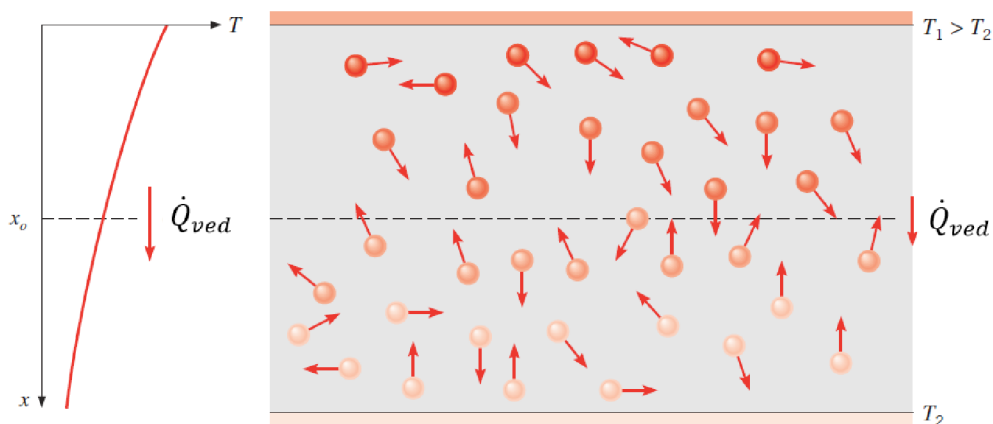
Uvažujeme-li stojícího člověka, který se nepohybuje, tak tepelný tok přenášený vedením přes chodidla je téměř zanedbatelnou položkou. Plocha styku chodidel s podlahou je ve srovnání s povrchem těla, přes který se realizuje přenos tepla ostatními principy, velmi malá. Vzhledem k tomu, že mechanická účinnost lidského těla nabývá hodnot okolo 20 %, lze ve většině případů předpokládat, že všechnu energii uvolňovanou z lidského těla je nutno přenášet z těla konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním. Při zanedbání přestupu tepla kondukcí a mechanické účinnosti lidského těla, můžeme výsledný vztah pro tepelnou bilanci upravit na následující tvar:

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d \quad [\text{W}] \quad (1.4)$$

Pro popis základních mechanismů přenosu tepla bylo využito anglické publikace uvedené jako zdroj [3], tedy *Fundamentals of Heat and Mass transfer*. Další využívanou publikací byla skripta *Přenos tepla a látky*, viz. zdroj č. [4].

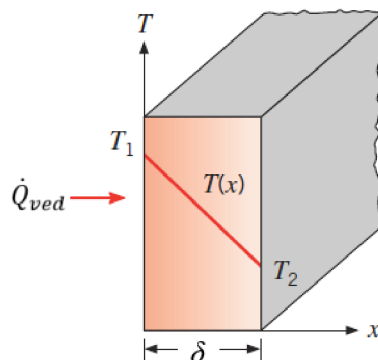
1.2 Přenos tepla vedením

Význam slova vedení by nám měl ihned zavést do podvědomí procesy na bázi molekulární aktivity, protože vedení tepla funguje na těchto úrovních fyzikálních procesů. Přenos tepla vedením si můžeme představit jako přenos energie z více energických na méně energické částice prvku, vlivem jejich vzájemných interakcí. Uvažujme plyn, ve kterém existuje rozdíl teplot, a tento plyn vyplňuje prostor mezi dvěma povrchy, jež jsou také udržovány na rozdílných teplotách (viz obr. 1.1).



Obr. 1.1 Vedení tepla vlivem molekulární aktivity [3]

V jakémkoli bodě spojujeme teplotu s energií molekul plynu, tato energie je vztažena k náhodnému translačnímu pohybu, jako jsou například vibrace molekul plynu. Vyšší teploty jsou spojeny s vyšší energií molekul. Když se sousedící molekuly střetnou, tak jako tomu je stále, nastává přenos energie z více energické na méně energickou částici. V přítomnosti teplotního gradientu se přenáší energie ve směru klesající teploty. Tento princip funguje také v kapalinách a pevných tělesech, kde jsou interakce mezi molekulami mnohem silnější než v plynu.



Obr. 1.2 Vedení tepla 1D stěnou [3]

Přenos tepla vedením je kvantifikován Fourierovým zákonem, pro jedno-prostorovou stěnu (viz. obr. 1.2) popisuje šíření teploty ve směru osy x následující vztah:

$$|\dot{Q}_{ved}| = S \cdot \lambda \cdot \frac{|\Delta T|}{\delta} \quad [\text{W}] \quad (1.5),$$

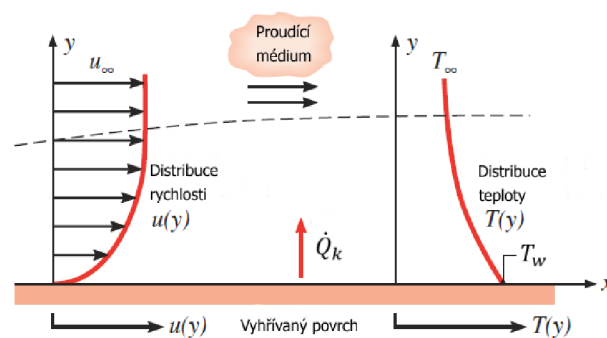
kde:

S	plocha, přes kterou se realizuje přestup tepla	$[\text{m}^2]$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ΔT	rozdíl teplot T_1 a T_2	$[\text{K}]$
$T_{(x)}$	změna teploty v závislosti na tloušťce stěny	$[\text{K}]$
δ	tloušťka stěny (respektive oděvu)	$[\text{m}]$

1.3 Přenos tepla konvekcí

Přenos tepla prouděním lze prezentovat jako teplo, odebrané člověku mechanismem přestupu tepla zvaným konvekce, neboli proudění okolního plynu nebo kapaliny. Konvektivní přenos tepla se řídí Newtonovým ochlazovacím zákonem. Toto proudění je doprovázeno faktem, že v jakémkoli okamžiku se molekuly proudícího média pohybují společně. Takovýto pohyb společně s existencí teplotního gradientu přispívá k přestupu tepla. Protože molekuly jako celek udržují náhodný pohyb, tak celkový přestup tepla je vlivem superpozice energie přenášen náhodným pohybem molekul a také pohybem objemu proudícího média.

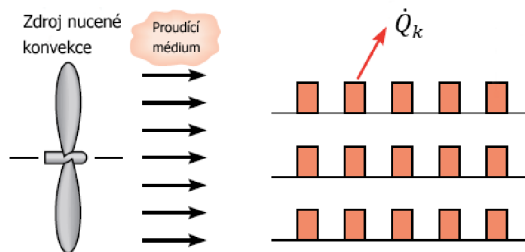
Přenos tepla konvekcí nastává mezi proudícím médiem a mezní vrstvou, pokud mají rozdílné teploty. Uvažujme proudění media přes vyhřívanou plochu (viz. obr. 1.3).



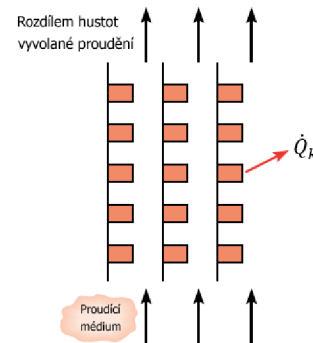
Obr. 1.3 Vyvíjející se mezní vrstvy při konvekcí [3]

$u_{(y)}$	velikost rychlosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$T_{(y)}$	velikost teploty v závislosti na vzdálenosti od povrchu	$[\text{K}]$

Následkem interakce proudícího média s povrchem se vyvíjí mezní vrstva v médiu, kde se rychlost mění od nuly k hodnotě u_∞ . Tento region se nazývá hydrodynamická nebo rychlostní mezní vrstva. Naproti tomu, pokud se liší teploty povrchu a proudícího média, tak vzniká v proudu oblast, přes kterou se mění teplota od T_w na $y = 0$ až k T_∞ . Tato oblast se nazývá teplotní mezní vrstva.



Obr. 1.4 Nucená konvekce [3]



Obr. 1.5 Přirozená konvekce [3]

Přenos tepla konvekcí můžeme dělit podle povahy proudění. Mluvíme tedy o nucené a přirozené konvekci. Nucená konvekce vzniká při působení vnějšího vlivu, dejme tomu od větráku, který nuceným prouděním ochlazuje např. tištěný spoj. Na druhé straně existuje konvekce přirozená, jež vzniká kvůli rozdílu hustot proudícího média vlivem teplotního gradientu. Další speciální typy konvekce jsou kondenzace a var. Těmi se ale v této práci zabývat nebudeme, protože nemají zřejmou souvislost s diskutovaným tématem.

Tepelný tok odebraný z vnějšího povrchu oblečeného člověka do okolního vzduchu konvekcí je dán vztahem:

$$\dot{Q}_k = \alpha \cdot S_{cl} \cdot (T_w - T_\infty) \quad [\text{W}] \quad (1.6),$$

kde,

α	součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
S_{cl}	povrch oblečeného člověka	$[\text{m}^2]$
T_w	střední teplota vnějšího povrchu oděvu	$[\text{K}]$
T_∞	teplota okolního vzduchu	$[\text{K}]$

Při určování povrchu oblečeného člověka je nutné využít přepočít pomocí poměru povrchu oblečeného člověka k povrchu lidského těla, dle rovnice:

$$S_{cl} = f_{cl} \cdot S_T \quad [\text{W}] \quad (1.7),$$

kde,

f_{cl}	poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu lidského těla, tento poměr je závislý na druhu oděvu	[-]
S_T	plocha povrchu těla	[m ²]

1.4 Přenos tepla radiací

Teplotní radiace je energie vyzařovaná hmotou, která má nenulovou teplotu. Ačkoli se ve většině případů zabýváme radiací z pevného povrchu, tak vyzařování může za určitých podmínek nastat také z kapalin a plynů. Energie spojená s radiací je přenášena pomocí elektromagnetických vln (fotonů). Z toho plyne, že když přenos tepla vedením a konvekcí vyžadují přítomnost média, tak přenos tepla radiacním mechanismem žádné médium nevyžaduje. Díky absenci média je zřejmé, že přenos tepla radiací je nejvíce efektivní ve vakuu.

U chladných těles se velice často tepelný tok radiací zanedbává, protože oproti konduktivnímu a konvektivnímu přenosu tepla bývá zanedbatelný. Nicméně u těles s vysokou teplotou, které mají vakuovou izolaci, se stává zářivý přenos tepla dominantním.

Maximální hodnota zářivosti (hustoty zářivého tepelného toku) nastává u absolutně černého tělesa, někdy nazýváme takové těleso ideální zářič. Tato hodnota může být určena pomocí Stefan-Boltzmanova zákona, který má následující tvar:

$$E_0 = \sigma \cdot T_w^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.8),$$

kde:

σ	Stefan-Boltzmanova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]
T_w	střední radiační teplota	[K]

U reálného povrchu ovlivňují hodnotu vyzářené/pohlčené energie radiační vlastnosti povrchu, jinak zvané také jako emisivita ε . Její hodnoty se pohybují v intervalu $0 \leq \varepsilon \leq 1$, tyto vlastnosti nám poskytují představu o tom, jak efektivně povrch vyzařuje/pohlcuje energii.

ENERGETICKÁ BILANCE DOPADAJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Při dopadu hustoty zářivého tepelného toku na těleso může dojít k pohlcení, odrazu, či k průchodu tohoto toku. Pro energetickou bilanci platí vztah:

$$\dot{E} = \dot{E}_a + \dot{E}_r + \dot{E}_t \quad [\text{W}] \quad (1.9),$$

pokud rovnici, č. 1.9, podělíme zářivým tokem, obdržíme:

$$1 = \frac{\dot{E}_a + \dot{E}_r + \dot{E}_t}{\dot{E}} \quad [-] \quad (1.10),$$

úpravou potom dostaneme 1. Kirchhoffův zákon:

$$a + r + t = 1 \quad [-] \quad (1.11).$$

Jedná se o zákon zachování energie, kde platí:

- Absorptance a energie pohlcená v tělese
- Reflektance r energie odražená od tělesa
- Transmittance t energie, která projde tělesem

Pro případ šedého, průsvitného tělesa platí vztah 1.11, tedy 1. Kirchhoffův zákon.

Naproti tomu pro AČT (absolutně černé těleso) platí:

$$a = 1 \quad [-] \quad (1.12)$$

$$r = t = 0 \quad [-] \quad (1.13).$$

Pro dokonale bílé těleso platí:

$$r = 1 \quad [-] \quad (1.14)$$

$$a = t = 0 \quad [-] \quad (1.15).$$

Pro dokonale transparentní těleso, často bývá označováno průteplivé těleso platí:

$$t = 1 \quad [-] \quad (1.16)$$

$$a = r = 0 \quad [-] \quad (1.17).$$

Žádný z případů $a=1$, $r=1$ ani $t=1$ v reálné praxi neexistuje.

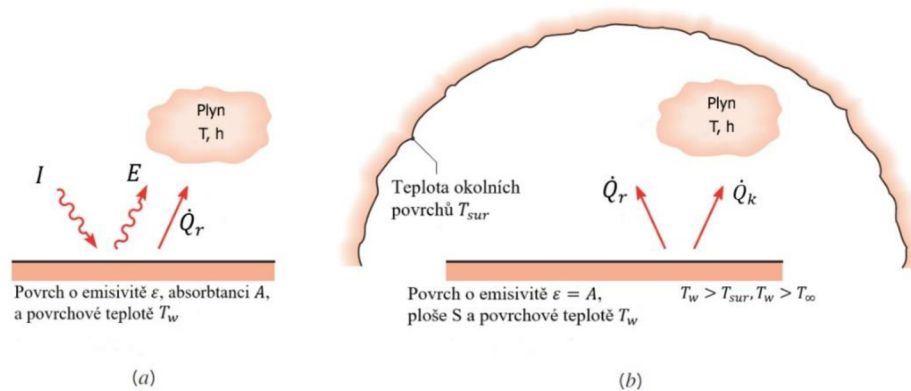
Abychom mohli Stefan-Boltzmannův vztah použít pro náš případ, tj. pro ruku potaženou rukavicí, tak je nutno jej upravit na následující tvar:

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S_r \cdot (T_w^4 - T_{sur}^4) \quad [W] \quad (1.18),$$

kde:

ε poměrná zářivost mezi povrchem těla a okolními stěnami [-]

S_r	povrch lidského těla přenášející teplo radiací	[m ²]
T_w	teplota povrchu člověka	[K]
T_{sur}	střední radiální teplota, teplota všech okolních povrchů	[K]



Obr. 1.6 Radiální výměna: a) na povrchu, b) mezi povrchem a rozlehlým okolím [3]

Následující dva mechanismy, figurující v rovnici tepelné rovnováhy, jsou přenos tepla vypařováním potu a přenos tepla dýcháním. Tyto dva typy odvodu tepelného toku z těla jsou ve své podstatě kombinace předešlých tří mechanismů přestupu tepla. Uvedeme si vztahy pro jejich výpočet, ale nebudeme podrobněji rozebírat jejich fyzikální podstatu, protože to jsme již učinili v kapitolách 1.2, 1.3 a 1.4. Použitým zdrojem pro kapitoly 1.5, 1.6 a 1.7 byla publikace uvedena pod zdrojem č. [3].

1.5 Přenos tepla vypařováním potu

Tepelný tok, odvedený z lidského těla pocením, se dělí na dvě části a je roven jejich součtu. Jedná se o tepelný tok odvedený suchým pocením, tzv. difúzní tepelný tok \dot{Q}_{vs} . Jako druhý vstupuje do této rovnice tepelný tok odvedený mokřým pocením, respektive viditelným odpařováním potu \dot{Q}_{vm} . Celkový odvod tepla vypařováním potu potom určíme ze vztahu: [2]

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_{vs} + \dot{Q}_{vm} \quad [\text{W}] \quad (1.19)$$

Tepelný tok odvedený suchým vypařováním lze určit následovně:

$$\dot{Q}_{vs} = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot S_T \cdot (p_{p'(tk)}'' - p_{p(t)}) \quad [\text{W}] \quad (1.20),$$

kde:

$p_{p'(tk)}''$	parciální tlak sytých vodních par při střední teplotě pokožky t_k	[Pa]
$p_{p(t)}$	parciální tlak vodních par v okolním vzduchu závislý na teplotě okolního vzduchu t a relativní vlhkosti okolního vzduchu φ	[Pa]

Tepelný tok, odváděný z těla mokrým pocením, je jeden z nejdůležitějších mechanismů tepelné regulace lidského těla a jeho intenzita se liší podle aktuální potřeby lidského těla k udržení stálé teploty.

1.6 Přenos tepla dýcháním

Množství vdechovaného vzduchu se liší u každého jedince, a také je závislé na intenzitě fyzické činnosti. Vzduch se v plicích ohřívá na teplotu $34 \div 36 \text{ }^\circ\text{C}$ a ve stejném okamžiku se sytí vodní parou. Z toho plyne, že tepelný tok odvedený dýcháním je roven součtu tepla potřebného k ohřátí vzduchu a k odpaření vodní páry z plic, jak je uvedeno ve vztahu níže: [2]

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_{vzd} \cdot c_p \cdot (t_v - t) + \dot{m}_{vzd} \cdot l_{23} \cdot (x'' - x) \quad [\text{W}] \quad (1.21),$$

kde:

\dot{m}_{vzd}	hmotnostní tok vzduchu plicemi	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
t_v	teplota vydechovaného vzduchu	$[\text{ }^\circ\text{C}]$
l_{23}	měrné výparné teplo vody	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
x''	měrná vlhkost vydechovaného a vlhkostí nasyceného vzduchu	$[\text{kg}\cdot\text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}]$
x	měrná vlhkost vdechovaného vzduchu	$[\text{kg}\cdot\text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}]$

1.7 Přenos tepla oděvem

Prostup tepla oděvem významně ovlivňuje tepelný odpor oděvu. Zařízení, které je předmětem této práce, má za úkol tento odpor stanovit. Pro tepelný odpor oděvu se používá také bezrozměrná veličina I_{cl} , pro niž se zavedla jednotka [clo], která odpovídá tepelnému odporu $0,155 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Tepelný odpor oděvu závisí především na jeho členitosti, tj. na počtu vrstev, ze kterých se skládá. Tepelný tok, přenášený konvekcí a radiací z povrchu oblečeného člověka, prostupuje oděvem, což vyjadřuje rovnice: [2]

$$\dot{Q}_k + \dot{Q}_r = \frac{S \cdot (t_k - t_p)}{R_{cl}} \quad [\text{W}] \quad (1.22),$$

kde:

R_{cl}	tepelný odpor oděvu	$[\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$
----------	---------------------	---

Tab. 1.1 Tepelný odpor pro některé druhy oděvů [2]

Druh oděvu	R_{cl} [m ² ·K·W ⁻¹]	I_{cl} [clo]	f_{cl} [-]
<u>Jednovrstvý lehký</u> (spodní prádlo, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, lehké ponožky a boty)	0,080	0,5	1,1
<u>Dvouvrstvý</u> (spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty)	0,110	0,7	1,1
<u>Třívrstvý</u> (spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, pracovní blůza, ponožky, boty)	0,155	1,0	1,15
<u>Čtyřvrstvý</u> (spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, sako, svrchník, ponožky, boty)	0,230	1,5	1,2

2 TEPELNÝ ODPOR

Informace pro interpretaci tepelného odporu byly získány z publikací č. [3], [6] a [7].

