

Vliv typu elastomeru na vývoj tepla cyklicky zatěžované pryže

Jan Mitev

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jan Mitev
Osobní číslo:	T20159
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Vliv typu elastomeru na vývoj tepla cyklicky zatěžované pryže

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární rešerši.
- Připravit gumárenské směsi, jejichž základem budou různé typy kaučuku.
- Vyrobit zkušební tělíska pro experimentální analýzy.
- Provést experimentální analýzy založené na mechanických zkouškách.
- Porovnat výsledky vývoje tepla na povrchu a uvnitř materiálu.
- Zdokumentovat teplotní gradient na povrchu vzorku.
- Vyhodnotit vliv typu kaučuku na vývoj tepla v pryži.

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

Seznam doporučené literatury:

- Rizuan, M. I. R., Wahab, M. A. A., Romli, A. Y. Effect of Carbon Black Structures Towards Heat Build-Up Measurements and its Dynamic Properties, *Advanced Materials Research*, 2015, Vol. 1134, 131-137.
- Marco, Y., Masquelier, I., le Saux, V., Charrier, P. Fast Prediction of The Wöhler Curve From Thermal Measurements For A Wide Range of NR and SBR Compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 2017, 90(3), 487–507.
- Stoček, R., Stěnička, M., Kipscholl, R. (2019) Heat Build-up Characterization Under Realistic Load, *Constitutive Models for Rubber XI – Proceedings of the 11th European Conference on Constitutive Models for Rubber*, 2019, 157-162.
- Luo, W., Huang, Y., Yin, B., Jiang, X., & Hu, X. Fatigue Life Assessment of Filled Rubber by Hysteresis Induced Self-Heating Temperature. *Polymers*, 2020, 12(4), 846.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Kratina, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Přesto, že transformace kinetické energie v teplo je u viskoelastických látek dobře známým jevem, nebyl tento jev dosud zcela přesně popsán. Vývin tepla u cyklicky zatěžovaných pryží je důležitým indikátorem odhadu jejich funkční životnosti. Tato bakalářská práce si klade za cíl porovnat termomechanické chování cyklicky zatěžovaných pryží založených na různých typech elastomerů, resp. kaučuků. Průběh měření ukázal rozdíly v kinetice růstu teploty jednotlivých typů pryží a některé souvislosti s jejich mechanickými vlastnostmi. Výsledky i další možné směry výzkumu široce diskutovány.

Klíčová slova: elastomer, kaučuk, pryž, sdílení tepla, statistická teorie elasticity pryže, viskoelasticita, cyklické namáhání, transformace energie, růst tepla

ABSTRACT

Although the transformation of kinetic energy into heat is a well-known phenomenon in viscoelastic materials, this phenomenon has not been described with complete accuracy. The heat evolution of cyclically loaded rubbers is an important indicator for estimating their functional lifetime. This bachelor thesis aims to compare the thermomechanical behaviour of cyclically loaded rubbers based on different types of elastomers or rubbers. The course of measurements showed differences in the temperature rise kinetics of the different types of rubbers and some connections with their mechanical properties. The results and other possible research directions are discussed extensively.

Keywords: elastomer, rubber, heat transfer, statistical theory of rubber elasticity, viscoelasticity, cyclic loading, energy transformation, heat build-up

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Kratinovi, Ph.D. za množství konzultací, cenných rad a připomínek. Dále potom panu Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc. za pomoc s realizací a vyhodnocením termografických měření. Mé poděkování patří také panu Ing. Danielu Husárovi za pomoc při výrobě testovacích vzorků.

Fyzika je jako sex, může přinést praktické výsledky, ale to není důvod, proč to děláme.

Richard P. Feynman

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 GUMÁRENSKÉ SMĚSI	11
1.1 ELASTOMERY	11
1.1.1 Přírodní kaučuk	11
1.1.2 Syntetické kaučuky	12
1.2 PŘÍSADY	15
1.2.1 Plniva.....	15
1.2.2 Aktivátory	16
1.2.3 Stabilizátory	16
1.2.4 Vulkanizační činidla.....	16
1.2.5 Akcelerátory	16
1.2.6 Další přísady.....	17
2 VÝROBNÍ PROCES VULKANIZÁTU	18
2.1 MÍCHÁNÍ	18
2.2 TVÁŘENÍ	18
2.3 VULKANIZACE.....	18
3 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PRYŽÍ	21
3.1 STATISTICKÁ TEORIE ELASTICITY PRYŽE	21
3.1.1 Termodynamické hledisko deformace kaučukových sítí.....	22
3.2 VISKOELASTICITA	23
3.2.1 Brzděná konformační elasticita.....	24
3.2.2 Ideálně elastický materiál.....	24
3.2.3 Ideálně viskózní materiál	25
3.2.4 Viskoelastický materiál	26
3.2.5 Komplexní modul pružnosti.....	27
3.2.6 Činitel vnitřního tlumení	28
3.2.7 Energetické poměry při deformaci viskoelastických látek	28
3.2.8 Vliv strukturních faktorů.....	29
4 VLIV TEPLoty NA ÚNAVY PRYŽÍ	30
4.1 STANOVENÍ MEZE ÚNAVY PRYŽÍ.....	31
4.1.1 Termografická metoda pro rychlé staovení meze únavy	31
5 ŠÍŘENÍ TEPLA	33
5.1 ŠÍŘENÍ TEPLA KONDUKČÍ	33
5.2 ŠÍŘENÍ TEPLA KONVEKČÍ	34
5.3 ŠÍŘENÍ TEPLA RADIACÍ.....	35
6 MĚŘENÍ TEPLoty	39