Při přestupu tepla existuje analogie s šířením elektrického proudu. Lze tedy pro určení hodnoty přestupu tepla využít stejné principy, jako při řešení fyzikálních zákonů platných pro elektrické aplikace. S výhodou můžeme uplatnit Ohmův zákon k přepisu Fourierova zákona, pro vyjádření tepelného toku vedením jednoduchou stěnou potom platí:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{ved}} \quad [\text{W}] \quad (2.1),$$

kde:

ΔT	diference teplotního potenciálu	[K]
R_{ved}	tepelný odpor vedení tepla	[K·W ⁻¹]

Z rovnice 2.1 jasně plyne, že tepelný odpor pro přenos tepla vedením můžeme určit jeho prostým vyjádřením:

$$R_{ved} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{\delta}{\lambda} \quad [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.2),$$

Stejně tak pro vedení elektrického proudu lze použít analogický postup:

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad [\Omega] \quad (2.3),$$

kde:

ΔU	diference elektrického napětí	[V]
I	elektrický proud	[A]

Analogie mezi rovnicemi 2.2 a 2.3 je zřejmá. Tepelný odpor lze využít také u přenosu tepla konvekcí na povrchu obtékané stěny, dle Newtonova ochlazovacího zákona:

$$R_k = \frac{T_w - T_\infty}{\dot{Q}} = \frac{1}{\alpha} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.4),$$

kde:

R_k	Tepelný odpor konvekcí	[K·W ⁻¹]
-------	------------------------	----------------------

Protože odpor vůči přenosu tepla vedením a prouděním si lze představit jako sériově zapojené elektrické odpory, tak jejich celkovou hodnotu lze stanovit pouhým sečtením:

$$R_t = R_{ved} + R_k = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \quad [\text{K}\cdot\text{W}^{-1}] \quad (2.5),$$

Přenos tepla radiací se stává významným, pokud součinitel přestupu tepla nabývá menších hodnot, malé hodnoty součinitele přestupu tepla jsou typické pro přirozenou konvekci plynu. Tedy případ, charakteristický pro proudění vzduchu kolem povrchu rukavic. Tepelný odpor vztažený k radiaci může být definován jako:

$$R_{rad} = \frac{T_w - T_{sur}}{\dot{Q}} \quad [\text{K}\cdot\text{W}^{-1}] \quad (2.6),$$

Pro radiaci mezi povrchem a rozlehlým okolím platí, že nastávají paralelně a pokud $T_{sur}=T_{\infty}$, tak jednotlivé odpory mohou být uvažovány jako jeden.

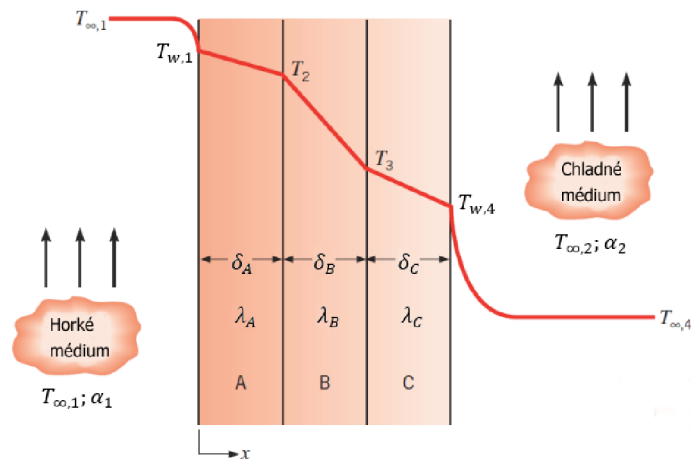
2.1 Složená stěna

Ekvivalentní tepelné okruhy mohou být také použity pro sofistikovanější systémy, jako jsou složené stěny. Takovéto stěny mohou zahrnovat řadu sériových i paralelních odporů vlivem několika vrstev různých materiálů. Představme si rozlehlou rovinnou stěnu jako na obrázku č. 2.1, zde můžeme hodnotu tepelného toku vyjádřit vztahem:

$$\dot{Q}_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\sum R_t} \quad [\text{W}] \quad (2.7),$$

kde:

$T_{\infty,1}$	teplota teplejšího média	[K]
$T_{\infty,2}$	teplota chladnějšího média	[K]
$\sum R_t$	suma odporů ovlivňujících celkový tepelný tok	[K·W ⁻¹]



Obr. 2.1 Vedení tepla složenou stěnou [3]

2.2 Kontaktní odpor

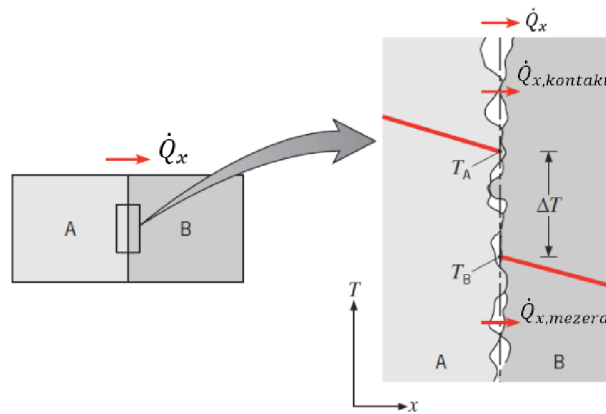
Předpoklad kontaktních odporů jsme až doteď zanedbávali. Je ale důležité si uvědomit, že ve složených stěnách nebo jiných systémech na rozhraní jednotlivých materiálů, kde jsou v přímém kontaktu jednotlivé pevné vrstvy, může být významný pokles teploty. Této změně teploty je přiřazen tzv. kontaktní odpor, který je možné určit pomocí vztahu:

$$R''_{t,c} = \frac{T_A - T_B}{\dot{Q}_x} \quad [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.8),$$

kde:

T_A	teplota teplejší vrstvy materiálu	[K]
T_B	teplota chladnější vrstvy materiálu	[K]
\dot{Q}_x	tepelný tok ve směru osy x	[W]

Existence kontaktního odporu je dána hrubostí materiálu. Kontaktní místa jsou proložena mezerami, které jsou v nejvíce případech vyplněny vzduchem. Přenos tepla je proto realizován vedením přes místa styku a také konvekcí a radiací přes vzduchové mezery. Kontaktní odpor můžeme uvažovat jako dva paralelně zapojené odpory a to díky kontaktním místům a vzduchovým mezerám. Místa styku materiálů jsou zpravidla menších rozměrů a zejména u hrubých materiálů se stává dominantní přenos tepla přes mezery na rozhraní mezi materiály.



Obr. 2.2 Pokles teploty vlivem kontaktního tepelného odporu [3]

Kontaktní tepelný odpor se dá snížit vyplněním mezer tekutinou, nicméně to u oblečení není možné reálně aplikovat. Absence tekutiny tedy snižuje přenos tepla prouděním/radiací přes mezery a tím se zvyšuje kontaktní odpor.

Jako inspirace pro kapitoly 2.2 a 2.1 byl zdroj č. [3].

3 RUKAVICE DO CHLADU A JEJICH ZKOUŠENÍ

Veškeré informace, ohledně testování rukavic, byly převzaty z literatury: [5], [8], [9], [10], [11], [12] a [13]. Obrázky a tabulky byly použity ze zdrojů [5] a [14].

Motivace pro napsání této práce vzešla z poptávky firmy Holík International s.r.o. Firma požaduje návrh zařízení pro měření tepelného odporu rukavic, které se budou používat v extrémně chladném prostředí, tj. v teplotě až $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, dle normy ČSN EN 511.

Při určování množství tepla odváděného z těla budeme kalkulovat s výše uvedenými mechanismy přenosu tepla, nicméně jak již název práce napovídá, bude v tomto výpočtu hrát nemalou roli právě tepelný odpor zkoušených materiálů.

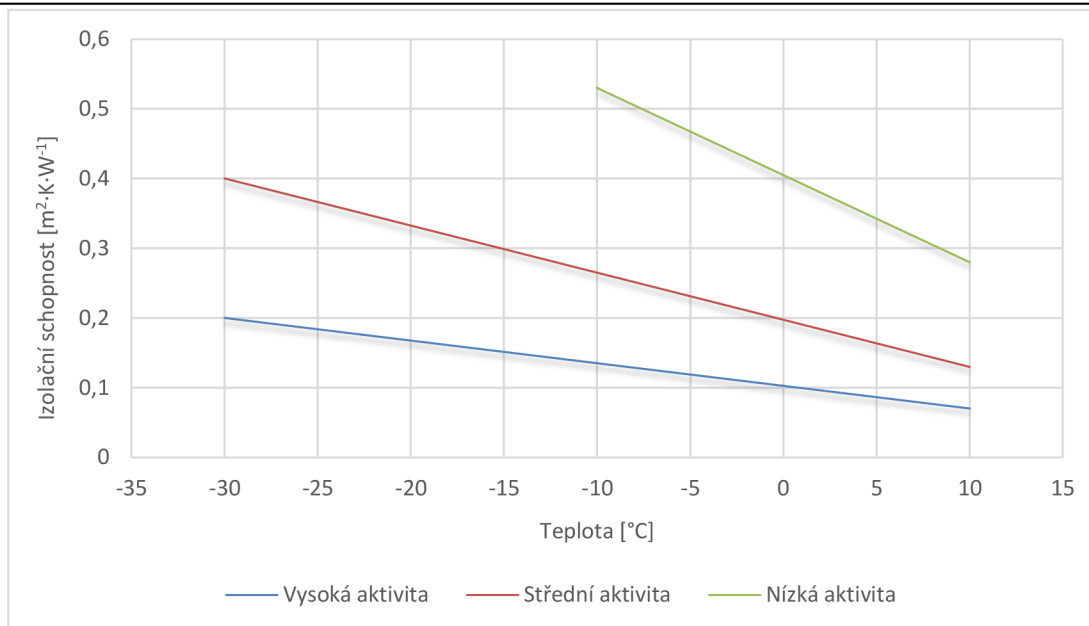
3.1 Hodnocení rukavic

Norma ČSN EN 511 říká, že rukavice je nutno hodnotit podle parametrů činnosti, kterou s nimi budeme vykonávat. Zkoušené rukavice musí splňovat všechny parametry uvedené v normě EN 420. Pro příklad uvádíme tabulku č. 3.1, kde můžeme najít některé parametry, jež bychom měli zvážit při výběru rukavice pro ochranu před chladem.

Tab. 3.1 Parametry důležité při výběrovém procesu [5]

<u>Prostředí</u>	Teplota prostředí Povětrnostní podmínky (relativní vlhkost ...) Rychlost větru
<u>Individuální kondice</u>	Zdravotní stav osoby a pocit pohody Účinnost dalšího ochranného oděvu, který má na sobě člověk
<u>Činnost</u>	Doba expozice Intenzita činnosti Požadavky na úchopovou schopnost Kontakt se studenými předměty Kontakt s mokrými nebo suchými předměty

Experimenty prokázaly souvislosti mezi parametry z tab. 3.1 a třídou tepelné izolace z tab. 3.2 a 3.3. Graf uvedený na obrázku č. 3.1 znázorňuje potřebnou úroveň tepelné izolace pro tři různé intenzity činnosti v závislosti na okolních parametrech, tj. na teplotě vzduchu a rychlosti větru, která je nižší než $0,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 3.1 Požadavky na izolační schopnost v závislosti na intenzitě práce [5]

3.2 Požadavky na provedení rukavic

Požadavky na provedení rukavic nám dávají představu o tom, v jakém musí být rukavice vyhotoveny jak po konstrukční, tak po materiálové stránce. Aby mělo zkoušení rukavic vypovídající hodnotu a aby bylo platné pro použití v praxi, musí splňovat požadavky na mechanické vlastnosti, chování při ohybu, propustnost vody a musí vykazovat stejné flexibilní vlastnosti při extrémním chladu jako při normálních teplotách.

3.2.1 Požadavky na mechanické vlastnosti

Při stanovení odolnosti proti oděru a proti dalšímu trhání musí rukavice vyhovovat alespoň třídě provedení 1 dle EN 388. Pro vymezení těchto požadavků je ale směrodatná třída ochrany rukavic proti konvekčnímu a kontaktnímu chladu.

3.2.2 Chování při ohybu

Při zkoušení ohybových vlastností rukavic se nesmí projevit žádné praskliny. Tato zkouška není nezbytná na materiálech bez nánosu.

3.2.3 Propustnost vody

Pokud není po ukončení měření zjištěn průnik vody materiálem rukavice, tak norma říká, že rukavice musí mít přiřazenu třídu provedení 1. Pokud zjistíme jakýkoli průnik vody, tak je nutné označit provedení rukavice třídou 0 a v informacích poskytovaných prodejcem musí být uvedeno, že rukavice může při promáčení ztratit své izolační vlastnosti.

3.2.4 Zkouška flexibility při extrémním chladu

V průběhu zkoušení se nesmí objevit žádné praskliny, tato zkouška musí být prováděna při teplotních podmínkách chladnějších než teplota -30 °C.

3.2.5 Konvekční chlad

Při zkoušení tepelně izolačních vlastností rukavice v souvislosti s prouděním tepla musí rukavice splňovat následující třídy provedení.

Tab. 3.2 Třídy provedení dle hodnot tepelné izolace pro konvekční chlad [5]

Třída provedení	Tepelná izolace I_{TR} [m ² ·K·W ⁻¹]
1	0,10 ≤ I _{TR} < 0,15
2	0,15 ≤ I _{TR} < 0,22
3	0,22 ≤ I _{TR} < 0,30
4	0,30 ≤ I _{TR}

Norma EN 388 předepisuje, že pro třídy provedení 2, 3 a 4 u konvekčního chladu je nutné při zkoušce oděru dosáhnout nejméně třídy provedení 2, jinak smí být pro konvekční chlad uváděna maximálně třída provedení 1.

3.2.6 Kontaktní chlad

Pro zkoušení tepelně odporových vlastností rukavice v souvislosti s vedením tepla musí rukavice splňovat následující třídy provedení.

Tab. 3.3 Třídy provedení dle hodnot tepelného odporu pro kontaktní chlad [5]

Třída provedení	Tepelná izolace R [m ² ·K·W ⁻¹]
1	0,025 ≤ R < 0,050
2	0,050 ≤ R < 0,100
3	0,100 ≤ R < 0,150
4	0,150 ≤ R

Norma EN 388 předepisuje, že pro třídy provedení 2, 3 a 4 u kontaktního chladu je nutné při zkoušce oděru dosáhnout nejméně třídy provedení 2, jinak smí být pro kontaktní chlad uváděna maximálně třída provedení 1.

3.3 Metody zkoušení rukavic

Metody zkoušení dle normy ČSN EN 511 definují přesné podmínky, ve kterých je nutné provádět konkrétní testování rukavic. Norma uvádí jednotlivé parametry zkoušení a také jejich postup.

3.3.1 Klimatizování

Vzorky testované na jednotlivé parametry, které jsou uvedeny v kapitole 3.2, vyjímaje konvekční chlad, musí být po dobu 48 hod uloženy ve standardním prostředí o následujících parametrech:

$$t_{\infty} = 23 \pm 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.1)$$

$$\varphi = 50 \pm 5 \quad [\%] \quad (3.2),$$

kde:

$$\varphi \quad \text{relativní vlhkost vzduchu} \quad [\%]$$

Zkouška by měla být, pokud možno provedena v prostředí o těchto parametrech. Pokud těchto podmínek nelze dosáhnout, tak je nutné, aby bylo testování provedeno nejpozději do 3 min. od vyjmutí testovaného vzorku z referenčních podmínek. U rukavic, které se sestávají z několika vrstev, je nutné, aby zkouška byla provedena na všech vrstvách současně.

3.3.2 Chování při ohybu

Zkouška musí být provedena metodou A dle EN ISO 7854:1997 při zkušební teplotě

$$t_{\infty} = -20 \pm 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.3),$$

nebo pokud výrobce uvádí jinak, tak musí být použita teplota prostředí uváděna výrobcem.

ZKOUŠKA MUSÍ SPLŇOVAT NÁSLEDUJÍCÍ NÁLEŽITOSTI:

- 10 000 zátěžových cyklů
- Z každé dlaně se musí odebrat dva vzorky
- Pokud můžeme rozpoznat směr materiálu, tak jeden vzorek z každé dlaně musí být odebrán tak, že podélná osa leží ve směru výroby. Druhý vzorek musí být kolmý na podélnou osu
- Pokud směr materiálu nelze určit, tak odebereme z každé dlaně dva na sebe kolmé vzorky
- Odebrané vzorky musí být bez švů, pokud nelze takový řez provést, tak se švy musejí nacházet v místech, kde se vzorek upíná (tam kde švy neovlivní měření)

3.3.3 Propustnost vody

Zkouška propustnosti musí být provedena na celé rukavici, v tomto případě se žádné vzorky neodebírají. Rukavice jako celek musí být ponořena do kapaliny až po zápäštní linii, jak je uvedeno v ISO 15383.

3.3.4 Zkouška flexibility při extrémním chladu

Zkouška pro extrémní chlad musí být provedena při teplotě okolí:

$$t_{\infty} = -50 \pm 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.4),$$

Jednotlivé parametry zkoušky jsou uvedeny v ISO 4675, které jsou následující:

- Z každé dlaně a hřbetu se musí odebrat dva vzorky
- Pokud můžeme rozpoznat směr materiálu, tak jeden vzorek musí být odebrán tak, že podélná osa leží ve směru výroby. Druhý vzorek musí být kolmý na podélnou osu
- Pokud směr materiálu nelze určit, tak odebereme z každé dlaně dva na sebe kolmé vzorky

3.3.5 Konvekční chlad

Princip stanovení tepelné izolace materiálu rukavic je založen na základě měření příkonu, který je potřebný k udržení konstantního teplotního gradientu umělé ruky v měřítku 1:1 a okolního prostředí. Konstrukce umělé ruky musí být schopna zajistit konstantní teplotu povrchu po celé její ploše.

Norma EN 511 doporučuje udržovat střední teplotu povrchu mezi 30 a 35 °C, žádné místo by nemělo být výrazně chladnější ani teplejší. Maximální povolená odchylka od střední teploty je ± 1 °C. Model ruky musí být každý rok kontrolován infračerveným systémem nebo ekvivalentní metodou, zda nepřekračuje maximální povolenou odchylku teploty.