6.1	KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	39
6.2	BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	40
6.2.1	Přístroje pro bezkontaktní měření teploty	40
6.2.2	Termografie	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
7	CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	45
8	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	46
8.1	MÍCHÁNÍ GUMÁRENSKÝCH SMĚSÍ	46
8.2	URČENÍ VULKANIZAČNÍCH CHARAKTERISTIK	49
8.3	LISOVÁNÍ A VULKANIZACE	50
9	POPIS PROVEDENÝCH ZKOUŠEK	53
9.1	ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY	53
9.2	POPIS ZAŘÍZENÍ HEAT BUILD-UP ANALYSER	53
9.3	PRŮBĚH MĚŘENÍ RŮSTU TEPLoty PYROMETREM A KONTAKTNÍM SNÍMAČEM	55
9.4	PRŮBĚH MĚŘENÍ RŮSTU TEPLoty TERMOKAMEROU	56
10	VÝSLEDKY ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	57
11	VÝSLEDKY MĚŘENÍ RŮSTU TEPLoty PŘI CYKLICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ	60
11.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ PYROMETREM A KONTAKTNÍM SNÍMAČEM	60
11.1.1	Určení 1. fáze průběhu růstu teploty	62
11.1.2	Regrese získaných dat	63
11.1.2	Vztah růstu teploty a ztrátového dynamického modulu ve smyku	66
11.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ TERMOKAMEROU	67
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	81
	SEZNAM TABULEK	82
	SEZNAM GRAFŮ	83

ÚVOD

V dnešní době jsou výrobky z pryží masivně rozšířené napříč většinou odvětví lidské činnosti a významně ovlivňují náš každodenní život. Jejich převládající vlastností je elastické zotavení po deformaci. Kromě toho se vyznačují velkou houževnatostí při statickém i dynamickém namáhání, mohou mít lepší odolnost vůči oděru než ocel, nepropustnost pro nízkomolekulární látky a v mnoha případech i vysokou odolnost vůči působení chemikálií. Kaučuky, stejně jako mnoho jiných polymerů, vykazují viskoelastické vlastnosti, které lze upravit přesně podle potřeb určené aplikace. Díky těmto vlastnostem jsou jako průmyslový materiál v mnoha odvětvích jen těžko nahraditelnými. Díky svým schopnostem tlumit vibrace nacházejí široké uplatnění pro součásti, které musejí dlouhodobě odolávat cyklickému namáhání, jako jsou např. pneumatiky vozidel, nebo široká škála izolačních a tlumících prvků. Zcela zásadní význam proto mají v automobilovém průmyslu, obuvnictví, stavebnictví nebo lékařství.

Vzhledem ke značnému množství různých druhů kaučuků, jejich modifikací a složitosti a specifikům gumárenské technologie má většina konstruktérů s pryžemi jen velmi málo zkušeností a nejsou si jisti, která pryž se svými vlastnostmi nejlépe hodí pro jimi vyžadované aplikace. Přestože fyzikální vlastnosti pryží jsou systematicky zkoumány již zhruba 100 let, za kterých byly učiněny významné pokroky, mnoho otázek, týkajících se plného objasnění dynamických vlastností pryží stále, není zcela zodpovězeno. Rozvoj metod zkoumání růstu teploty cyklicky zatěžovaných pryží umožňuje rychle a přesně odhadovat únavové chování takto zatěžovaných součástí. Proto má přímý význam pro technickou praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 GUMÁRENSKÉ SMĚSI

Nejdůležitější složkou gumárenských směsí jsou elastomery neboli kaučuky. Výsledné vlastnosti vulkanizátu však nejsou závislé jen na vlastnostech samotného elastomeru, ale lze je výrazně modifikovat přidávkou přesně definovaných přísad. Proto hovoříme o směsi. Množství přísad se přepočítává na určité množství kaučuku, vžil se označení *dsk* – dílů na sto dílů kaučuku, tedy počet hmotnostních dílů přísady, přidávané na sto hmotnostních dílů kaučuku. [1; 2; 3]

Tabulka 1 Standardní složení gumárenských směsí [1]

Přísada	dsk
Elastomer	100
Plniva	0-200
Změkčovadla	0-40
Aktivátory	0-40
Stabilizátory	0-10
Vulkanizační činidla	0,3-50
Akcelerátory	0,3-4
Další přísady	0-10

1.1 Elastomery

Elastomer je každý lineární nebo rozvětvený polymer, který je při běžné teplotě malou silou značně deformovatelný bez porušení, tedy vykazuje tzv. kaučukovou elasticitu. Dalšími typickými vlastnostmi jsou viskoelasticita, slabé mezimolekulové vazby a většinou nízký modul pružnosti v tahu. [3; 4; 5]

1.1.1 Přírodní kaučuk (NR)

Získává se koagulací latexu produkovaného některými rostlinami, především kaučukovníkem brazilským (lat. *Hevea brasiliensis*). Jedná se o koloidní disperzi *cis-1,4-polyizoprenu*. Získaný latex se cedí, ředí vodou a ošetřuje kyselinou (nejčastěji mravenčí nebo octovou), což umožňuje koagulaci suspendovaných kaučukových částic v latexu. Takto získaný materiál poté bývá lisován mezi válci na tenké pláty a sušen na vzduchu. U přírodních kaučuků je důležitý obsah nečistot, dle kterého se dělí na několik jakostí. [1; 3; 6]

1.1.2 Syntetické kaučuky

Vzrůstající nároky průmyslové výroby vedly k velkému zájmu o objev umělé syntézy kaučuku. Důležitost kaučuku zdůraznily a vývoj značně urychlily především obě světové války. V následující dekádě byla vyvinuta široká škála syntetických kaučuků a od 60. let 20. století byla výroba přírodního kaučuku překonána výrobou syntetických kaučuků, jejichž celosvětová produkce je v současné době zhruba 25 milionů tun ročně. [1; 3; 6; 7]

Syntetické kaučuky pro všeobecné použití:

Vyznačují se poměrně nízkou cenou a velkým objemem spotřeby. Lze z nich vyrábět většinu běžných pryžových výrobků, od různých dílů technické pryže přes spotřební zboží až po pneumatiky, hadice nebo dopravní pásy. Hlavními představiteli jsou polymery a kopolymery izoprenu a butadienu. Pryžím dávají vysokou pevnost a dobrou odolnost proti oděru spolu s vysokou odrazovou pružností. Až na výjimky jsou nenasycené a téměř nepolární, proto jsou náchylné k degradaci. [1; 3; 6; 7]

Butadienový kaučuk (BR)

Jedná se o homopolymery butadienu, vyrábějí se emulzní i roztokovou (častěji) polymerací za přítomnosti Zieglerových – Nattových katalyzátorů. Butadien je během polymerace zabudován ve třech možných konfiguracích, 95-98 % monomerních jednotek je spojených v poloze *cis-1, 4*, 1-3 % v poloze *trans-1, 4* a 1-2 % v poloze *1, 2*. BR má ze všech kaučuků pro všeobecné použití nejnižší teplotu skelného přechodu. Jednotlivé druhy BR se navzájem liší distribucí molekulových hmotností, větvením a uspořádáním monomerních jednotek v polymerním řetězci. Obvykle rozlišujeme typy s vysokým obsahem *cis* struktur, typy s nízkým obsahem *cis* struktur a vinylové typy. Samostatně se k výrobě pryže většinou nepoužívají kvůli jejich ne příliš dobré zpracovatelnosti. Jejich vulkanizáty však vynikají vysokou odolností vůči oděru a za účelem jejího zlepšení se přidávají do směsí na výrobky, kde se tato vlastnost významně uplatňuje, např. pro krycí vrstvy dopravníkových pásů a běhouny pneumatik. Kombinují se většinou s kaučukem přírodním, izoprenovým nebo butadien-styrenovým. [1; 3; 6; 7]

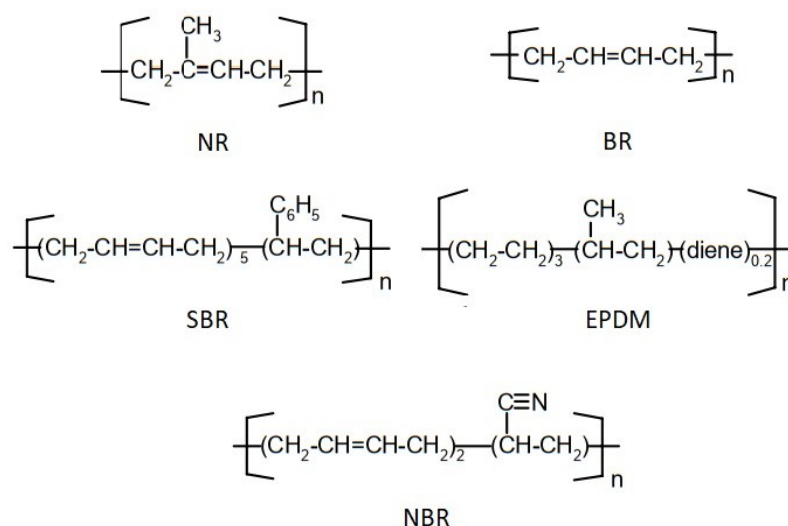
Styren butadienový kaučuk (SBR)

Jedná se o statistický kopolymer butadienu se styrenem v obsahu většinou 23-25 %. Vyrábí se nejčastěji tzv. studenou polymerací, tj. radikálovou emulzní kopolymerací při 5 °C, v menší míře také roztokovou kopolymerací za přítomnosti alkyllithiových katalyzátorů. K dosažení dobrých mechanických vlastností musí vulkanizát obsahovat

ztužující plniva. Existují i olejem nastavené typy (OE-SBR). Vlastnosti SBR vulkanizátů jsou podobné vlastnostem vulkanizátu z NR, avšak horní teplota aplikace leží výše. Pokrývají zhruba 1/2 spotřeby syntetických kaučuků. Jsou používány především pro výrobu běhounů automobilových pneumatik (do směsí plněných oxidem křemičitým) kde doplňují použití NR. [1; 3; 6; 7]

Ethylen-propylenové kaučuky (EPM, EDPM)

Dříve souhrnně označovány jako EPR. Vyrábějí se roztokovou kopolymerací za přítomnosti Zieglerových – Nattových katalyzátorů. Základním typem je kopolymer ethylenu s propylenem (EPM). Řetězce jeho makromolekul obsahují monomerní jednotky statisticky nahodile rozložené, jsou zcela nasycené, a tudíž velmi odolné vůči degradaci. Lze je vulkanizovat pouze peroxidy. Dalším typem jsou terpolymery ethylenu a propylenu s nekonjugovaným dienem (EDPM), většinou *5-ethylidien-2-norbornenem* nebo *cyklopentadienem*, případně *hexa-1,4-dienem*. Obsahují dvojné vazby jen na postranních substituentech, hlavní řetězec makromolekul je tedy také zcela nasycen. Lze je vulkanizovat sírou, používají se i pryskyřice a peroxidy, zejména je-li požadována vysoká tepelná odolnost a malá trvalá deformace. Ethylen-propylenové kaučuky se používají k opláštění kabelů, nebo střešní krytiny, kde se požaduje vysoká odolnost vůči stárnutí, v oblasti technické pryže se uplatňují pro vysoce teplovzdorné, a přitom zdravotně nezávadné výrobky, např. těsnění sterilizátorů v lékařství nebo potravinářském průmyslu. [1; 3; 6; 7]