Snímače musí být v modelu ruky umístěny taky, aby nekomplikovaly navlečení rukavice.

Teplota povrchu ruky je měřena pomocí odporových snímačů. Umístění a upevnění snímačů musí být takové, aby zajišťovalo vypovídající měření střední teploty povrchu umělé ruky. A také musí monitorovat veškeré důležité oblasti, tj. prsty, dlaň a hřbet ruky.

Zkoušený subjekt musí být před vlastním zkoušením uložen v prostředí o zkušební teplotě nejméně po dobu 24 hod.

Přívod tepla do umělé ruky musí mít dostatečnou hodnotu na to, aby byl schopen udržet střední teplotu ruky v rozsahu 30 až 35 °C při teplotě okolního vzduchu, ta musí být nižší než střední teplota povrchu nejméně o 20 °C. Zkušební zařízení se skládá z umělého modelu ruky, klimatizační komory a měřícího zařízení.

Zkušební vzorek musí splňovat parametry uvedené v EN 420.

Model ruky musí být při měření umístěn společně s rukavicí podél vertikální osy s prsty směřujícími dolů uvnitř klimatizační komory. Rychlost proudění vzduchu v klimatizační komoře musí být udržována na hodnotách $4 \pm 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále je zde předepsaná hodnota relativní vlhkosti vzduchu, uvedena v bodě „klimatizování“

kapitoly 3.3.1. Pokud je prokázána vzájemná analogie pro naměřené výsledky, mohou být použity alternativní podmínky.

Jakmile se při zkoušení ustálí teplota ruky a příkon, provedeme měření střední teploty po dobu 10 min. Výslednou tepelnou izolaci určíme ze vztahu:

$$I_{TR} = \frac{T_w - T_\infty}{\dot{Q}_{in}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (3.5),$$

kde:

T_w	střední teplota povrchu měřené oblasti umělé ruky	[°C]
T_∞	střední teplota vzduchu v klimatizační komoře	[°C]
\dot{Q}_{in}	změřené množství energie dodané do měřené oblasti umělé ruky během ustáleného stavu	[W·m ⁻²]

3.3.6 Kontaktní chlad

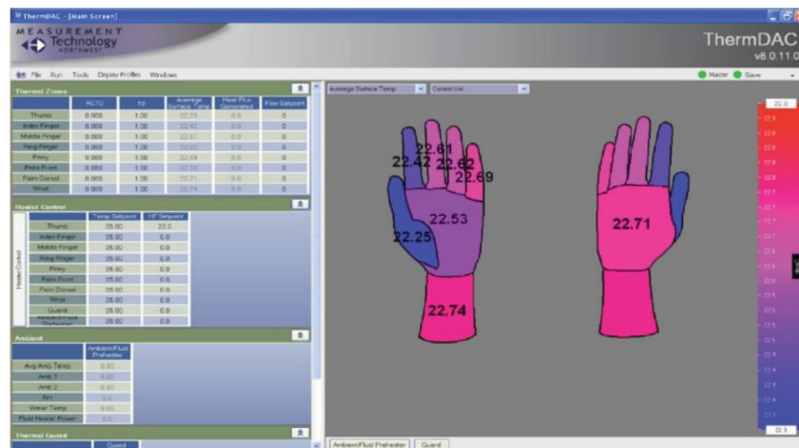
Zkouška musí být provedena v souladu s normou ISO 5085-1 a musí být provedena při tlaku 6,9 kPa, výsledky musí být prezentovány v m²·K·W⁻¹. Musí být zkoušeny dva reprezentativní vzorky materiálu, použitého pro výrobu dotykové strany prstů. Pokud z nějakého důvodu není možné tyto vzorky použít, můžeme vybrat adekvátní vzorky z dlaňové části rukavice.

3.4 Popis zkušebního zařízení

Model umělé ruky musí být vyhříván tak, aby poskytoval rovnoměrnou teplotu po celém svém povrchu, obdobně jako skutečná lidská ruka. Měřené oblasti jsou odděleny zápěstní linií, kterou představuje ochranná oblast vyhřívaná na stejnou teplotu. Ochranná oblast je zde, aby zabránila podélnému odvodu tepla z měřených oblastí, funguje tedy jako izolace a zajišťuje, že se vyhříváný model chová stejně jako lidská ruka. Tudíž jednu měřenou oblast představují prsty, dlaň a hřbet ruky a druhou měřenou oblast představuje předloktí.



Obr. 3.2 Osmi zónové měřící zařízení [14]



Obr. 3.3 Software pro zpracování výsledků měření [14]

Napájecí systém je konstruován tak, že na povrchu modelu je umístěn hustě navinutý odporový drát, který je pokryt plastem o tloušťce přibližně 0,2 mm. Model ruky musí být schopen generovat tepelný výkon až do hodnoty $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tomu musí být uzpůsobeno také napájení topných článků. Energie, přiváděná do modelu ruky, musí být po celou dobu měření udávána jako přesná střední hodnota tepelného toku, maximální povolená odchylka činí $\pm 2 \%$.

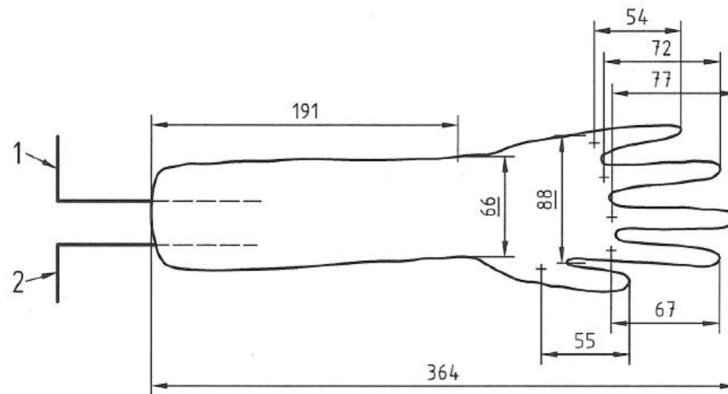


Obr. 3.4 Měřicí zařízení pro určení tepelného odporu [14]

Vyhřívání je dosaženo stejnosměrným proudem o nízkém napětí, jehož zdroj musí být stabilizován, maximální povolená odchylka napětí činí $\pm 1 \%$.

Klimatizační komora musí umožňovat stejnoměrné klimatické podmínky. Prostorové a časové odchylky teploty musí být v toleranci $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost

v toleranci $\pm 5\%$. Střední teplota sálání se nesmí lišit od střední teploty prostředí uvnitř klimatizační komory více než o $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Intenzita turbulence nesmí přesáhnout 30% .



Obr. 3.5 Rozměry modelu ruky uvedeny v mm [5]

- 1 kabley teplotních snímačů
- 2 kabley topných článků

4 KLIMATIZOVANÁ KOMORA PRO TESTOVÁNÍ RUKAVIC

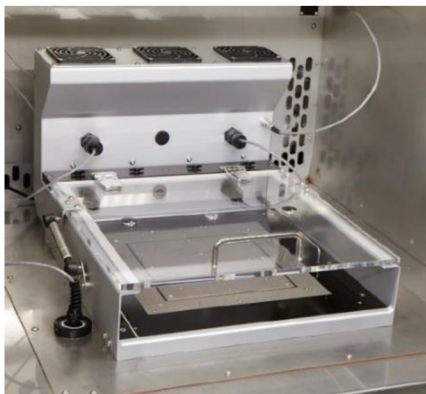
Aktuální moderní metody, z hlediska konstrukce a návrhu, byly převzaty ze zdrojů č. [7], [14] a [15]. Údaje o teplotně vlhkostní látce udává zdroj [16]. Pro schématický návrh chladicí komory, včetně vztahů nutných pro projekci, jsme získali informace ze zdroje [7].

Každá klimatizační komora, která se využívá pro měření tepelného odporu rukavic, musí být schopna poskytovat přesné a opakovatelné měření. Moderní klimatizační komory umožňují měření provádět jak pro extrémní chlad, tak pro extrémní horko, tomu také odpovídá jejich konstrukce. Jedná se o komplikovaný systém, který musí být schopen splnit řadu požadavků.



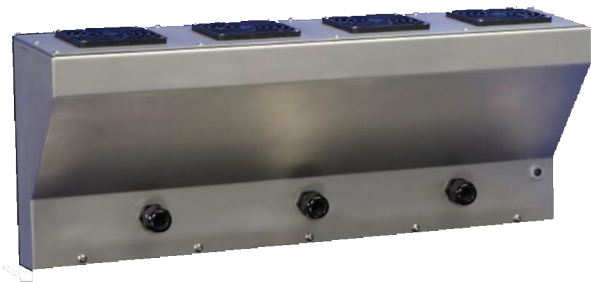
Obr. 4.1 Klimatizační komora isGHP od společnosti Northwest Measurements [14]

Klimatizační komora, schopna zajišťovat simulaci horka, je vybavena topnou deskou, která je vyrobená z mědi. Tato topná deska se stará o teplotně vlhkostní parametry prostředí komory, monitoruje množství tepelného toku využitého pro úpravu vnitřního mikroklimatu a v neposlední řadě zajišťuje požadovanou vlhkost v komoře. Americká společnost Northwest Measurement vyvinula topnou desku, jež je schopna v kombinaci s jejich umělou rukou simulovat také pocení člověka.

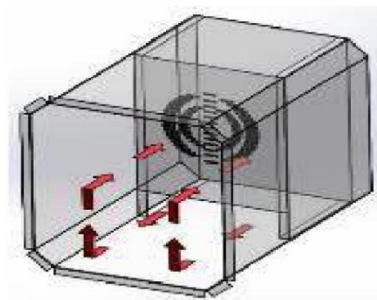


Obr. 4.2 Topná deska společnosti Northwest Measurement [14]

Klimatizační komory dále obsahují chladicí zařízení, které má obdobnou funkci jako topná deska, nicméně je nutné, aby zajišťovala stabilní teploty v komoře až do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mrazicí jednotka je vybavena rýhovaným výparníkem, osazeným žebry pro lepší účinnost přenosu tepla. Z normy EN 511 plyne, že musí být kontrolováno také proudění vzduchu uvnitř komory, o to se starají počítačem řízené systémy. Zpravidla se jedná o laminární proudění, které se s výhodou projeví na rovnoměrnosti teplotního gradientu uvnitř testovaného prostoru, jak uvádí katalogové listy společnosti CME.



Obr. 4.3 Cirkulační zařízení [14]



Obr. 4.4 Naznačené proudění v komoře [15]

Klimatizační komory využívají také soustavy pro dopravu chladicího média a čidla, měřící stav vnitřního prostředí. Chladivo využívá dvou hlavních fyzikálních principů, tedy že kapalina absorbuje teplo při změně skupenství na plynné, a že plyn odevzdává teplo při zkapalnění. Chladivo pak slouží k přenosu tepla mezi jednotlivými částmi chladicího zařízení. Chladivo musí být hermeticky uzavřeno a účastní se chladicího cyklu, jenž je znázorněn v kapitole 4.1.5. Celé zařízení musí být důkladně zaizolováno tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření z vnějšího prostředí.

V neposlední řadě je nutné věnovat pozornost testovacímu prostoru, který musí být důkladně zaizolován a ve valné většině případů je vyroben z nerezové oceli. Z toho plynou zřejmé výhody, a to eliminace veškeré koroze a vysoká životnost. Společnost nebo ústav, který uvažuje o pořízení takovéto chladicí komory, bude velice pravděpodobně chtít testovat také jiné vzorky než rukavice. Proto je vhodné vybrat vnitřní prostor komory takový, který se vyznačuje i vysokou nosností.

Aby měření bylo platné dle normy EN 511, je nutné testovat rukavice v teplotních podmínkách až $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jinými slovy je tedy nezbytné, aby klimatizační komora byla schopna dosáhnout podmínek pro testování rukavic, jež jsou v normě EN 511 uvedeny. Pokud máme na test rukavic nějaké speciální požadavky, např. pro vlhkost prostředí, rychlost proudění vzduchu apod., musí být testovací komora schopna tyto parametry taktéž splnit.



Obr. 4.5 Klimatizační komora 120 BH od společnosti CME [15]

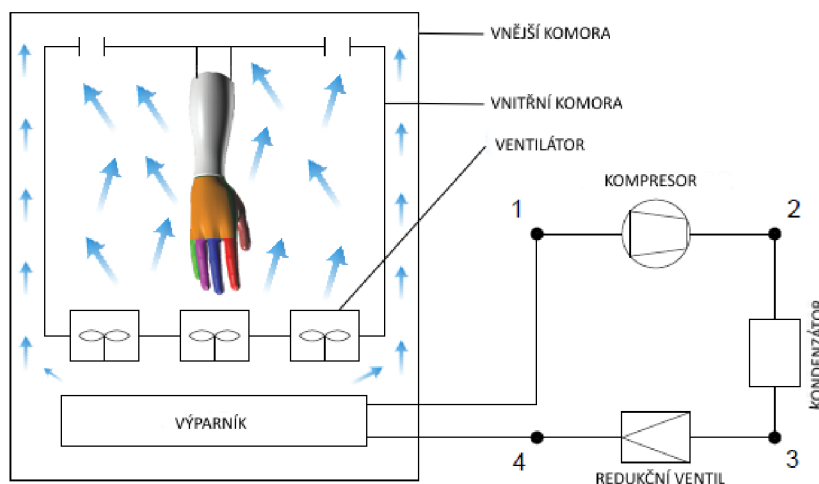
4.1 Návrh koncepce klimatizované komory

Návrh koncepce provedeme pro klimatizační komoru, která je schopna pouze chlazení a to pro teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z toho plyne, že komora naší koncepce by byla schopna poskytovat měření pouze pro konvektivní chlad. Tato aplikace je klíčová pro naše potřeby, a proto se nebudeme zabývat návrhem komory, která by byla schopna poskytnout také ohřev vnitřního mikroklimatu.

Při návrhu klimatizační komory využijeme principu kompresních chladících zařízení. Tento systém je v dnešní době velice rozšířený jak u klasických ledniček a mrazáků, které lze koupit v běžném obchodě, tak i u průmyslových mrazicích zařízení, které musí podávat nesrovnatelně větší výkony než zařízení v domácnostech. Z toho plyne, že kompresní chladící zařízení má vysoký rozsah využití, do kterého spadá také naše aplikace, tedy měřicí komora pro testování rukavic.

Kompresní princip využívá obrácené tepelné cykly, tj. Carnotův cyklus a Rankin-Clausiusův cyklus, při nichž se práce spotřebovává naproti tomu, aby se práce generovala. Zařízení pracuje s chladivem, které prochází fázovou přeměnou, tedy z plynného skupenství na kapalné a naopak. Při provozu můžeme s výhodou využít teplo fázové přeměny, k jeho správné funkci je zapotřebí řada komponentů, jež jsou uvedeny v kapitolách 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 a 4.2.4.

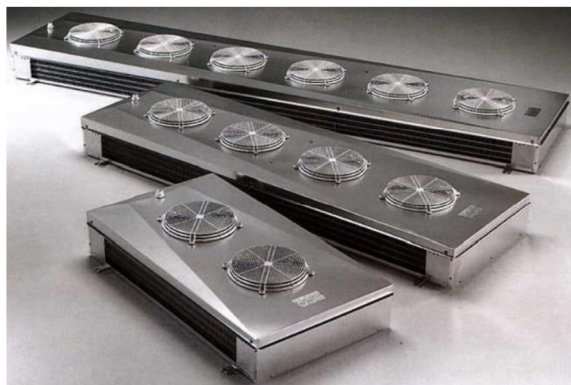
Komoru budeme uvažovat jako konstrukci 2v1, tzn., že ve větší komoře je umístěna komora menší. Takový systém se používá proto, aby nebylo měření ovlivněno škodlivým zářením tepla. Koncepce tohoto provedení nám umožní nepřímé chlazení mikroklimatu vnitřní komory. Budeme tedy také ochlazovat vzduch v meziprostoru obou komor. Výměníkem, umístěným v meziprostoru, docílíme ochlazení vzduchu, který pomocí ventilátorů přivedeme do komory menší, kde je umístěno vlastní testovací zařízení. Tento systém zaručí, že po náběhu zařízení se povrchová teplota stěny vnitřní komory ustálí na teplotu $T_w = T_\infty$. Z toho plyne, že nedojde k ovlivnění měření škodlivým zářením tepla. Chladivo se bude připravovat mimo prostor obou komor, kde projde kompresorem, kondenzátorem a přes redukční ventil do výparníku umístěného v meziprostoru komor.



Obr. 4.6 Schéma koncepce klimatizační komory

4.1.1 Výparník

Výparník je jednou ze základních součástí chladících a mrazících zařízení. Využívá se ke zchlazení prostoru a jeho správná funkce je nezbytná pro spolehlivý chod systému. Ve výparníku dochází ke skupenské změně chladiva z kapalné na plynné formy. Při tomto procesu chladivo absorbuje teplo z povrchu výparníku. Teplý vzduch je na výparník přiváděn ventilátory a následně je ochlazen, tedy předává teplo chladivu a je vyfukován zpět do testovaného prostoru. [17]



Obr. 4.7 Výparník od společnosti Luvata [17]

4.1.2 Kompresor

Kompresor je nejdražší zařízení v chladicí soustavě a cena klimatizační komory je značně ovlivněna výběrem kompresního zařízení. Kompresor stlačuje plynné chladivo na vyšší tlak a slouží tedy jako oběhové čerpadlo, protože se díky zvýšení tlaku urychlí cirkulace chladiva v uzavřeném okruhu. Správný návrh kompresoru je často nejvýhodnější provádět pomocí softwaru uvedeného na stránkách výrobce, jež bývá nejčastěji zdarma ke stažení.

4.1.3 Kondenzátor (srážník)

Kondenzátor je druhé zařízení v okruhu, v němž probíhá fázová přeměna, tedy plyn zkondenzuje zpět na kapalinu. Tímto procesem dochází k předání absorbovaného tepla v chladivu vzduchu, nasávanému z okolí. Tento ohřátý vzduch je následně vyfouknut ventilátorem do vnějšího prostředí.