Obrázek 1 Chemické vzorec vybraných kaučuků [6]

Speciální syntetické kaučuky

Kaučuky pro speciální aplikace se používají v případech, kde je požadována dlouhodobá odolnost vůči olejům nebo zvýšené teplotě, které u kaučuků pro všeobecné použití nelze docílit. *Olejuvzdorné kaučuky* se od kaučuků pro všeobecné použití liší především svou polaritou. Pro nepolární oleje se používá chloroprenový kaučuk (CR), pro polárnější prostředí butadien-akrylonitrilové kaučuky (NBR) nebo akrylátové kaučuky (ACM) či fluorouhlíkové kaučuky (FPM), které odolávají prakticky všem mazivům, tekutým palivům a zředěným kyselinám oxidační povahy, navíc vynikají odolností vůči dlouhodobému působení i za vysokých teplot. Největší odolnost vůči olejům vykazují pryže z polysulfidových kaučuků (OT), které však nejsou teplovzdorné. Silikonové kaučuky (Q), které mají v hlavním řetězci vazbu *-Si-O-*, jsou teplovzdorné a současně i mrazuvzdorné. Jejich speciální typy jsou použitelné k výrobě pryží používaných v teplotním rozmezí od $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž vlastnosti pryží se s teplotou mění jen velmi málo. Neodolávají však vlhkému prostředí, v němž za zvýšených teplot podléhají hydrolyze. [3; 4; 5; 7]

Tabulka 2 Zkratky a relativní spotřeba nejběžněji používaných kaučuků [7]

Zkratka	Název	Spotřeba [%]	Určení
NR	přírodní kaučuk	32	pro všeobecné použití
IR	izoprenový kaučuk	3	
SBR	styren butadienový kaučuk	37	
BR	butadienový kaučuk	10	
EPM	ethylen-propylenový kaučuk	7	
EPDM	butylkaučuk	3	
CR	chloroprenový kaučuk	3	olejuvzdorné
NBR	butadien-akrylonitrilový kaučuk	3	
ACR	akrylátový kaučuk	0,5	
OT	polysulfidový kaučuk	0,1	
MQ	silikonový kaučuk	0,1	teplovzdorné
FPM	fluorouhlíkový kaučuk	0,1	

1.2 Přísady

Přísady široce ovlivňují jak zpracovatelské, tak výsledné aplikační vlastnosti vulkanizátu. Obvykle je požadováno, aby výrobky byly při zachování požadované kvality co nejlevnější, což znamená stálou optimalizaci gumárenských směsí, použití vhodně zvolených přísad tak má i značný ekonomický význam. [2; 7]

1.2.1 Plniva

Primárně se přidávají k zajištění výztuže, sekundárně ke snížení výrobních nákladů. Vzhledem ke svému objemu ve výsledné směsi významně ovlivňují jak zpracovatelnost směsi, tak cenu a aplikační vlastnosti výsledné pryže. Podle účinku na vlastnosti gumárenské směsi je můžeme dělit na ztužující, poloztužující a neztužující. Rozsah ztužení závisí nejen na velikosti částic plniva, ale i na jeho struktuře a na aktivitě jeho povrchu. Obecně lze říci, že účinek plniva na fyzikální vlastnosti pryže souvisí především s tím, kolik polymerních řetězců je připojeno, a jak silně, k povrchu plniva. [1; 7]

Saze – jsou hlavním plnivem pro gumárenské směsi. Roční světová výrobní kapacita sazí je cca 7,5 mil. tun. Podstatou výroby je tepelný rozklad organických látek (nejčastěji odpadních olejů a dehtů z tepelného zpracování ropy a uhlí) až na uhlíkové radikály a jejich rekombinace na sazové částice. Podle způsobu výroby se dělí na kanálové, retortové, termické, lampové a vodivé. Jako vedlejší produkty vznikají vodík, voda a další nízkomolekulární látky. V závislosti na použitých surovinách a podmínkách výroby vznikají saze s různou velikostí částic a různou morfologií sazových agregátů. Výsledné složení je tvořeno 96-99 % uhlíku, 0,1-3,5 % kyslíku a 0,3-0,6 % vodíku, přičemž čím větší je obsah kyslíku, tím jsou saze kyselejší a zpomalují sirnou vulkanizaci. Saze zvyšují tuhost pryže, její pevnost, odolnost vůči oděru a bobtnání, naopak většinou zhoršují zpracovatelnost. Klasifikace sazí je podrobně popsána v normě ASTM D1765, která saze označuje písmenem N (saze příliš neovlivňující vulkanizaci) nebo S (saze vulkanizaci zpomalující) a trojmístným kódem (000-990), kde první číslice souvisí s velikostí částic sazí. [3; 7]