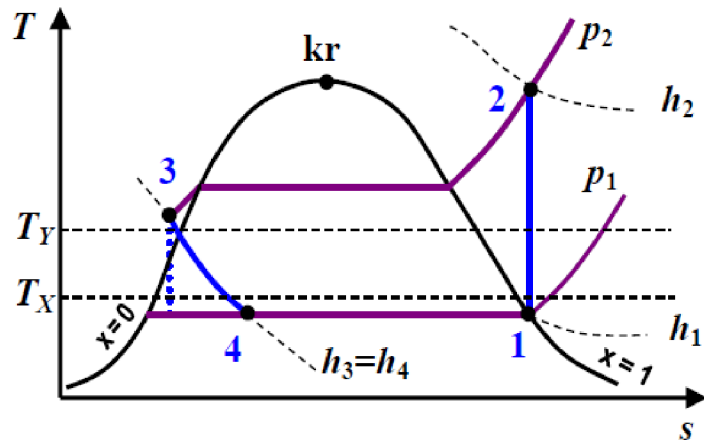
4.1.4 Expanzní ventil

Třetí součást v pořadí cyklu, která snižuje tlak kapalného média na požadovanou hodnotu. Může být nahrazen kapilárou, která je nejlevnějším řešením kompresního zařízení. Nebo také detandérem, který je naopak nejdražší řešení klimatizační komory. Detandér významně zvyšuje chladicí faktor a cenu mechanismu, protože je to další rotační stroj v oběhu a jejich vývoj je v porovnání s dalšími komponenty finančně náročný. Při použití detandéru je děj 3-4 adiabatický (tečkovaná čára v obr. 4.8), teplo dodané soustavě je potom větší a detandér částečně pohání kompresor.

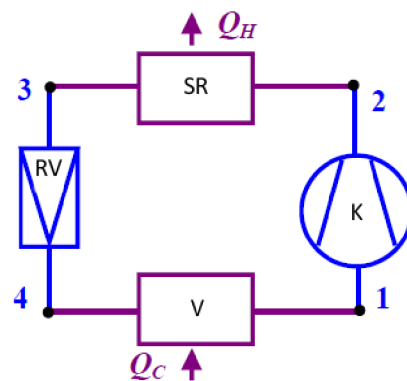
4.1.5 Popis funkce uzavřeného chladicího okruhu

Nyní je třeba popsat zásady funkce uzavřeného okruhu, založeného na kompresním principu, který si vysvětlíme na T-s diagramu, kam vyznačíme průběh chladicího procesu.

Základem je uzavřený okruh s chladivem v kapalném stavu s proměnlivou teplotou varu v závislosti na tlaku. Jednotka pomocí ventilátoru nasává teplý vzduch z místnosti, který projde čistícím procesem přes vzduchový filtr. Ve výparníku dojde k odpaření chladiva (děj 4-1), které bylo do té doby v kapalném stavu, tímto procesem odebere chladivo teplo přiváděnému vzduchu a tím ho ochladí. Kompresor zvýší tlak i teplotu chladiva (děj 1-2) a vtlačuje chladivo v plynném stavu do výměníku tepla (kondenzátoru). Ve výměníku se plynná fáze chladiva ochladí a přemění zpět na kapalinu, kde předá teplo vzduchu nasávaného z testovacího prostoru (děj 2-3). Takto vzniklá kapalina proudí okruhem přes expanzní ventil (děj 3-4), kde dojde ke snížení tlaku chladiva na požadovanou úroveň, do výparníku. Poté se celý cyklus opakuje.



Obr. 4.8 Znárodnění pracovního cyklu v T-s diagramu [7]



Obr. 4.9 Schéma zařízení [7]

kde:

K	Kompresor	
SR	srážník (kondenzátor)	
RV	redukční ventil (expanzní ventil)	
V	výparník	
1 – 2	adiabatický děj, zvýšení teploty a tlaku chladiva v plynné fázi	
2 – 3	změna plynné fáze na kapalnou, kapalina je ochlazená a o vysokém tlaku	
3 – 4	izoentalpický (adiabatický) děj, snížení tlaku kapaliny v expanzním ventilu	
4 – 1	izotermický děj, odpaření chladiva, které disponuje nízkou teplotou i tlakem	
T	Teplota	[K]
T_x	teplota testovacího prostoru komory	[K]
T_y	teplota v místnosti	[K]
s	Entropie	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
p	Tlak	[Pa]
h	entalpie	[J]
x	měrná vlhkost	[kg·kg ⁻¹ _{s.v.}]

Teplo se v chladícím okruhu předává izobaricky, z toho plyne:

$$dq = dh - v \cdot dp = dh \quad (4.1),$$

kde:

v	měrný objem 1 kg pracovní látky	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
q	měrné teplo 1 kg pracovní látky	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$

a platí:

$$q_H = h_3 - h_2 \quad (4.2)$$

$$q_C = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad (4.3)$$

Chladicí faktor pro teoretický cyklus chladícího zařízení, někdy také značený jako COP (Coefficient of Performance) se určí ze vztahu:

$$\varepsilon_c = COP = \frac{q_C}{|q_H| - q_C} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} \quad [-] \quad (4.4),$$

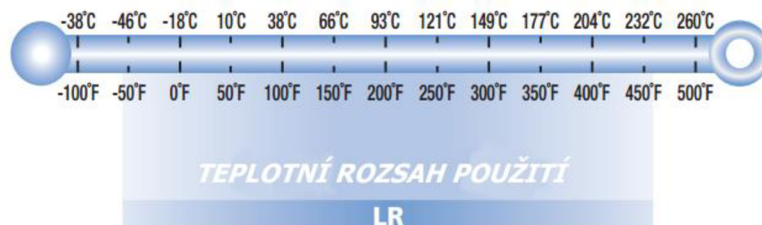
kde:

q_C	měrné teplo přivedené do soustavy	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
q_H	měrné teplo odvedené ze soustavy	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$

4.2 Specifikace teplonosné látky

Jako teplonosné médium lze využít látku, kterou vyvinuli ve společnosti Paratherm. Tato organizace vyrábí několik druhů teplonosných látek a jedna z nejvhodnějších pro naši aplikaci je médium Paratherm LR.

Paratherm LR je alifatický uhlovodík navržený pro použití v uzavřeném okruhu. Vyznačuje se velice dobrými vlastnostmi pro výměníky tepla, kde je schopen dosáhnout zchlazení povrchu výměníku až na $-80\text{ }^\circ\text{C}$. Naproti tomu, pokud chceme v klimatizační komoře simulovat i horké podmínky, tak Paratherm LR zaručuje teploty až $260\text{ }^\circ\text{C}$ pro elektrické a parní ohřivače. Součinitel přestupu tepla je v průměru o 50 % vyšší než u různých typů Glykolu, tj. například ethylen-glykol a propylen-glykol. Jednou z velkých výhod Paratherm LR je vysoká stabilita a životnost teplonosné látky, výrobce garantuje při teplotách do $232\text{ }^\circ\text{C}$ po 500 hodinách teplotní degradaci maximálně o 3 %. [16]



Obr. 4.10 Rozsah pracovních teplot teplonosné látky Paratherm LR [16]

Tab. 4.1 Fyzikální vlastnosti teplotně odolné látky Paratherm LR [16]

Teplota T		Dynamická viskozita		Kinematická viskozita			
T [°F]	T [°C]	η [N·s·m ⁻²]	ν [mm ⁻² ·s ⁻¹]				
-100,000	-73,000	0,15400	185,000				
-75,000	-59,000	0,03800	46,000				
-50,000	-46,000	0,01600	19,000				
-25,000	-32,000	0,00800	9,900				
0,000	-18,000	0,00500	5,900				
25,000	-4,000	0,00300	3,800				
50,000	10,000	0,00210	2,700				
75,000	24,000	0,00150	2,000				
100,000	38,000	0,00110	1,500				
125,000	52,000	0,00090	1,200				
150,000	66,000	0,00080	1,000				
175,000	79,000	0,00070	0,900				
200,000	93,000	0,00060	0,790				
225,000	107,000	0,00050	0,710				
250,000	121,000	0,00042	0,610				
275,000	135,000	0,00036	0,530				
300,000	149,000	0,00032	0,480				
325,000	163,000	0,00029	0,440				
350,000	177,000	0,00026	0,400				
375,000	191,000	0,00023	0,360				
400,000	204,000	0,00021	0,330				
425,000	218,000	0,00020	0,320				
450,000	232,000	0,00018	0,300				
Hustota		Součinitel tepelné vodivosti		Měrná tepelná kapacita		Tlak páry	
ρ [kg·m ⁻³]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	p_p [kPa]				
833,333	0,159	1632,851	-				
817,308	0,159	1716,587	-				
817,308	0,157	1758,455	-				
801,282	0,156	1800,323	-				
785,256	0,154	1842,191	-				
785,256	0,154	1925,927	-				
769,231	0,152	1967,795	-				
753,205	0,151	2009,663	-				
753,205	0,149	2051,531	-				
737,179	0,149	2135,267	-				
737,179	0,147	2177,135	-				
721,154	0,145	2219,003	-				
705,128	0,144	2260,871	-				
705,128	0,144	2344,607	4,000				
689,103	0,142	2386,475	6,666				
673,077	0,140	2428,343	10,799				
673,077	0,138	2470,211	19,332				
657,051	0,138	2553,947	32,397				
657,051	0,137	2595,815	49,996				
641,026	0,135	2637,683	78,927				
625,000	0,133	2679,551	103,999				
625,000	0,133	2763,287	125,056				
608,974	0,132	2805,155	142,122				

Tab. 4.2 Rychlost změny teploty v klimatizační komoře 120 BH [15]

120 BH Model	Teplota	23°C	0°C	-20°C	-40°C	-65°C	-70°C
Rychlost změny teploty v komoře [°C·min ⁻¹]	29°C	-	3,8	3,5	3,3	2,2	1,7
	50°C	4,5	4,5	4,3	4,0	2,8	2,0
	100°C	6,4	6,4	5,6	4,8	3,2	2,6
	180°C	7,4	7,2	6,4	5,7	4,0	3,2

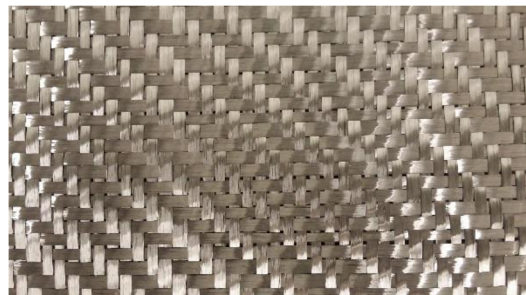
5 ZKUŠEBNÍ MODEL RUKY

Po společné úvaze jsme se s doktorem Hejčíkem rozhodli testovat materiál vhodný pro sestavení modelu umělé ruky, nikoliv celého zařízení. Hlavní myšlenkou je najít způsob, jak vytvořit tento aparát při co nejnižších nákladech na výrobu. Ekvivalentní zařízení, určená ke komerčnímu prodeji, se pohybují v částkách stovek tisíc korun. Tato práce tedy může sloužit jako základ dalšího zkoumání možností, jak sestavit zařízení pro měření tepelného odporu rukavic. Dospěli jsme k závěru, že vyzkoušíme uhlíkovou tkaninu jako základní stavební prvek umělé ruky. Toto řešení bylo vybráno z důvodu dobré tvarovatelnosti materiálu a dobrých tepelně vodivých vlastností karbonu. Dalším úkolem bylo zajistit rovnoměrné rozložení teplot na povrchu testovaných vzorků, které byly potaženy laminátem. Toho jsme se snažili docílit přidáváním příměsí s vysokou hodnotou součinitele tepelné vodivosti. Napájení topných segmentů jsme realizovali pomocí elektrického proudu a zkoumali jsme vliv různých typů přívodů elektrické energie. Po provedení všech experimentů bylo zapotřebí vytvořit topné segmenty z odlišného materiálu než je karbonová tkanina. Zvolili jsme kaptonovou fólii, jejíž výsledky byly porovnány s kompozitní tkaninou.

V této části si shrneme výsledky získané při měření vlastností kompozitního materiálu. Bylo provedeno měření dvou hlavních prvků, jež ovlivňují schopnost měřicího zařízení podávat přesné a opakovatelné výsledky. Jedná se o tepelný, respektive elektrický odpor, který významně působí na velikost teplotního maxima a minima měřeného vzorku. Druhá zkoumaná veličina byla rovnoměrnost rozložení teplot na ploše topného segmentu, měřená pomocí termo kamery. Měření bylo provedeno na vzorku uhlíkové tkaniny o ploše 100 cm². Po provedeném experimentu jsme získali představu o vhodnosti daného materiálu pro sestavení zařízení, které je schopno podávat konzistentní výsledky.



Obr. 5.1 Karbonová textilie 200 g·m⁻²



Obr. 5.2 Karbonová textilie 420 g·m⁻²



Obr. 5.3 Karbonová textilie 600 g·m⁻²

5.1 Příprava topných segmentů dle normy ČSN EN 511

Před vlastním měřením bylo nutno provést přípravu jednotlivých topných segmentů. Každý vzorek tkaniny byl opatřen laminátovým nátěrem pro zajištění rovnoměrných teplotních polí. V druhé fázi měření bylo do epoxidové směsi přidáno dalšího prvku, který více zvyšoval součinitel přestupu tepla měřeného vzorku. V úvodním experimentu jsme pracovali se čtyřmi typy vzorků, které se vždy lišily naneseným nátěrem, tj. čistý epoxidový nátěr, epoxidový nátěr s přidaným grafitovým práškem, epoxidový nátěr s příměsí z měděného prášku a jako poslední epoxidový nátěr s přidaným hliníkovým práškem.

Očekávali jsme, že přidáním materiálů s dobrými tepelně vodivými vlastnostmi získáme rovnoměrnější rozložení teplot na povrchu. Vlastnosti příměsí jsme získali ze stránek dodavatele Fichema s.r.o., viz. zdroj [24] a TZB-Info, viz. zdroj [25].

5.1.1 Grafitový prášek

Grafit má velice dobré vlastnosti tepelné vodivosti. Přesněji součinitel tepelné vodivosti grafitu je $119-165 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli pomocí grafitového prášku zvýšit tepelně vodivé specifikace karbonové látky natřené epoxidem. Díky tomu lze očekávat rovnoměrnější rozložení teplot po ploše topného segmentu.

Použili jsme grafit pudrový vysoké jakosti, jedná se o velmi čistý grafit 99,5% nejmenší možné zrnitosti, která nepřesahuje hodnotu 7 mikrometrů. Grafit jsme na vzorek nanášeli smícháním s epoxidem a následným nátěrem topného segmentu.

DOPLŇJÍCÍ VLASTNOSTI GRAFITU OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

- Hustota $2\,100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Obsah popela $<0,5 \%$
- Zrnitost $<5,5 \mu\text{m}$



Obr. 5.4 Grafitový prášek [24]



Obr. 5.5 Směs grafitu s epoxidem

5.1.2 Měděný prášek

Měď vykazuje nejlepší vlastnosti tepelné vodivosti ze tří použitých materiálů, její součinitel tepelné vodivosti činí $393 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Očekáváme ale, že nejlepší rozložení teplot na povrchu topného segmentu přesto s měděnou příměsí nebude. A to, protože

měď se zvyšující se teplotou podléhá korozi a vlivem této degradace se významně snižuje také souč. tepelné vodivosti.

DOPLŇUJÍCÍ VLASTNOSTI MĚDI OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

- Hustota $8\,900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Zrnitost do 0,045 mm 96 %
- Zrnitost nad 0,045 mm 3,5 %
- Zrnitost nad 0,063 mm 0,3 %



Obr. 5.6 Měděný prášek [24]

5.1.3 Hliníkový prášek

Jako poslední ze tří příměsí jsme použili hliníkový prášek, jehož součinitel tepelné vodivosti dle TZB-Info činí $221\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

DOPLŇUJÍCÍ VLASTNOSTI HLINÍKU OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

- Hustota $2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Zrnitost do 3 μm 6 %
- Zrnitost mezi 4 – 10 μm 26 %
- Zrnitost mezi 10 – 19 μm 29 %
- Zrnitost mezi 20 – 37 μm 25 %
- Zrnitost mezi 38 – 74 μm 7,5 %
- Zrnitost mezi 75 – 150 μm 5,1 %
- Zrnitost mezi 151 – 250 μm 1,7 %
- Zrnitost větší než 250 μm 0,6 %

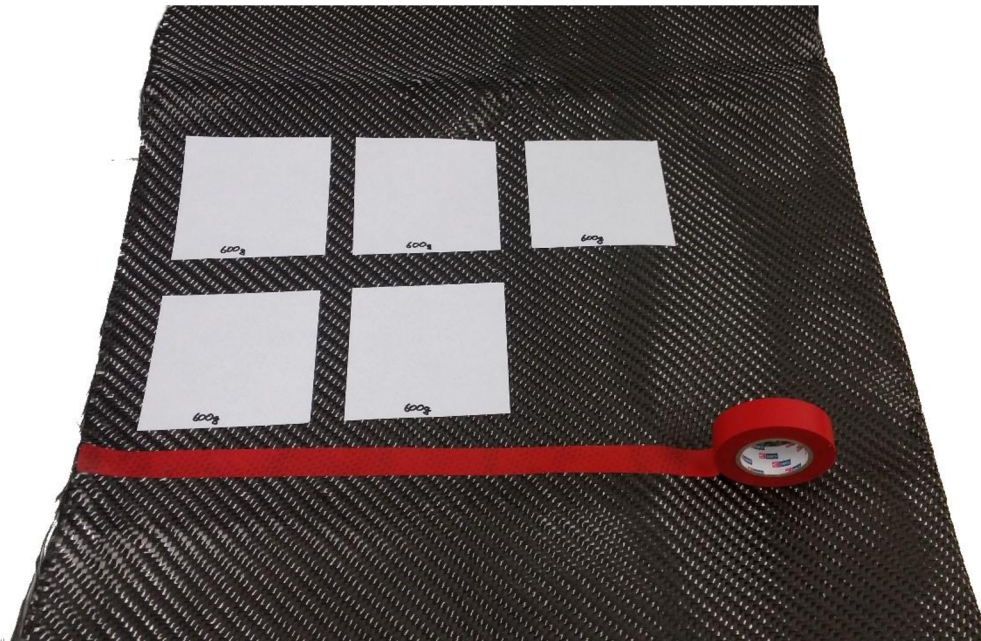


Obr. 5.7 Hliníkový prášek [24]



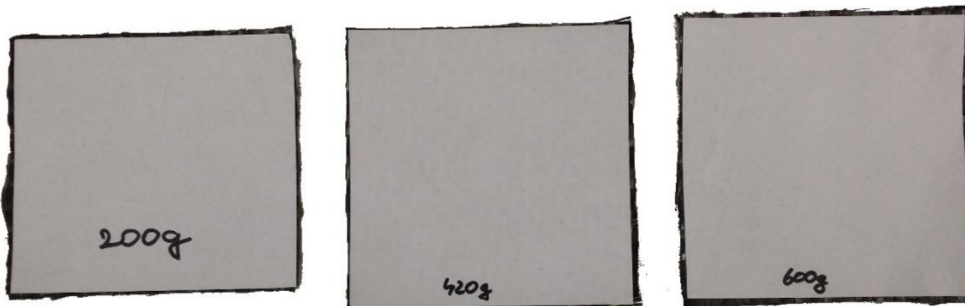
Obr. 5.8 Směs hliníku s epoxidem

Před aplikací směsi na topný segment bylo nejprve nutné vzorky nastříhat na požadovaný rozměr 10 · 10 cm.