Minerální plniva – představují skupinu gumárenských plniv různého chemického složení s různým ztužujícím účinkem. Minerální plniva jsou převážně přírodní materiály, na rozdíl od sazí většinou světlé, které jsou pouze těženy a mlety na požadovanou velikost částic. Mletí může probíhat za sucha, nebo za mokra (pro získání jemnějších částic). Velikost ztužujícího účinku minerálních plniv závisí na tvaru částic i distribuci velikostí částic. Plniva s větším tvarovým faktorem, jako je např. kaolin nebo mastek, dávají větší ztužující účinek

než plniva s kulovými částicemi. Důvod použití minerálních plniv je zřejmý pro výrobky, u nichž je požadována barva jiná než černá, nebo propustnost světla. Vysoce aktivní silika v kombinaci s difunkčními organosilany umožňují dosáhnout vlastností, které jsou lepší než vlastnosti směsí plněných pouze sazemí. Takové systémy jsou i přes vyšší cenu zajímavé především pro výrobu pneumatik. [3; 7]

1.2.2 Aktivátory

Jsou to anorganické nebo organické chemikálie, které zvyšují účinnost síťování, tj. za stejných podmínek vulkanizace zvyšují koncentraci příčných vazeb mezi molekulami kaučuku ve vulkanizátu. Nejvíce používaný anorganický aktivátor vulkanizace je ZnO , méně se používají PbO a MgO . [1; 3; 6; 7]

1.2.3 Stabilizátory

Stabilizátory, někdy nazývány antidegradanty, se přidávají k inhibici napadení oxidací a ozonem. Při volbě stabilizátoru je nutno vzít v úvahu jak použitý typ kaučuku, tak i typ sítě a aplikační podmínky vulkanizátu. Používané antidegradanty se obvykle dělí podle jejich sklonu ke zbarvování, stejně jako podle odolnosti výsledných vulkanizátů vůči únavě a ozonu. Největší skupinu stabilizátorů tvoří fenylendiaminy a fenoly. [1; 3; 6; 7]

1.2.4 Vulkanizační činidla

Jsou to látky schopné v krátkém čase chemickými vazbami navzájem spojit (zesíťovat) kaučukové molekuly. Jejich použití se liší v závislosti na typu kaučuku. V běžných aplikacích je nejčastěji používána síra, která v gumárenských směsích reaguje s řetězci nenasycených kaučuků a vytváří mezi nimi příčné vazby, tzv. sírné můstky, různé délky. Nасыčené kaučuky lze vulkanizovat peroxidy. Vulkanizační systémy speciálních kaučuků se odlišují především nižší koncentrací dvojných vazeb, což vyžaduje použití vyššího poměru vulkanizačního činidla, nebo použití zcela jiných vulkanizačních činidel, např. oxidů kovů, reaktivních pryskyřic nebo diaminů. [1; 3; 6; 7]

1.2.5 Akcelerátory

Vulkanizace sírou je pomalá a výsledkem je vulkanizát s nevyhovujícím pevnostním chováním a nízkou odolností proti stárnutí. Akcelerátory značně zvyšují rychlost a účinnost síťování. Je běžné používání více akcelerátorů, které vykazují synergické efekty. Akcelerátory sírné vulkanizace jsou organické sloučeniny, které lze rozdělit do několika

chemických tříd. Další rozdělení je možné z hlediska použití (primární, sekundární) a rychlosti vulkanizace (pomalé, rychlé, velmi rychlé a ultrarychlé). Potřebný typ a koncentrace urychlovačů závisí na typu kaučuku použitého ve směsi. [1; 3; 6; 7]

1.2.6 Další přísady

Dávají vulkanizátu speciální vlastnosti. Kromě plniv hrají největší kvantitativní roli při výrobě kaučukových směsí změkčovadla. Jsou to kapaliny nebo nízkomolekulární pryskyřice. Rozpouštějí se v kaučuku a tím snižují mezimolekulární síly mezi řetězci, čímž snižují jeho viskozitu a usnadňují deformaci, proto musí být kompatibilní s kaučukem. Používají se např. minerální oleje, parafíny a cereziny, esterová a etherová změkčovadla nebo chlorované uhlovodíky. Dalšími často používanými přísadami jsou např. pigmenty (organické, anorganické), nadouvadla (obvykle dusík nebo kysličník uhličitý), antistatické přísady nebo přísady ke snížení koeficientu tření. [1; 3; 6; 7]

2 VÝROBNÍ PROCES VULKANIZÁTU

Cílem výrobního procesu je vyrobit gumárenskou směs, ve které jsou všechny složky dobře dispergovány, tak aby vykazovala požadované vlastnosti pro konečné aplikace. Nevulkanizované kaučuky, stejně jako z nich připravené gumárenské směsi, se v průběhu zpracování chovají jako viskoelastické kapaliny. Gumárenská směs během výrobního procesu dostane požadovaný tvar, vulkanizací pak přejde ve vysoce elastický vulkanizát neboli pryž. [1; 2]

2.1 Míchání

Zpracování kaučuků začíná tvorbou gumárenské směsi, tedy smícháním kaučuku a dalších přísad. Důležitost míchání spočívá především v promítnutí kvality gumárenských směsí do následných vlastností konečného produktu. Míchání proto musí zajistit stejnoměrné rozložení všech složek směsi v celém jejím objemu. Pro dosažení potřebné kvality je důležitý nejen hmotnostní poměr složek ale i postup dávkování a doba míchání. Vzhledem ke značnému rozdílu ve viskozitě jednotlivých složek směsi je třeba poměrně velkých smykových sil, nutné je také dodržení úzkého rozmezí teplot směsi. Z tohoto důvodu bývá postup často rozdělen do několika stupňů (fází), kdy z počátku není přidáván vulkanizační systém, kvůli předejití předčasné vulkanizace směsi vlivem vysokých teplot při míchání. Využívají se dvouválce, vnitřní nebo kontinuální hnětiče. [2; 6; 8]