Obr. 5.9 Příprava pro stříhání segmentů

Měřené vzorky bylo nutné podlepit tak, aby se po nastříhání kompozitní materiál netřepil.



Obr. 5.10 Topné segmenty po nastříhání (vlevo je prototyp vzorku o menší ploše)

Abychom dosáhli požadovaného rozložení teplot, bylo nutné jednotlivé topné segmenty opatřit laminátovým povlakem. A to z důvodu, že samotná kompozitní látka nemá dostatečné hodnoty tepelné vodivosti. Další výhodou laminátového povlaku je fakt, že umělá ruka vyrobená z kompozitní látky a potažena touto směsí bude mít hladký a kompaktní povrch usnadňující navlékání rukavic.

Použili jsme epoxidové pryskyřice LETOXIT typu PR102, využívané pro laminaci, v kombinaci s tvrdidlem LETOXIT typu EM420. Jak uvádí zdroj [26], jedná se o laminační směs bez plnicích látek, určenou pro laminování materiálů ze skleněných nebo uhlíkových vláken. Tato směs je tedy velice vhodná pro laminaci karbonové látky, kterou jsme použili k měření. Laminační směs se hodí pro ruční laminování a je

doporučeno ji míchat v teplotách mezi $20 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$, vytvrzování za těchto podmínek trvá přibližně 24 hod. Vyšší zpracovatelská teplota je možná, ale zkracuje životnost směsi. Přibližně se dá říci, že zvýšení teploty o $10 \text{ }^\circ\text{C}$ snižuje životnost směsi na polovinu. Směšovací poměr lze určit pomocí hmotnostních dílů, v tomto případě se jedná o poměr $100: 38 \pm 1$ (pryskyřice: tvrdidlo). Další možnost určení směšovacího poměru je pomocí objemových procent a v tomto případě je nutné provést míšení v poměru $100: 45 \pm 1$ (pryskyřice: tvrdidlo). Vytvrzovací reakce je tzv. exotermní a s tímto procesem je spojené uvolňování vysokého množství tepla, které by mohlo způsobit přehřátí směsi až na $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

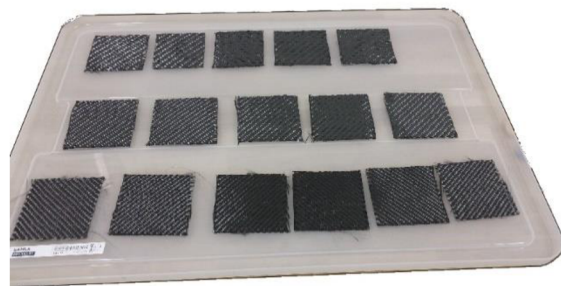
Z mísicích poměrů, které jsou předepsány společností LETOXIT, jsme stanovili hmotnostní poměry směsí. Jedná se tedy o:

- 19 g směsi epoxidu PR102 a EM420 + 2 g hliníkového prášku aplikováno na dva měřené vzorky
- 19 g směsi epoxidu PR102 a EM420 + 2 g měděného prášku aplikovaného na dva měřené vzorky
- 13 g směsi epoxidu PR102 a EM420 + 2 g grafitového prášku aplikovaného na dva měřené vzorky

V případě čistého epoxidu proběhla aplikace na měřený vzorek v množství 7 g směsi na jeden měřený segment o ploše 100 cm^2 .



5.11 Čistý epoxid



5.12 Topné segmenty opatřené laminátovým povlakem

Údaje o vlastnostech, složení a míšení epoxidové pryskyřice jsme získali z technického listu, dodávaného společností LETOXIT, viz. zdroj [26].

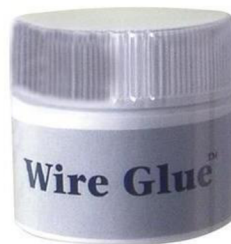
5.1.4 Napájení topného segmentu

Z normy ČSN EN 511 plyne, že měřicí zařízení musí být schopné poskytovat topný výkon alespoň $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tím dosáhneme schopnosti věrohodně napodobit tepelnou zátěž generovanou lidskou pokožkou při různých typech námahy. V našich podmínkách by bylo obtížné provádět zkoušení na vzorku o ploše 1 m^2 , proto jsme kompozitní látku nastříhali na čtverečky $10 \cdot 10 \text{ cm}$, je tedy nutné, aby náš zkoušený segment poskytoval topný výkon $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato úprava nemá významný vliv na měření a měřený prvek je schopen nám taktéž podávat seriózní výsledky, vhodné pro další experimenty v této oblasti.

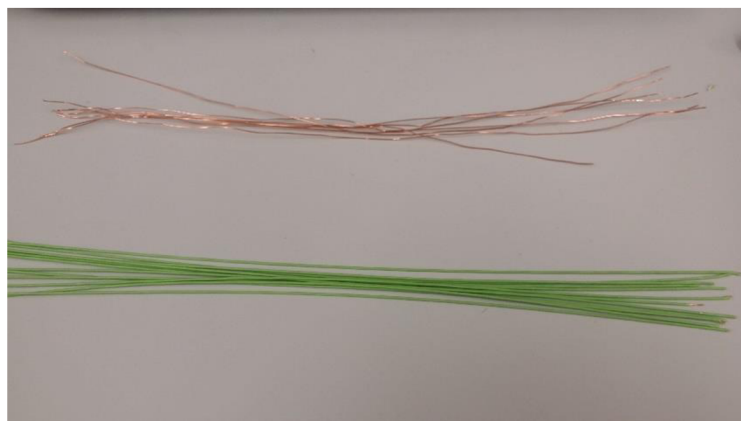
Dalším krokem bylo připojení topného drátu ke zkoušeným vzorkům, pomocí kterého jsme vzorky napájeli topným výkonem $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Vlastní spojení bylo provedeno vodivým lepidlem pro elektrické aplikace.

ELEKTRO-VODIVÉ LEPIDLO

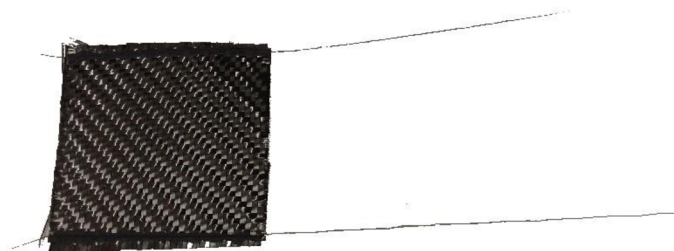
Bylo použito elektro-vodivé lepidlo Wire Glue od výrobce ELCHEMCo. Lepidlo je určeno pro vývoj, výrobu a opravu elektronických aplikací. Nanáší se tenkou tyčinkou na daný spoj a vyznačuje se výbornou adhezí na většinu povrchů. Lepidlo obsahuje pevné části uhlíku a pojivo na vodní bázi. Garantovaná elektrická vodivost lepidla činí $13 \div 16 \Omega \cdot \text{cm}^{-3}$. Krátkodobá provozní teplota se pohybuje v rozsahu $-29 \text{ }^\circ\text{C}$ až $93 \text{ }^\circ\text{C}$. Lepidlo je tedy vhodné pro naši aplikaci. [27]



Obr. 5.13 Elektrovodivé lepidlo Wire Glue [27]



Obr. 5.14 Odporový drát, nahoře očištěný od izolace



Obr. 5.15 Topný segment spojený s odporovým drátem

Určení napájecího výkonu, respektive proudu, bylo provedeno dle následujícího vztahu:

$$P = U \cdot I \quad [\text{W}] \quad (5.1),$$

kde:

P	elektrický výkon	[W]
U	elektrické napětí	[V]
I	Elektrický proud	[A]

vzorec číslo 5.1 lze přepsat na tvar:

$$P = R \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (5.2),$$

kde:

R	elektrický odpor	[Ω]
-----	------------------	-----

Poslední úpravou vztahu 5.2 dostaneme výsledný tvar, určující, jaký proud nastavíme na elektrickém zdroji od společnosti TTI.

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad [\text{A}] \quad (5.3),$$

Ze vztahu 5.3 plyne, že pro určení napájecího proudu potřebujeme znát elektrický výkon, který spočteme dle stanovení normy ČSN EN 511, tedy $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ pro náš případ, a elektrický odpor, který jsme změřili pomocí multimetru od společnosti UNI-Trend. Pro lepší orientaci jsme si označili vzorky následujícím způsobem.

O_1	vzorek bez laminace	[-]
O_2	vzorek bez laminace	[-]
O_3	vzorek bez laminace	[-]
E_1	vzorek s laminací bez příměsi	[-]
E_2	vzorek s laminací bez příměsi	[-]
E_3	vzorek s laminací bez příměsi	[-]
G_1	vzorek s laminací a grafitovým práškem	[-]
G_2	vzorek s laminací a grafitovým práškem	[-]

G_3	vzorek s laminací a grafitovým práškem	[-]
H_1	vzorek s laminací a hliníkovým práškem	[-]
H_2	vzorek s laminací a hliníkovým práškem	[-]
M_1	vzorek s laminací a měděným práškem	[-]
M_2	vzorek s laminací a měděným práškem	[-]

V tabulce č. 5.1 nalezneme naměřené odpory a vypočtené napájecí proudy jednotlivých vzorků.

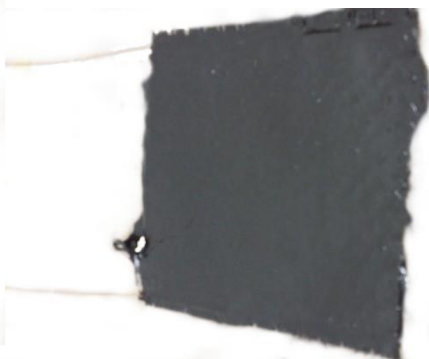
Tab. 5.1 Naměřené odpory a přepočtené napájecí proudy topných segmentů

Vzorek	Gramáž [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	Odpor [Ω]		Proud při výkonu $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [A]
		Před laminací	Po laminaci	
E_1	600	0,7	1,2	1,29
E_2	420	0,9	1,1	1,35
E_3	200	1	1	1,41
G_1	420	0,9	0,9	1,49
G_2	200	1,1	1	1,41
G_3	600	1	0,6	1,83
H_1	200	0,9	1	1,41
H_2	420	0,7	1,1	1,35
M_1	200	1	0,7	1,69
M_2	420	0,7	0,8	1,58
O_1	200		0,9	1,49
O_2	420		0,7	1,69
O_3	600		0,7	1,69

Na obrázcích 5.16 ÷ 5.19 můžeme vidět topné segmenty připravené k měření.



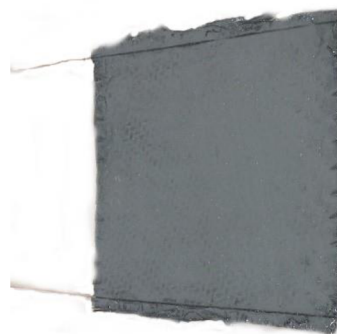
Obr. 5.16 Topný segment natřený čistým epoxidem



Obr. 5.17 Topný segment natřený epoxidem s grafitem



Obr. 5.18 Topný segment natřený epoxidem s mědí

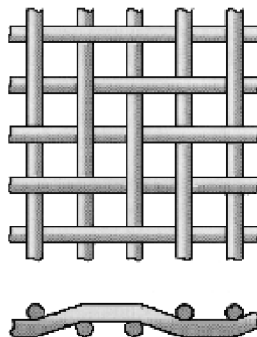


Obr. 5.19 Topný segment natřený epoxidem s hliníkem

Měření bylo provedeno pomocí přístrojů a komponent uvedených v této kapitole.

UHLÍKOVÁ TKANINA

Pro experiment jsme použili tkaninu na bázi uhlíku vyráběnou českou společností Kordcarbon. Tato textilie je ušita tzv. keprovou vazbou (viz. obr. 5.20). Byly zkoušeny tři typy hmotností materiálu, tj. $200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, $420 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ a $600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. [18]



Obr. 5.20 Keprová vazba [19]

MULTIMETR

Měření odporů každého topného segmentu bylo provedeno digitálním multimetrem od společnosti UNI-Trend.



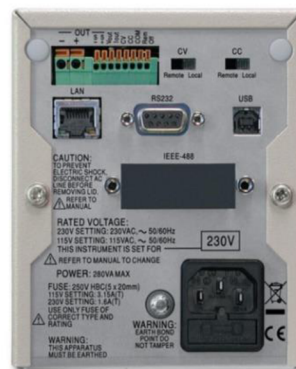
Obr. 5.21 Multimetr UT70B od společnosti UNI-Trend [20]

ZDROJ ELEKTRICKÉHO PROUDU

Použili jsme nastavitelný zdroj od společnosti TTI typu EL302P o maximálním výkonu 60 W a maximálním výstupním proudu 2 A.



Obr. 5.22 Elektrický zdroj EL302P [21]



Obr. 5.23 Elektrický zdroj EL302P [21]

TEPLOMĚR

Pomocí teploměru TESTO 605i jsme změřili teplotu okolního vzduchu, kterou jsme potřebovali pro stanovení emisivity na níže uvedené termokameře. Teploměr 605i je vybaven kapacitním vlhkostním senzorem a NTC sondou, schopnou pracovat v rozsahu teplot -20 až 50 °C s rozlišením 0,1 °C.



Obr. 5.24 Teploměr Testo 605i [22]

TERMOKAMERA

K měření rozložení teplot na ploše topných segmentů jsme využili termokameru od společnosti FLIR, typ i7. Termokamera typu i7 poskytuje měření s rozlišovací schopností $<0,1^{\circ}\text{C}$ a je schopna zaznamenávat hodnoty od -20°C do 250°C .

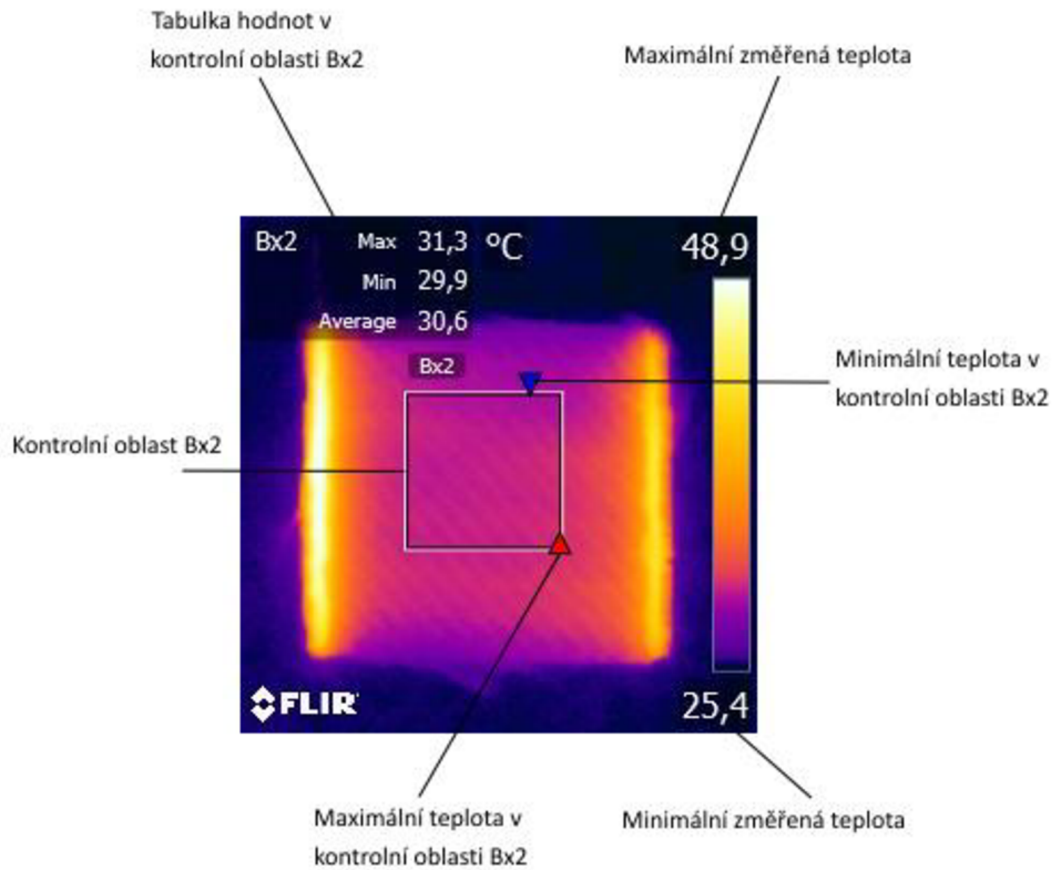


Obr. 5.25 Termokamera FLIR i7 [23]

5.2 Výsledky měření

Měření proběhlo pomocí termo-kamery od společnosti FLIR, typ i7. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí firemního softwaru, který si lze zdarma opatřit na stránkách společnosti v sekci termo-kamer i7. Tento software nalezneme pod názvem FLIR Tools a můžeme díky němu extrahovat další údaje z JPEG souborů generovaných kamerou i7. Program nám umožňuje provádět řezy měřenou oblastí, umísťovat sondy teploty na daná místa a měnit barevné spektrum.

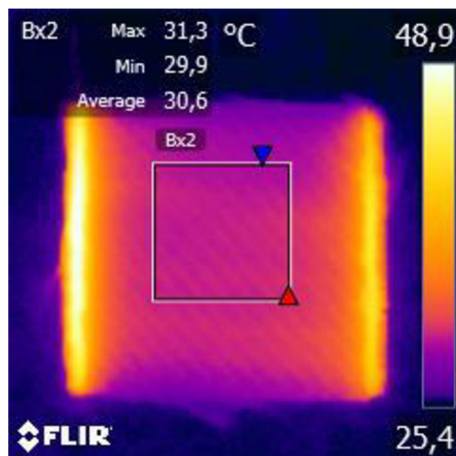
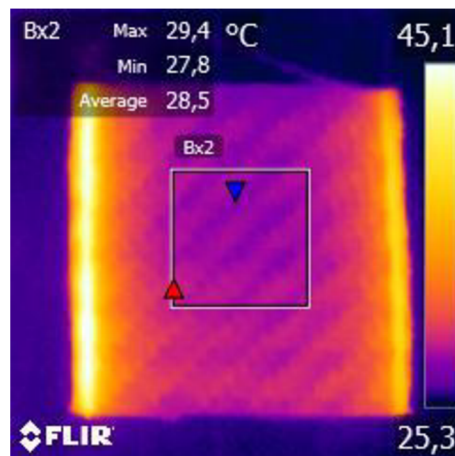
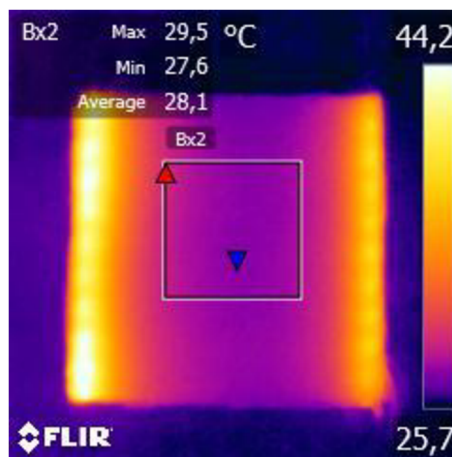
Pro všechny vzorky jsme stanovili jednotnou hodnotu emisivity, která byla nastavena na termo-kameře. Nejprve jsme, pomocí teploměru společnosti TESTO 605i, změřili teplotu okolního vzduchu, tj. $24,8^{\circ}\text{C}$. Pomocí termo-kamery jsme změřili povrchovou teplotu měřených segmentů a nastavili takovou emisivitu, aby se teplota povrchu shodovala s teplotou okolí. Tento postup jsme mohli použít díky tomu, že testované segmenty byly skladovány v prostředí, kde se provádělo měření. Mohli jsme tedy uvažovat, že se teplota vzorku shodovala s teplotou vzduchu. Výsledná emisivita byla nastavena na hodnotu 0,95. Jedná se o emisivitu vztaženou kolmo k měřenému vzorku.

LEGENDA K TERMOGRAMU

Obr. 5.26 Legenda k termogramu pořízeného termoramerou i7

5.2.1 Měření topného segmentu typu O – čistá tkanina

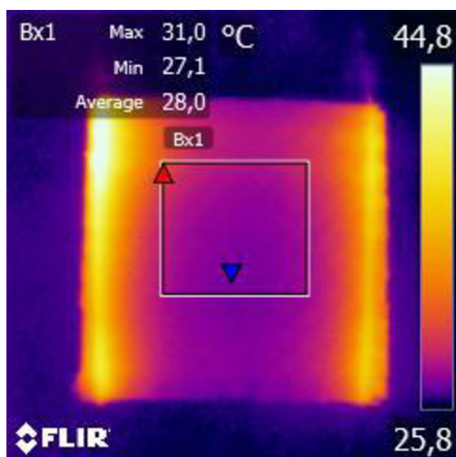
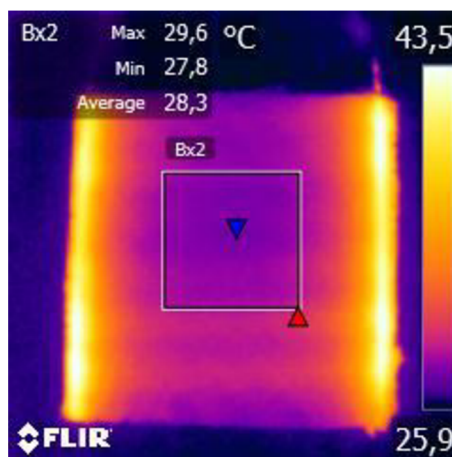
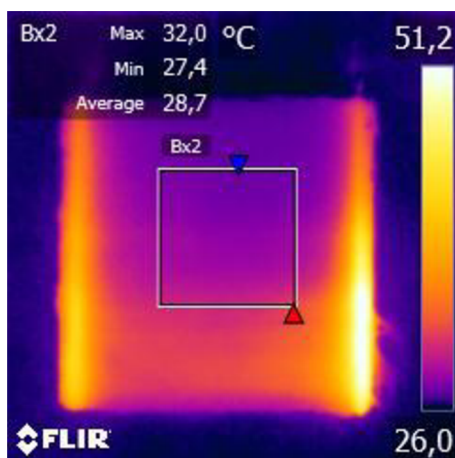
Prvním měřeným segmentem byla kompozitní tkanina opatřena topnými dráty. Toto měření jsme provedli, abychom měli jasnou představu o změně rozložení teploty na upraveném segmentu oproti výsledkům z pouhé textilie. Bylo provedeno měření celkem tří vzorků. Z tabulky 5.1, můžeme vyčíst spočtený napájecí proud vzorků O₁, O₂ a O₃., vzhledem k naměřeným odporům.

Obr. 5.27 Topný segment O₁Obr. 5.28 Topný segment O₂Obr. 5.29 Topný segment O₃

Jak můžeme vidět na vzorcích testovaných v této kapitole, tak nejlepší rozložení teplot vzniká na topném segmentu O₁. V hodnocené oblasti, vyznačené čtvercem uprostřed, je maximální teplota $t_{\max} = 31,3$ °C nejvyšší ze všech měřených prvků. Tento jev vede také k nejvyšší průměrné teplotě v kontrolní oblasti, tedy $t_{\text{ave}} = 29,9$ °C. V tabulce č. 5.1 můžeme vidět, že vzorek O₁ má nejvyšší odpor a ze vzorce 5.3 plyne, že napájecí proud bude nejmenší. Díky nejvyšší hodnotě odporu lze říci následující tvrzení: „Čím vyšší bude odpor tkaniny, tím více poroste její teplota.“ Z provedených experimentů je zřejmé, že látky $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ a $600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ vykazují nejvíce rovnoměrné rozložení teplot po povrchu. To lze potvrdit dle obrázků 5.27 a 5.29. Nicméně vzorek O₃ nedosahuje tak vysokých teplot kvůli nízkému odporu.

5.2.2 Měření topného segmentu typu E – čistý epoxid

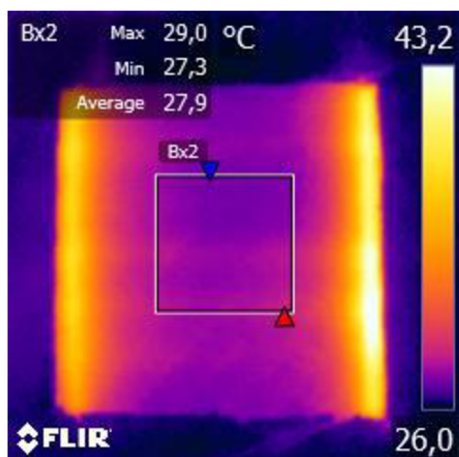
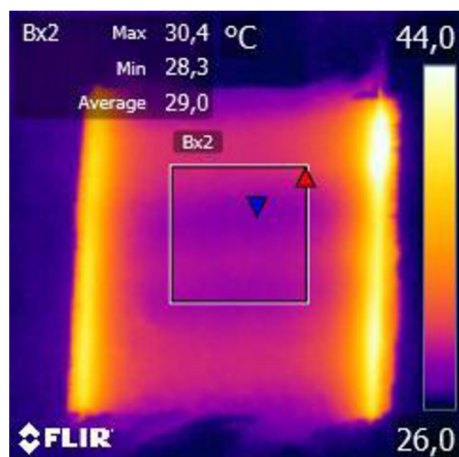
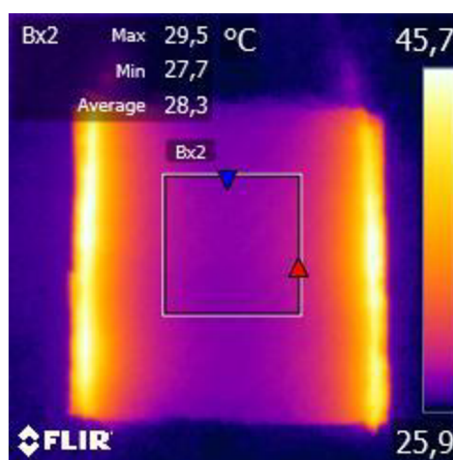
Jako první úpravu tkaniny jsme zvolili nátěr samotnou směsí pryskyřice a tvrdidla, bez dodatečných příměsí. V tabulce č. 5.1 můžeme vidět, že po aplikaci laminátové směsi se odpory jednotlivých topných segmentů zvýšily, ve dvou ze tří případů. Proto můžeme oproti čisté látce očekávat vyšší povrchové teploty, nicméně je zajímavé, že maximální teplota byla dosažena na vzorku E₃ s nejmenším odporem. To je dáno vyšší koncentrací vodivého lepidla v místě maximální teploty.

Obr. 5.30 Topný segment E₁Obr. 5.31 Topný segment E₂Obr. 5.32 Topný segment E₃

Po vyhodnocení měření bylo zjištěno, že v kombinaci s čistým epoxidem vykazuje nejlepší vlastnosti, z hlediska tepelné vodivosti, vzorek, jenž je zhotoven z tkaniny $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. Tento vzorek má ve spodní části velmi rovnoměrné teplotní pole, což je dáno faktem, že v blízkosti je také nejvyšší teplota $t_{\text{max}} = 51,2 \text{ °C}$. Pokud by se nám povedlo vodivé lepidlo nanést na celé délce spojení odporového drátu ve stejné vrstvě a koncentraci, tak bychom dostali topný segment s téměř dokonalým rozložením teplot po povrchu.

5.2.3 Měření topného segmentu typu G – epoxid s grafitem

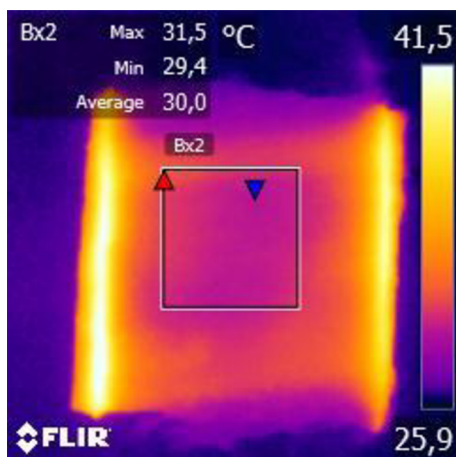
První ze tří příměsí, aplikovaných společně s epoxidem, je grafitový prášek. Specifikace grafitového prášku jsou uvedeny v kapitole č. 5.1.1. Vzhledem k součiniteli tepelné vodivosti, který u grafitového prášku činí $119\text{--}165\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, lze předpokládat lepší rozložení teplot na povrchu měřeného vzorku než u čistého epoxidu. Provedli jsme měření dvou vzorků, které splňují hmotnostní poměry míšení směsi. Měření třetího segmentu, kde je množství grafitu pouze $1\text{ g na }100\text{ cm}^2$, bylo provedeno se zbytkovým epoxidem z experimentu.

Obr. 5.33 Topný segment G_1 Obr. 5.34 Topný segment G_2 Obr. 5.35 Topný segment G_3

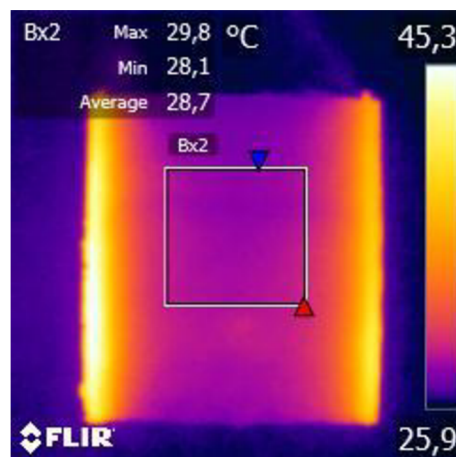
Z obrázku č. 5.34 plyne, že vzorek o gramáži $200\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ podává opět nejspokojivější výsledky, rozložení teplot už je zde téměř rovnoměrné po celém povrchu topného segmentu. Studenější prostor uprostřed je dán ručním rozetřením epoxidu s příměsí. Nicméně lze stanovit tvrzení, že přidáním vodivé příměsi se výrazně zlepšuje rozložení teplot. Na topném segmentu nepozorujeme tak vysoké teploty, což dáno nižším odporem po laminaci než před ní.

5.2.4 Měření topného segmentu typu M – epoxid s mědí

Druhým měřeným vzorkem s příměsí byl topný segment typu M, tedy s měděným práškem. Provedli jsme měření na dvou vzorcích 200 a $420 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. Vzhledem k tomu, že měď se vyznačuje nejlepším součinitelem tepelné vodivosti $393 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ze souboru příměsí, dalo by se očekávat, že bude podávat nejlepší výsledky pro naši aplikaci. Je zde ale několik problémů. První je spojený s degradací mědi vlivem zvyšující se teploty. A druhý problém je, že měď vlivem vysoké hmotnosti sedimentuje na povrchu. Samotná sedimentace by byla spíše výhodou, nicméně jejím vlivem vzniknou odlišné koncentrace mědi na povrchu a tím pádem nerovnoměrné rozložení teplot, jako se stalo na topném segmentu M_2 .



Obr. 5.36 Topný segment M_1



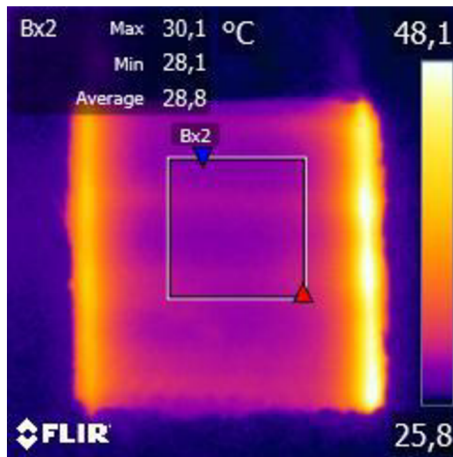
Obr. 5.37 Topný segment M_2

Jak již bylo zmíněno, na obr. 5.37 můžeme vidět jasný příklad různých koncentrací mědi na povrchu tkaniny. Uprostřed kontrolní oblasti se vyskytují chladnější a teplejší místa a hned pod kontrolní oblastí se vyskytuje výrazně teplejší pruh o teplotě $29,4 \text{ °C}$, která je vyšší než průměrná teplota topného segmentu o $1,3 \text{ °C}$. Naproti tomu vezmeme měřený vzorek na obr. 5.36, kde můžeme jasně vidět rovnoměrné teplotní pole téměř po celé ploše, až na prostor uvnitř kontrolní oblasti. Maximální teplota vzorku G_1 je sice o $3,8 \text{ °C}$ nižší než u vzorku G_2 , nicméně průměrná teplota je o $1,3 \text{ °C}$ vyšší, to je dáno rovnoměrným rozložením teplot. Dále můžeme z teplotních diagramů zjistit, že vzorek G_2 se oproti G_1 výrazně přehřívá vlivem vyššího celkového odporu topného segmentu.

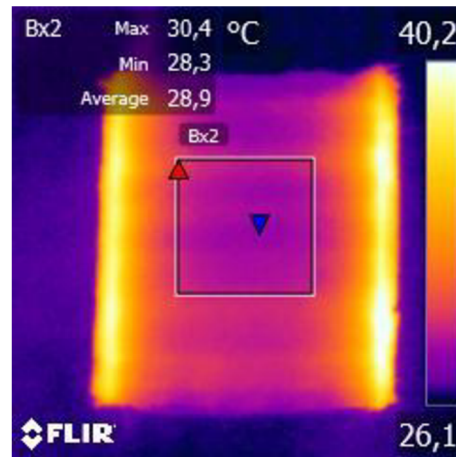
Prozatím se nám tedy potvrdilo, že ve třech ze čtyř případů dosahujeme nejlepších výsledků při použití tkaniny o hmotnosti $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

5.2.5 Měření topného segmentu typu H – epoxid s hliníkem

Jako poslední zkoušený topný segment ze standartního měření jsme testovali dva vzorky, kde byl epoxid smíchán s práškovým hliníkem. Byly změřeny dvě gramáže tkanin, tj. 200 a 420 g · m⁻². U hliníkového prášku nehrozí koroze se zvyšující se teplotou, naproti tomu má ale menší součinitel tepelné vodivosti než měď.



Obr. 5.38 Topný segment H₁



Obr. 5.39 Topný segment H₂

Na vzorku H₁ můžeme vidět výrazně vyšší teplotní maxima, u napájecího drátu, než u měřeného segmentu H₂. Ze sondy v kontrolní oblasti můžeme ale pozorovat, že průměrná teplota ve středu plochy je nižší u vzorku H₁. U obou vzorků pozorujeme velice kvalitní rozložení teploty přes plochu, nicméně vzorek H₂ se jeví pro naše použití vhodnější, protože není nutné jej napájet tak vysokým proudem, abychom dosáhli stejných teplot. A proto se nám podstatně sníží spotřeba energie umělé ruky. Při použití hliníkové příměsi se ukázalo, že je to jediný případ, kdy je vhodnější použít tkaninu o hmotnosti 420 g · m⁻². Toto tvrzení se ovšem vztahuje pouze na případy použití vodivých přísad do epoxidu.

5.3 Porovnání variant napájení

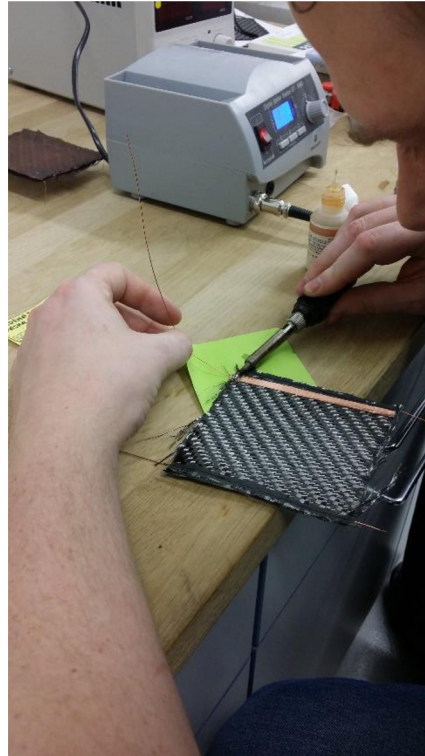
V této kapitole si uvedeme další způsoby vytvoření topného segmentu, které vyžadují dodatečné zkoumání, např. v další diplomové práci. Jedná se o způsoby odlišné od měření, které bylo hlavní náplní této diplomové práce, jejichž výsledky si v závěru porovnáme.