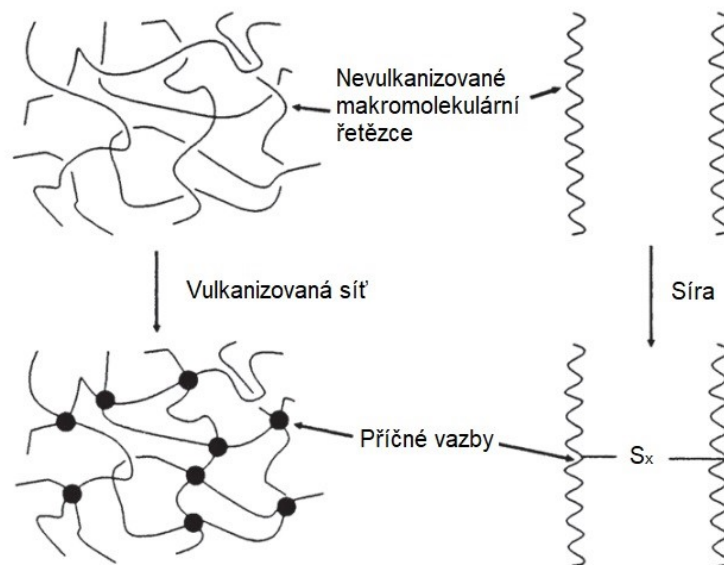
2.2 Tváření

Tvářením rozumíme zpracování gumárenské směsi v plastickém stavu, kterým získává požadovaný tvar. Dle druhu výsledného produktu a sériovosti výroby se volí konkrétní tvářecí technologie. Jedná se především o vytlačování, válcování (většinou na dvou až čtyřválcových kalandrech), lisování, přetlačování a vstřikování na šnekových nebo pístových vstřikovacích strojích. [2; 7; 8]

2.3 Vulkanizace

Vulkanizace je klíčovým procesem v celé gumárenské technologii, je energeticky a časově nejnáročnější a vzniká při ní výsledný produkt. Proces se obvykle provádí zahříváním gumárenské směsi, nejčastěji diskontinuálně, ve formě pod tlakem (ten zabraňuje vzniku nežádoucích pórů ve výrobku a vypařování vody), ale lze provádět i kontinuálně např. v solné lázni nebo horkém vzduchu, v návaznosti na technologii tváření. Během vulkanizace

se pružné makromolekulární řetězce spojují zesíťovacími reakcemi v trojrozměrnou síť. Gumárenská směs se přeměňuje z plastické, měkké a lepkavé látky s velmi nízkou pevností a tažností na pryž, která je pružným, vysoce elastickým materiálem značné pevnosti. Konkrétní vlastnosti pryže jsou určovány především koncentrací příčných vazeb a do značné míry i jejich povahou, avšak závisí i na vedlejších produktech vulkanizační reakce. [3; 9; 10]

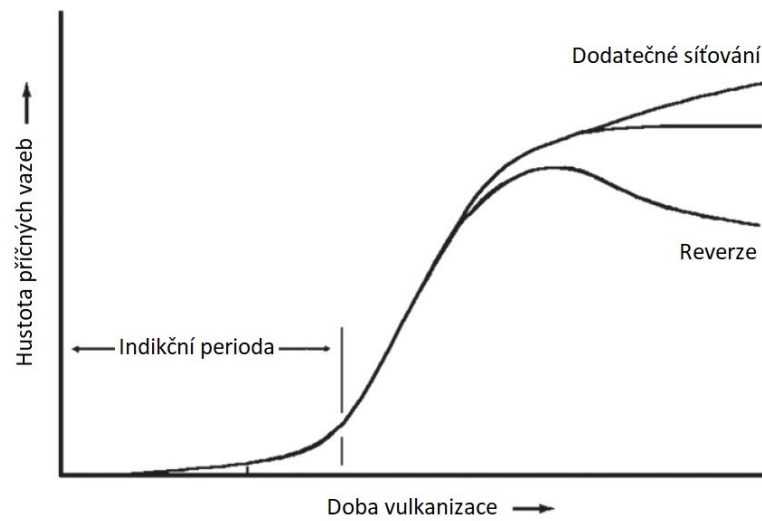


Obrázek 2 Tvorba sítě [9]

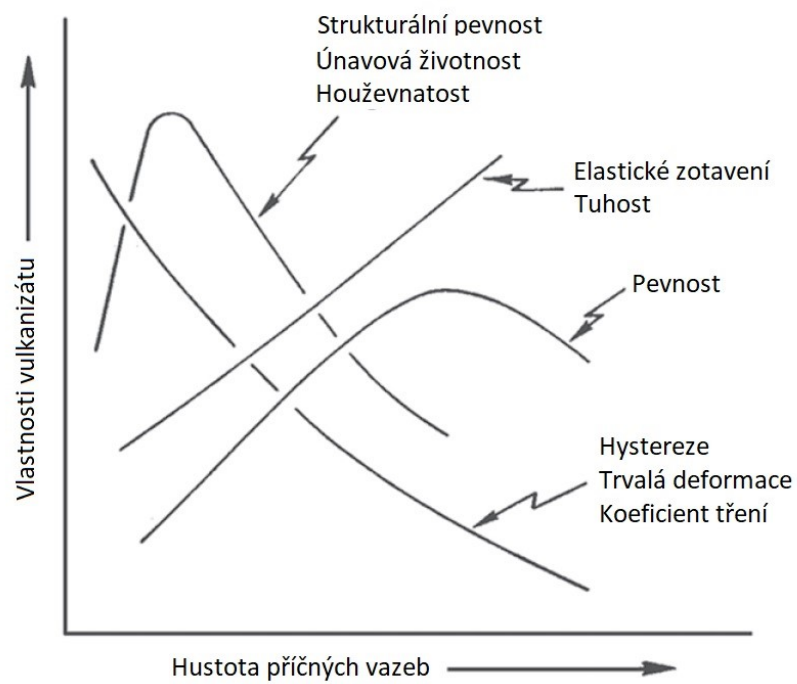
Rychlost vulkanizace se řídí stejnými zákonitostmi jako rychlost jiných chemických reakcí. Průběh vulkanizace lze rozdělit do tří fází:

- Indukční perioda vulkanizace – velmi pomalu probíhá reakce vulkanizačního činidla s kaučukem a ostatními složkami gumárenské směsi.
- Vlastní síťovací reakce – reakce vulkanizačního systému s kaučukem se zrychluje a začínají se vytvářet příčné vazby.
- Změny ve struktuře vytvořené sítě – projevují se reverzí, dodatečným síťováním, relaxací apod.

Grafickým znázorněním nárůstu tuhosti v průběhu vulkanizace vzniká tzv. vulkanizační křivka. Vulkanizační křivky bývají určovány experimentálně pomocí oscilačních reometrů. Princip spočívá v periodickém namáhání vzorku a zaznamenávání síly potřebné ke konstantní deformaci v průběhu vulkanizace. Za optimální dobu vulkanizace se obvykle považuje doba označovaná jako t_{90} , potřebná k dosažení 90 % všech zesíťovacích reakcí. [1; 3; 9]



Graf 1 Typické průběhy vulkanizačních křivek [9]

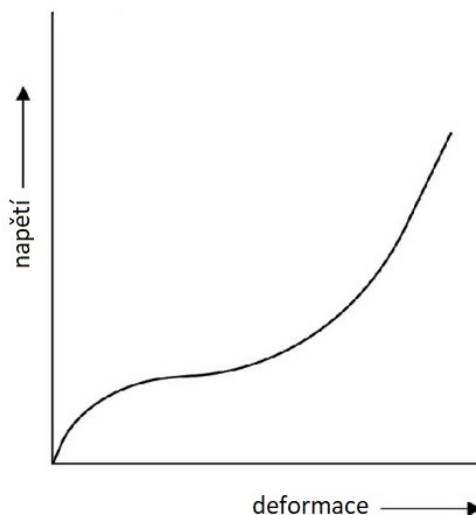


Graf 2 Vlastnosti vulkanizátu jako funkce rozsahu vulkanizace [9]

3 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PRYŽÍ

Použitelnost materiálů je založena na jejich fyzikálních vlastnostech, proto se podstata materiálové vědy zabývá fyzikálními vlastnostmi materiálů. Mezi mnoha fyzikálními vlastnostmi jsou nejvíce ceněny mechanické vlastnosti, jelikož je předpokladem, že všechny materiály musí být mechanicky stabilní za podmínek jejich použití. [11]

Všechny polymery jsou pod teplotou skelného přechodu (T_g) tuhé, křehké, sklovité materiály. Jakmile je teplota vyšší, než T_g měknou a stávají se poddajnými. Elastomerní polymerní látky, místo pouhých drobných odchylek od Hookova zákona vykazují chování, které je výrazně nelineární. Při zkoumání elasticity pryže lze nalézt dva přístupy *fenomenologický* a *statistický*. [12; 13]



Graf 3 Tahová křivka neplněné pryže [14]

3.1 Statistická teorie elasticity pryže

Statistická teorie využívá, na rozdíl od fenomenologických teorií reprezentovaných např. *Mooney-Rivlinovou* rovnicí, poznatků o mikrostruktuře kaučuku. Základní východiska pro pochopení mechanismu kaučukové elasticity vycházejí ze studia termoelastického chování pryží. Molekulovým modelem je ideální trojrozměrná síť složená z volně skloubených řetězců o koncentraci ν . [11; 15]

$$\nu = \frac{\rho}{M_c} \quad (3.1)$$

Kde: ν – koncentrace řetězců sítě [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$], ρ – hustota sítě [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], M_c – molekulová hmotnost mezi uzly sítě [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]

Řetězce leží v prostředí s nulovou viskozitou a deformace jsou afinní. Uzly sítě mají v klidu stabilní polohu, při deformaci se poloha uzlů mění také afinně. [15]

3.1.1 Termodynamické hledisko deformace kaučukových sítí

První věta termodynamiky říká, že přírůstek vnitřní energie systému je roven rozdílu tepla dodaného systému a práce vykonané systémem: [16]

$$dU = dQ + dW \quad (3.2)$$

Kde: U – celková vnitřní energie systému [J], Q – teplo [J], W – práce [J]

Druhá věta termodynamiky říká, že tepelná změna souvisí při vratných dějích se změnou entropie: [16]

$$dQ = TdS \quad (3.3)$$

Kde: Q – teplo [J], T – teplota [K], S – entropie [$J \cdot K^{-1}$]

Spojením obou vět získáváme vztah: [13; 15]

$$dW = dU - TdS \quad (3.4)$$

Kde: W – práce [J], U – celková vnitřní energie systému [J], T – teplota [K], S – entropie [$J \cdot K^{-1}$]

V případě pryží můžeme předpokládat, že objemové změny, způsobené vnějšími silami, jsou malé a objemová práce zanedbatelná. Celková práce dodaná do systému je potom: [13; 15]

$$dW = FdL \quad [V = konst.] \quad (3.5)$$

Kde: W – práce [J], F – síla [N], L – délka [m], V – objem [m^3]