5.3.1 Napájení topného segmentu pomocí vodivé pásky

Jedním ze zkoušených způsobů bylo nahrazení odporového drátu vodivou páskou z mědi. Tato páska je vyráběna společností ELCHEMCo spol. s r.o., je zhotovena z měděné fólie o tloušťce 35 μm a šířce 6 mm. Páska je speciálně určena pro vytváření elektricky vodivých spojení. Vlastní spojení s uhlíkovou tkaninou je realizováno akrylátovým lepidlem, které zaručuje maximální odpor 0,005 Ω. Výrobce garantuje výbornou pájitelnost, a proto jsme se rozhodli pásku aplikovat pouze na tkaninu a v krajní části topného segmentu k pásce připájet odporový drát, který bude připojen do zdroje elektrického proudu. [27]



Obr. 5.40 Příprava pájení



Obr. 5.41 Průběh pájení

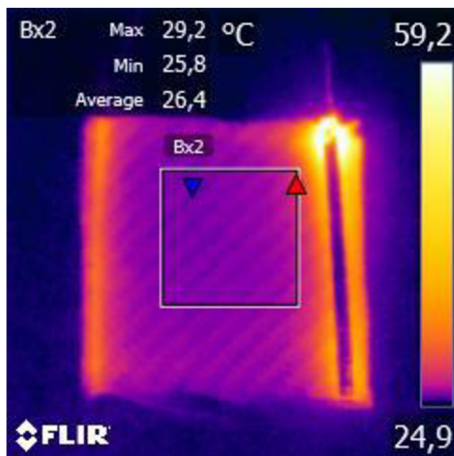
Na obr. 5.40 až 5.42 můžeme vidět přilepenou fólii na topném segmentu a průběh pájení. Vzorek připravený ke zkoušce má na levé straně klasické řešení, tedy odporový drát přilepený vodivým lepidlem a na pravé straně vodivou pásku přilepenou akrylátovým lepidlem, spojenou s odporovým drátem. Topný segment upravený tímto způsobem, bude označen písmenem P. Toto řešení jsme zvolili proto, aby na termogramu byl jasně patrný rozdíl mezi oběma spojeními.

Celková hodnota odporu měřeného vzorku P byla 22Ω , z toho plyne, že napájecí proud by měl být $0,3 \text{ A}$. V tomto měření jsme se rozhodli provést pět záznamů, vždy po 20 vteřinách pokaždé s vyšším proudem. Tento postup jsme zvolili, protože při napájecím proudu $0,3 \text{ A}$ byla teplota příliš nízká a vzorek se téměř nezahříval. Každých 20 sec jsme zvýšili napájecí proud o $0,5 \text{ A}$, nominální napájecí proud měl hodnotu $0,5 \text{ A}$.

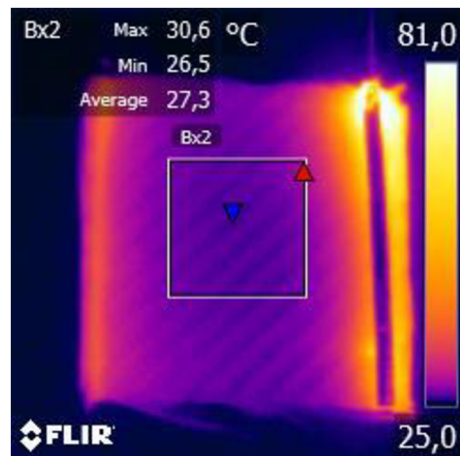


Obr. 5.42 Dva způsoby napájení

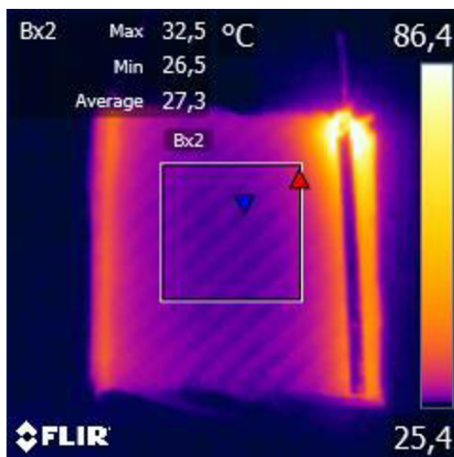
Na sérii pěti obrázků, tj. obr. 5.43 až 5.47, vidíme vývoj rozložení teploty přes plochu vzorku, použili jsme tkaninu o hmotnosti $420 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ s epoxidovým povlakem.



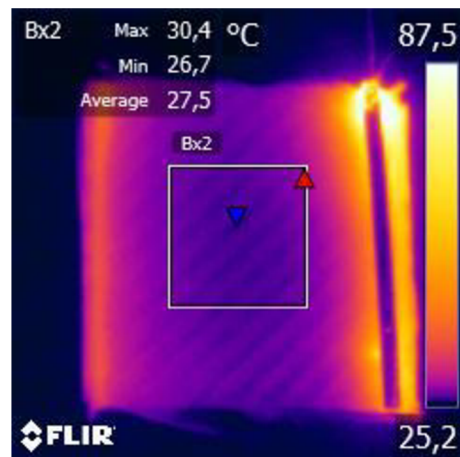
Obr. 5.43 Topný segment P v T= 20 sec



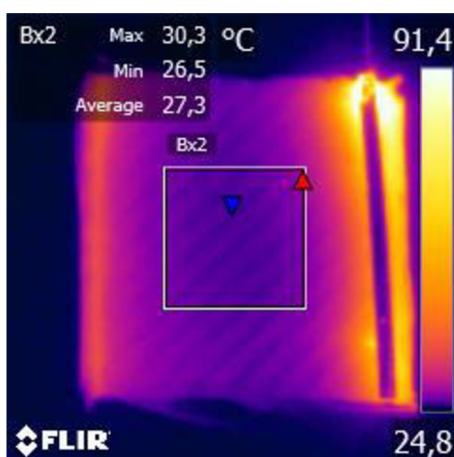
Obr. 5.44 Topný segment P v T= 40 sec



Obr. 5.45 Topný segment P v T= 60 sec



Obr. 5.46 Topný segment P v T= 80 sec



Obr. 5.47 Topný segment P v T= 100 sec

Na vzorcích můžeme vidět, že rozložení teploty oproti odporovému drátu se výrazně nemění, ale kvůli zvyšujícímu se napájecímu proudu a vysokému odporu se extrémně zvyšuje maximální teplota v místě spojení odporového drátu s měděnou fólií. Na sérii obrázků na straně č. 63 vidíme, že i při teplotě téměř 100 °C je průměrná teplota v kontrolní oblasti nižší než u topných segmentů upravených pomocí tepelně vodivých příměsí. Z toho plyne, že není naším cílem zvyšovat teplotu a napájecí proud, ale součinitel tepelné vodivosti.

Dalším jevem spojeným s vývojem průměrné teploty, jenž lze pozorovat na obrázcích 5.43 až 5.47 je to, že při zvyšující se teplotě se průměrná teplota od určitého bodu přestane zvyšovat. Na obr. 5.45 je průměrná teplota kontrolní oblasti stejná jako na obr. 5.44, kde je maximální teplota o 5,4 °C nižší. Při zvýšení maximální teploty o dalšího 1,1 °C (viz obr. 5.46) se průměrná teplota zvýší už pouze o 0,2 °C. A pokud se zvyšováním teploty přidáváním napájecího proudu pokračujeme, zjistíme, že průměrná teplota začne dokonce klesat (viz obr. 5.47), kde při maximální teplotě 91,4 °C je průměrná teplota o 0,2 °C nižší než u vzorku 5.46.

Z poznatků, zjištěných v této kapitole č. 5.3.1, se ukázal tento způsob jako nevhodný pro naši aplikaci, a sice návrhu zařízení pro měření tepelného odporu rukavic. Další zkoumání by ukázalo, že elektrické odpory vzniklé spojením pásky jsou příliš vysoké a tím pádem i teploty rostou do extrémních hodnot. V našem případě měření skončilo roztavením topné pásky ve spoji a tím k jeho porušení.

5.3.2 Další provedené experimenty

Byla provedena řada doplňujících experimentů, abychom si udělali co nejlepší představu o využitelnosti dalších způsobů výroby materiálu, ze kterého je vhodné umělou ruku sestavit.

PAPÍROVÝ ZÁKLAD S PŘÍMĚSÍ

Jedním ze zkoušených postupů byla aplikace vodivých materiálů na papírovou lepicí fólii. Testování proběhlo na následujících vzorcích:

P_1	čistý papír	[-]
P_2	papír posypaný grafitovým práškem, přes grafit byl nanesen bezbarvý lak	[-]
P_3	Papír, na který byl aplikován zinkový sprej	[-]

Papírové segmenty nebyly nastříhány na čtverce o ploše 100 cm² z toho důvodu, že jsme již od začátku měření předpokládali, že v experimentu nebudeme pokračovat.

Byl použit grafitový prášek uvedený v kapitole 5.1.1., bezbarvý lak od výrobce PRESTO, viz obr. 5.51 a zinkový sprej vyráběný společností DUPLI-COLOR, uvedený na obr. 5.52.



Obr. 5.48 Vzorek P_1

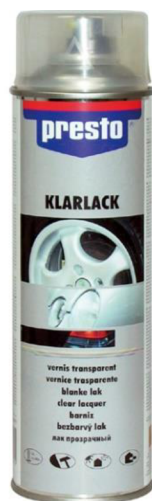


Obr. 5.49 Vzorek P_2



Obr. 5.50 Vzorek P_3

Všechny tyto vzorky se projevily jako zcela nevhodné pro naši aplikaci, u topného segmentu P_1 se ukázalo, že měl neměřitelný odpor naším multimetrem, tedy elektrický odpor vzorku P_1 byl vyšší než 20 M Ω . Topný segment $P_2 = 0,5$ M Ω a $P_3 = 5,1$ M Ω . Tento odpor byl měřený na vzdálenosti 200 mm.



Obr. 5.51 Bezbarvý lak [28]

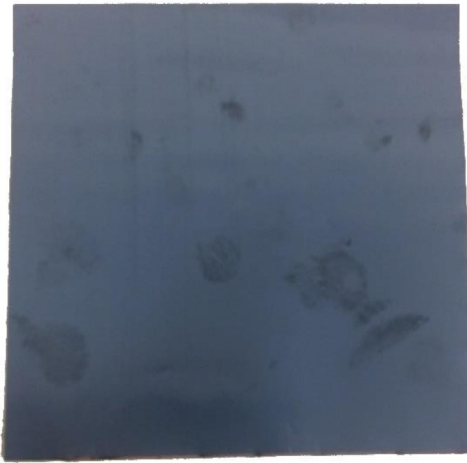


Obr. 5.52 Zinkový sprej [28]

KAPTONOVÁ FÓLIE

Dalším zkoušeným prvkem byl topný segment vytvořený z kaptonové fólie. Jedná se o speciální polyamidovou (PI) fólii, opatřenou elektricky vodivou uhlíkovou vrstvou, jež je vyráběna společností ELCHEMCo. Celková tloušťka materiálu byla 50 μm . Elektricky vodivý povrch zajišťuje speciálně vytvořená odporová vrstva uhlíku nanesená na PI folii. Odporová filmová vrstva je odolná proti ozáření i stárnutí, pružná, chemicky stabilní a výborně vede teplo. [29]

Použitá kaptonová fólie má definované maximální zatížení 6 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$. Napájení PI fólie bylo opět realizováno měděnou vodivou páskou a odporovým drátem. [29]



Obr. 5.53 Kaptonová fólie, topný segment K

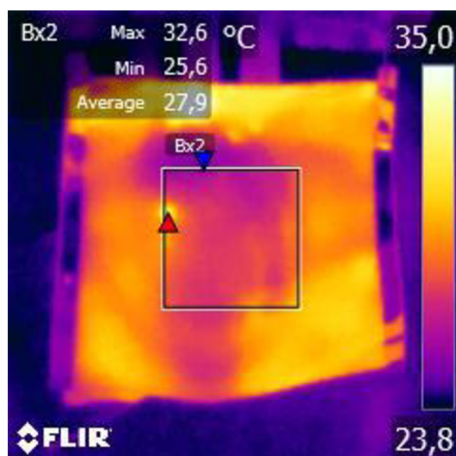
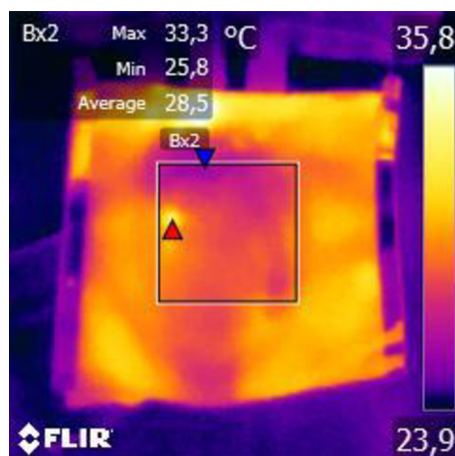
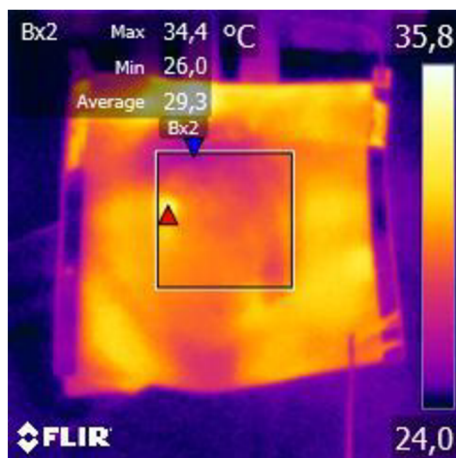
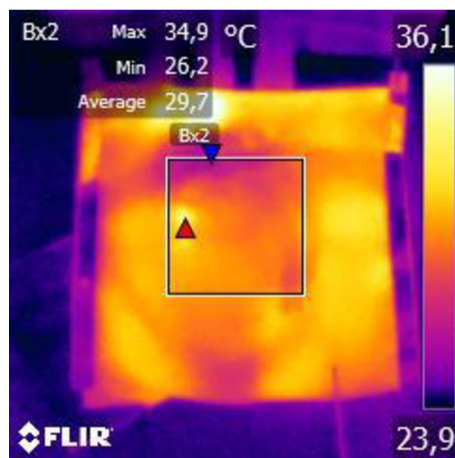


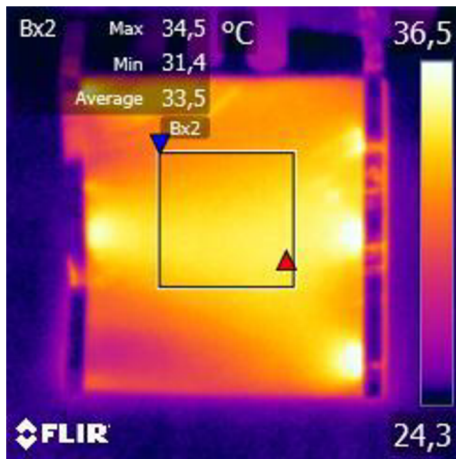
Obr. 5.54 Kaptonová fólie, topný segment K, opatřena napájecím systémem

Jak můžeme vidět na obr. 5.54, po aplikaci měděné vodivé pásky má kaptonová fólie tendenci se kroutit. Na záznamech z měření níže uvidíme, že výsledky jsou

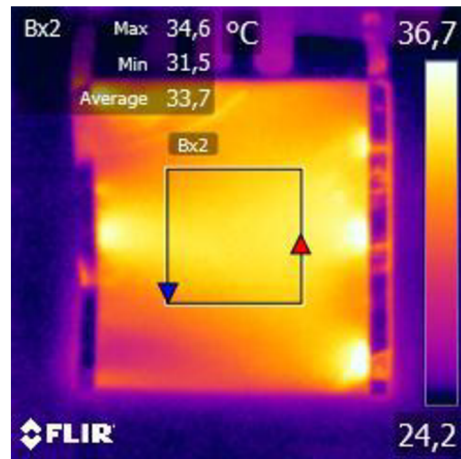
výrazně zkreslené. Vlivem zkroucení fólie na topný segment dopadá škodlivé záření tepla z okolních povrchů. Proto nelze považovat tyto výsledky za vypovídající. Kaptonová fólie je tedy vhodná z hlediska vedení tepla, mechanické vlastnosti povrchu však vnáší do měření výrazné chyby.

Měřený vzorek z kaptonové fólie je označený *K* a dle vztahu pro výpočet napájecího proudu, uvedeného v kapitole 5.1.4, jsme spočetli napájecí proud 0,13 A. Na obrázcích 5.55 až 5.60 je uveden záznam z měření, pořízený vždy po 20 sec, kde bylo zkoumáno šíření teploty přes plochu topného segmentu. Jak můžeme vidět, kaptonová fólie je z hlediska součinitele tepelné vodivosti velice vhodná, oproti vzorkům vytvořených z keprové karbonové tkaniny, dosahuje vyšších průměrných teplot. Díky nižším odporům PI fólie pozorujeme v místě spojení měděné pásky nižší teploty, a proto nedochází k přehřívání na okrajích. Všechny vzorky vytvořené z PI fólie vykazují nižší teploty měděné pásky než vlastní topného segmentu, což je pro naši aplikaci velmi důležité. Nevýhodou těchto vzorků je nerovnoměrnost rozložení teplot. Jak již bylo zmíněno, vlivem škodlivého tepelného záření nedosahujeme uspokojivých hodnot. Na obr. 5.59 a 5.60 jsou teploty rovnoměrné vlivem napnutí fólie, což by bylo při výrobě topné ruky, jako celku, téměř nereálné.

Obr. 5.55 Topný segment *K* v $T=20$ secObr. 5.56 Topný segment *K* v $T=40$ secObr. 5.57 Topný segment *K* v $T=60$ secObr. 5.58 Topný segment *K* v $T=80$ sec



Obr. 5.59 Topný segment K v $T = 100$ sec



Obr. 5.60 Topný segment K v $T = 120$ sec

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout materiál vhodný určený k sestrojení zařízení pro měření tepelného odporu rukavic. S tímto úkolem byl spojen také návrh koncepce klimatizační komory.

Zařízení pro měření tepelného odporu rukavic, jež jsou určena ke komerčnímu prodeji, jsou velice drahá a jejich výrobou se zabývá pouze několik společností. Společně s doktorem Hejčíkem jsme se pokusili o analýzu materiálů, které by cenu přístroje výrazně snižovaly a přitom zachovaly jeho použitelnost v praxi.

Klimatizační komora byla navržena jako kompresní klimatizační zařízení s nepřímým chlazením vnitřního mikroklimatu, přičemž příprava teplotně vodivé látky bude probíhat mimo vlastní komoru. Zařízení pracuje na principu obráceného tepelného cyklu, znázorněného v T-s diagramu (viz. obr. 4.8). Protože moderní klimatizační komory zpravidla umožňují také ohřívání vnitřního mikroklimatu, zvolili jsme chladicí médium Paratherm LR, které umožňuje chlazení i ohřev a to v rozsahu teplot od -73 °C ÷ 232 °C . Právě 232 °C je horní hranice teploty, kde výrobce zaručuje použití jen s minimální degradací vlastností teplotně vodivé látky.

Jako hlavní konstrukční prvek umělé ruky jsme uvažovali karbonovou tkaninu potaženou epoxidem. Tuto variantu jsme zvolili z důvodů uvedených v kapitole č. 5. Zejména se však jedná o dobrou tvarovatelnost materiálu a dobré tepelně vodivé vlastnosti. Byl vytvořen soubor vzorků, na nichž jsme prováděli analýzu rozložení teplot. V průběhu práce jsme se snažili dosáhnout co nejvíce rovnoměrných teplotních polí na povrchu jednotlivých topných segmentů. Tato část byla prováděna přidáním teplotně vodivých příměsí, konkrétně se jednalo o práškový grafit, hliník a měď.

Topné segmenty jsme napájeli pomocí elektrického proudu, jehož hodnota byla určena ze vztahu č. 5.3. Analyzovali jsme rozdíly typů napájení pomocí odporového drátu a měděné vodivé pásky. V kombinaci s kompozitní tkaninou se nejevil žádný z těchto dvou způsobů dostačující. Jako vhodné řešení jsme nakonec zvolili měděnou pásku, ovšem pouze v kombinaci s kaptonovou fólií. Zejména z toho důvodu, že napájecí systém vytvořený pomocí vodivé pásky, aplikovaný na kaptonovou fólii, se tolik nepřehříval. Jeho teplota byla nižší než teplota povrchu topného segmentu, což je v naší aplikaci velkou výhodou.

Nicméně po kompletní analýze uhlíkové tkaniny, ve všech typech provedení, jsme byli nuceni provést dodatečné experimenty a to na kaptonové fólii. Karbonová tkanina nepodávala uspokojivé výsledky z hlediska rozložení teplot, ani z hlediska průměrné teploty na povrchu.

Naproti tomu kaptonová fólie nám poskytla velmi zajímavé hodnoty ve všech parametrech, ve kterých uhlíková tkanina zaostávala. Dosahovala vyšších průměrných teplot na povrchu, napájecí systém se nepřehříval a v případě napnuté fólie byla velice uspokojivá rovnoměrnost teplotního pole na povrchu. Nicméně kaptonová fólie má tendenci se kroutit a na obr. 5.55 ÷ 5.60 můžeme vidět, že výsledky jsou výrazně zkresleny škodlivým zářením tepla z okolních povrchů. Toto řešení tedy lze použít pouze pro plošné části.

Protože je lidská ruka složitý útvar, tak bychom jako konečné řešení doporučili vytvořit umělou ruku z karbonového základu, kde budou zhotoveny vodivé cesty z kaptonové fólie. Takto upravená karbonová tkanina bude z každé strany pokryta skelnou rohoží, která bude potažena epoxidovým nátěrem. Dle získaných výsledků, by toto řešení mělo podávat nejvíce uspokojivé výsledky pro naši aplikaci a určitě bychom doporučili jeho rozbor v dalších odborných textech zaměřených na toto téma.

Tato práce slouží jako základ pro další zkoumání problematiky při konstrukci zařízení určeného k měření tepelného odporu rukavic. Poskytuje teoretický podklad z hlediska normativních předpisů (viz. EN 511) a také praktický základ z hlediska provedených experimentů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Energetické fórum. *Energetické fórum* [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelny-mankyn-newton
- [2] Janotková, E.: *Technika prostředí - 1. a 2. část*. Elektronická skripta FSI VUT v Brně, Brno 2014. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [www.studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi \(CS\)](http://www.studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi (CS))
- [3] BERGMAN, T a Frank P INCROPERA. *Fundamentals of heat and mass transfer* [online]. 7th ed. / . Hoboken, NJ: Wiley, c2011, xxiii, 1048 p. [cit. 2016-01-26]. ISBN 9780470501979
- [4] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001, 160 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [5] *Ochranné rukavice proti chladu*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [6] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [7] PAVELEK- ŠTĚTINA: *Experimentální metody v technice prostředí*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 3. vyd. 215 s. ISBN 978-80-214-3426-4
- [8] *Ochranné rukavice proti mechanickým rizikům*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [9] *Ochranné rukavice - Všeobecné požadavky a metody zkoušení*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [10] *Textilie povrstvené pryží nebo plasty - Zjišťování odolnosti proti poškození ohybem*. 2. vyd. Velká Británie: BSI, 1996. ISBN 0-580-26001-1.
- [11] *Textilie povrstvené pryží nebo plasty - Zkouška ohybu při nízké teplotě*. 1. vyd. Ženeva: International Organization for Standardization, 2010.
- [12] *Textilie - stanovení tepelné odolnosti - část 1: odolnost při nízké teplotě*. 1. vyd. Ženeva: International Organization for Standardization, 1989.
- [13] *Ochranné rukavice - Laboratorní metody zkoušení a požadavky na provedení*. 1. vyd. Ženeva: International Organization for Standardization, 2001.
- [14] MEASUREMENT TECHNOLOGY NORTHWEST. *Thermal Measurement & Line Control Products* [online]. Seattle, WA, 2012 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: www.mtnw-usa.com
- [15] CM ENVIROSYSTEMS. *CME* [online]. 2014. 2014 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: www.cmenvirosystems.com
- [16] PARATHERM HEAT TRANSFER FLUIDS. *Paratherm Heat Transfer Fluids* [online]. King of Prussia, PA, 1995 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: www.paratherm.com
- [17] BEIJER REF. *Beijer Ref Czech s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: www.beijerref.cz

- [18] *Kordcarbon* [online]. Velká nad Veličkou, 1999 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: www.kordcarbon.cz
- [19] *Bellus - průmyslové sítě a tkaniny* [online]. Břeclav, 2001 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: www.bellus.cz
- [20] *UNI-TREND* [online]. Opava: EVici, 2013 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: www.uni-t.cz
- [21] *Aim-TTi* [online]. Cambridgeshire: Glebe Rd, 2008 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: www.aimtti.com
- [22] *Testo, Inc.* [online]. Lenzkirch, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: www.testo.com
- [23] *FLIR Systems* [online]. Helsinky, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: www.flir.eu
- [24] *Fichema s.r.o.* [online]. Brno, 2006 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: www.fichema.cz
- [25] *TZB-Info* [online]. Brno: Topinfo, 2001 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: www.tzb-info.cz
- [26] Epoxidové laminační systémy. *Letoxit* [online]. 2011, 3 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://eshop.5mslovakia.sk/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=356&virtuemart_category_id=19
- [27] *GM Electronic* [online]. Brno, 1990 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: www.gme.cz
- [28] *Motip Dupli* [online]. Haßmersheim, 2010 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: www.motipdupli.com
- [29] *ELCHEMCo spol. s r.o.* [online]. Praha 10, 2010 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: www.elchemco.cz

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Veličina	Popis veličiny	Jednotka
1	napájecí kabely topných snímačů	-
2	napájecí kabely topných článků	-
ΔT	diference teplotního potenciálu	K
ΔU	diference potenciálu elektrického napětí	V
ΣR_t	suma odporů ovlivňujících celkový tepelný tok	$K \cdot W^{-1}$
A	absorptance	-
Bx2	zvolená kontrolní oblast snímku kamery i7	-
c	měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
COP	chladicí faktor (coefficient of performance)	-
c_p	měřená tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
E_0	zářivost absolutně černého tělesa	$W \cdot m^{-2}$
E_1	vzorek s laminací bez příměsi	-
E_2	vzorek s laminací bez příměsi	-
E_3	vzorek s laminací bez příměsi	-
f_{cl}	poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu lidského těla	-
G_1	vzorek s laminací a grafitovým práškem	-
G_2	vzorek s laminací a grafitovým práškem	-
G_3	vzorek s laminací a grafitovým práškem	-
h_{cl}	výška člověka	m
h	entalpie	J
H_1	vzorek s laminací a hliníkovým práškem	-
H_2	vzorek s laminací a hliníkovým práškem	-
I	elektrický proud	A
I_{cl}	charakteristika tepelného odporu oděvu	clo
I_{TR}	izolační schopnost materiálu	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
K	kompresor	-
kr	kritický bod	-
l_{23}	měrné výparné teplo vody	$kJ \cdot kg^{-1}$
LR	označení teplotnosné látky	-
m_{cl}	hmotnost člověka	kg

M_1	vzorek s laminací a měděným práškem	-
M_2	vzorek s laminací a měděným práškem	-
\dot{m}_{vzd}	hmotnostní tok vzduchu plícemi	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
O_1	vzorek bez laminace	-
O_2	vzorek bez laminace	-
O_3	vzorek bez laminace	-
p_p	tlak páry	kPa
p	tlak	Pa
P	elektrický výkon	W
P_1	vzorek čistý papír	-
P_2	vzorek papír s grafitem	-
P_3	vzorek papír se zinkovým sprejem	-
$p_{p(t)}$	parciální tlak vodních par v okolním vzduchu	Pa
$p'_{p(tk)}$	parciální tlak sytých vodních par při střední teplotě pokožky t_k	Pa
\dot{Q}	tepelný tok	W
q	měrné teplo 1 kg pracovní látky	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
q_c	měrné teplo přivedené do soustavy	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
\dot{Q}_d	tepelný tok odvedený dýcháním	W
q_H	měrné teplo odvedené ze soustavy	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
Q_{in}	množství energie dodané do měřené oblasti umělé ruky během ustáleného stavu	W
\dot{Q}_k	tepelný tok odvedený konvekcí	W
\dot{Q}_m	metabolický tepelný tok	W
\dot{q}_m	hustota metabolického tepelného toku	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
\dot{Q}_r	tepelný tok odvedený radiací	W
\dot{Q}_v	tepelný tok odvedený vypařováním	W
\dot{Q}_{ved}	tepelný tok odvedený vedením tepla	W
\dot{Q}_{vm}	teplotní tok odvedený mokrým pocením	W
\dot{Q}_{vs}	teplotní tok odvedený suchým pocením	W
\dot{Q}_x	tepelný tok ve směru osy X	W
$\dot{Q}_{x, \text{kontakt}}$	tepelný tok ve směru osy X, ve styku povrchů	W
$\dot{Q}_{x, \text{mezera}}$	tepelný tok ve směru osy X, mezerou mezi povrchy	W
r	reflektance	-

R	elektrický odpor	Ω
R_{cl}	tepelný odpor oděvu	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
R_k	tepelný odpor konvekce	$K \cdot W^{-1}$
R_{rad}	tepelný odpor radiací	$K \cdot W^{-1}$
R_t	odpor ovlivňující celkový tepelný tok	$K \cdot W^{-1}$
$R''_{t,c}$	kontaktní odpor	$K \cdot W^{-1}$
RV	redukční ventil	-
R_{ved}	tepelný odpor vedení tepla	$K \cdot W^{-1}$
S	plocha, přes kterou se realizuje přestup tepla	m^2
s	entropie	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
S_{cl}	povrch oblečeného člověka	m^2
S_R	povrch lidského těla přenášející teplo radiací	m^2
SR	srážník	-
S_T	plocha povrchu těla	m^2
T	teplota	K
t	transmitance	-
T_{∞}	teplota okolního vzduchu	K
t_{∞}	teplota okolního vzduchu	$^{\circ}C$
$T_{\infty,1}$	teplota teplejšího média	K
$T_{\infty,2}$	teplota chladnějšího média	K
$T_{(x)}$	změna teploty v závislosti na tloušťce stěny	K
$T_{(y)}$	velikost teploty v závislosti na vzdálenosti od povrchu	K
T_1	teplota teplejšího povrchu	K
T_2	teplota chladnějšího povrchu	K
T_A	teplota teplejší vrstvy materiálu	K
T_B	teplota chladnější vrstvy materiálu	K
t_k	střední teplota pokožky	$^{\circ}C$
T_S	střední radiační teplota	K
T_{sur}	střední radiační teplota, teplota všech okolních povrchů	K
t_v	teplota vydechovaného vzduchu	$^{\circ}C$
T_w	střední teplota vnějšího povrchu oděvu	K
$T_{w,1}$	teplota stěny teplejšího povrchu	K
$T_{w,2}$	teplota stěny chladnějšího povrchu	K

T_x	teplota testovacího prostoru komory	K
T_y	teplota v místnosti	K
U	elektrické napětí	V
u_{∞}	rychlost proudění vně mezní vrstvy	$m \cdot s^{-1}$
$u_{(y)}$	velikost rychlosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu	$m \cdot s^{-1}$
V	výparník	-
v	měrný objem 1 kg oracovní látky	$m^3 \cdot kg^{-1}$
x	měrná vlhkost vdechovaného vzduchu	$kg \cdot kg_{s.v.}^{-1}$
x''	měrná vlhkost vydechovaného a vlhkostí nasyceného vzduchu	$kg \cdot kg_{s.v.}^{-1}$
x_0	vzdálenost v ose stěny ve směru osy X	m
α	součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
α_1	součinitel přestupu tepla teplejšího média	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
α_2	součinitel přestupu tepla chladnějšího média	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
δ	tloušťka stěny (respektive oděvu)	m
δ_A	tloušťka stěny A (respektive oděvu)	m
δ_B	tloušťka stěny B (respektive oděvu)	m
δ_C	tloušťka stěny C (respektive oděvu)	m
ε	poměrná zářivost	-
ε_c	chladičí faktor (coefficient of performance)	-
λ	součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_A	součinitel prostupu tepla stěnou A	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_B	součinitel prostupu tepla stěnou B	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_C	součinitel prostupu tepla stěnou C	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
η	mechanická účinnost lidského těla	-
μ	dynamická viskozita	$N \cdot s \cdot m^{-2}$
ν	kinematická viskozita	$mm^2 \cdot s^{-1}$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
φ	relativní vlhkost okolního vzduchu	%
AČT	absolutně černé těleso	
COP	coefficient of performance (chladičí faktor)	
PI	polyamid	

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Č. obr.	Název	Č. strany
Obr. 1	svlečený tepelný manekýn Newton	14
Obr. 2	oblečený tepelný manekýn Newton	14
Obr. 1.1	vedení tepla vlivem molekulární aktivity	17
Obr. 1.2	vedení tepla 1D stěnou	17
Obr. 1.3	vyvíjející se mezní vrstvy při konvekci	18
Obr. 1.4	nucená konvekce	19
Obr. 1.5	přirozená konvekce	19
Obr. 1.6	radiační výměna: a) na povrchu, b) mezi povrchem a rozlehlým okolím	22
Obr. 2.1	vedení tepla složenou stěnou	27
Obr. 2.2	pokles teploty vlivem kontaktního tepelného odporu	28
Obr. 3.1	požadavky na izolační schopnost v závislosti na intenzitě práce	30
Obr. 3.2	osmi zónové měřicí zařízení	34
Obr. 3.3	software pro zpracování výsledků měření	35
Obr. 3.4	měřicí zařízení pro určení tepelného odporu	35
Obr. 3.5	rozměry modelu ruky v mm	36
Obr. 4.1	klimatizační komora isGHP od společnosti Northwest Measurements	37
Obr. 4.2	topná deska společnosti Northwest Measurements	37
Obr. 4.3	cirkulační zařízení	38
Obr. 4.4	naznačené proudění v komoře	38
Obr. 4.5	klimatizační komora 120 BH od společnosti CME	39
Obr. 4.6	schéma koncepce klimatizační komory	40
Obr. 4.7	výparník od společnosti Luvata	40
Obr. 4.8	znázornění pracovního cyklu v T-s diagramu	42
Obr. 4.9	schéma zařízení	42
Obr. 4.10	rozsah pracovních teplot teplonosné látky Paratherm LR	43
Obr. 5.1	karbonová textilie 200 g·m ⁻²	45
Obr. 5.2	karbonová textilie 400 g·m ⁻²	45
Obr. 5.3	karbonová textilie 600 g·m ⁻²	45
Obr. 5.4	grafitový prášek	46

Obr. 5.5	směs grafitu s epoxidem	46
Obr. 5.6	měděný prášek	47
Obr. 5.7	hliníkový prášek	47
Obr. 5.8	směs hliníku s epoxidem	47
Obr. 5.9	příprava pro stříhání segmentů	48
Obr. 5.10	topné segmenty po nastříhání (vlevo je prototyp vzorku o menší ploše)	48
Obr. 5.11	čistý epoxid	49
Obr. 5.12	topné segmenty opatřené laminátovým povlakem	49
Obr. 5.13	elektrovodivé lepidlo Wire Glue	50
Obr. 5.14	odporový drát, nahoře očištěný od izolace	50
Obr. 5.15	topný segment spojený s odporovým drátem	50
Obr. 5.16	topný segment natřený čistým epoxidem	53
Obr. 5.17	topný segment natřený epoxidem s grafitem	53
Obr. 5.18	topný segment natřený epoxidem s mědí	53
Obr. 5.19	topný segment natřený epoxidem s hliníkem	53
Obr. 5.20	keprová vazba	53
Obr. 5.21	multimetr UT70B od společnosti UNI-Trend	54
Obr. 5.22	elektrický zdroj EL302P	54
Obr. 5.23	elektrický zdroj EL302P	54
Obr. 5.24	teploměr Testo 605i	54
Obr. 5.25	termokamera FLIR i7	55
Obr. 5.26	legenda k termogramu pořízeného termokamerou i7	56
Obr. 5.27	topný segment O1	57
Obr. 5.28	topný segment O2	57
Obr. 5.29	topný segment O3	57
Obr. 5.30	topný segment E1	58
Obr. 5.31	topný segment E2	58
Obr. 5.32	topný segment E3	58
Obr. 5.33	topný segment G1	59
Obr. 5.34	topný segment G2	59
Obr. 5.35	topný segment G3	59
Obr. 5.36	topný segment M1	60

Obr. 5.37	topný segment M2	60
Obr. 5.38	topný segment H1	61
Obr. 5.39	topný segment H2	61
Obr. 5.40	příprava na pájení	62
Obr. 5.41	průběh pájení	62
Obr. 5.42	dva způsoby napájení	62
Obr. 5.43	topný segment P v T= 20 sec	63
Obr. 5.44	topný segment P v T= 40 sec	63
Obr. 5.45	topný segment P v T= 60 sec	63
Obr. 5.46	topný segment P v T= 80 sec	63
Obr. 5.47	topný segment P v T= 100 sec	63
Obr. 5.48	vzorek P1	65
Obr. 5.49	vzorek P2	65
Obr. 5.50	vzorek P3	65
Obr. 5.51	bezbarvý lak	65
Obr. 5.52	zinkový sprej	65
Obr. 5.53	kaptonová fólie, topný segment K	66
Obr. 5.54	kaptonová fólie, topný segment K, opatřena napájecím systémem	66
Obr. 5.55	topný segment K v T= 20 sec	67
Obr. 5.56	topný segment K v T= 40 sec	67
Obr. 5.57	topný segment K v T= 60 sec	67
Obr. 5.58	topný segment K v T= 80 sec	67
Obr. 5.59	topný segment K v T= 100 sec	68
Obr. 5.60	topný segment K v T= 120 sec	68
Č. tabulky	Název	Č. strany
Tab. 1.1	tepelný odpor pro některé druhy oděvů	24
Tab. 3.1	parametry důležité při výběrovém procesu	29
Tab. 3.2	třídy provedení dle hodnot tepelné izolace pro konvekční chlad	31
Tab. 3.3	třídy provedení dle hodnot tepelného odporu pro konvekční chlad	31
Tab. 4.1	fyzikální vlastnosti teplotní látky Paratherm LR	44
Tab. 4.2	rychlost změny teploty v klimatizační komoře 120 BH	44
Tab. 5.1	naměřené odpory a přepočtené napájecí proudy topných s.	52