Podle rovnice 3.4 se deformační práce dodaná do soustavy při vratném izotermickém ději (za konstantního objemu) obecně spotřebuje na změny vnitřní energie a změny entropie, přičemž mohou nastat dva mezní případy:

- *Vratná izotermická deformace je atermická* – probíhá bez jakéhokoli tepelného efektu. V tomto případě se veškerá vložená deformační energie spotřebuje na zvýšení vnitřní energie soustavy. Vnější síla se vynakládá proti silám působícím uvnitř částic hmoty a mezi částicemi, např. proti primárním a sekundárním vazbám.
- *Vratná izotermická deformace je exotermní* – veškerá vložená deformační energie se kvantitativně přemění na teplo, takže se vnitřní energie nezmění. Má-li pochod zůstat

izotermický, musí se vzniklé teplo odvést do okolí. Pokud proběhne deformace adiabaticky, těleso se vzniklým teplem zahřeje. Teplo vzniklé při izotermické vratné deformaci se při následující vratně provedené reakci opět spotřebuje, tedy celkový zisk tepla při vratném cyklickém ději je nulový. [12; 13; 15]

Ve druhém případě je deformační práce spotřebována na zvýšení uspořádanosti soustavy, tedy snížení entropie. Síly působící uvnitř částic hmoty a mezi nimi nejsou deformací ovlivněny, mění se však prostorová dispozice částic. Přestane-li vnější síla působit, snaží se částice hmoty vrátit do původního, méně uspořádaného, stavu s vyšší entropií, přičemž hnací silou je jejich tepelný pohyb. Tento jev se nazývá *entropická elasticita*. Z výše uvedeného vyplývá, že informace o mechanismu elastických deformací lze získat na základě kalorimetrických nebo termoelastických měření. Termodynamickou rovnováhu při izotermicko-izochorickém ději je možné určit pomocí *Helmholtzovy volné energie*. Pokud se deformační práce vložená do soustavy přemění na teplo (případ 2 viz výše), bude retrakční síla (modul pružnosti) s teplotou stoupat, při vyšší teplotě bude těleso klást deformaci větší odpor než při teplotě nižší. Pokud naopak retrakční síla se stoupající teplotou klesá, bude izotermická deformace provázena pohlcením tepla, dojde k adiabatické deformaci ochlazením. V tomto případě při deformaci vzrůstá vnitřní energie i entropie. Z rovnic 3.4 a 3.5 lze odvodit tzv. *termodynamickou stavovou rovnici pro kaučukovité materiály*, která sestává z energetického a entropického příspěvku: [12; 13; 15; 17]

$$F = \left(\frac{\partial U}{\partial L} \right)_{T,V} - T \left(\frac{\partial S}{\partial L} \right)_{T,V} \quad (3.6)$$

Kde: F – síla [N], U – celková vnitřní energie systému [J], L – délka [m], T – teplota [K], S – entropie [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$], V – objem [m^3]

3.2 Viskoelasticita

V materiálových vědách a mechanice kontinua je viskoelasticita vlastností materiálů, které při deformaci vykazují viskózní i elastické chování. Viskoelasticita materiálů souvisí se schopností materiálů tlumit mechanické vibrace. Ideálně elastický a ideálně viskózní materiál jsou dva mezní stavy a polymery se k jednomu či druhému extrému mohou podle vnějších podmínek více nebo méně přiblížit. Obecně je však jejich odezva na působení vnějších sil kombinací elastických a viskózních projevů. Takové chování se nazývá viskoelastické. Reálné systémy vykazují komplikované viskoelastické vlastnosti, jejichž studiu se podrobně věnují *reologické modely*. [12; 13; 17]

3.2.1 Brzděná konformační elasticita

Je-li reálný řetězec s nenulovou hmotností uložen v prostředí s nenulovou viskozitou je při změně konformace nutné vynakládat navíc sílu na přemáhání viskózních odporů, které vznikají při přesunech segmentů nenulovou rychlostí. Celkovou sílu potřebnou ke změně konformace lze vyjádřit jako: [15; 17]

$$F = k_1 r + k_2 \frac{dr}{dt} \quad (3.7)$$

Kde: F – celková síla potřebná ke změně konformace [N], k_1 – koeficient tuhosti [-], k_2 – koeficient viskózního odporu [-], r – vzdálenost konců řetězce [m], t – čas [s]

Je tedy zřejmé, že přeměna konformace hmotných řetězců je děj sice elastický (vratný), ale časově závislý, brzděný, s retardační dobou k_2/k_1 . [13; 15]

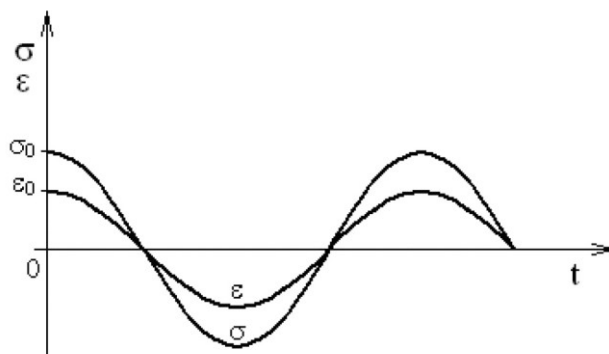
3.2.2 Ideálně elastický materiál

U ideálně elastického materiálu je veškerá energie akumulovaná v něm při jeho zatížení zpětně využita při jeho odlehčení. Nedochozí tedy k žádné disipaci vložené mechanické energie v teplo. Napětí a poměrná deformace jsou ve fázi a harmonicky se mění se stejnou kruhovou frekvencí ω . U ideálně elastického materiálu platí Hookův zákon. Chování ideálně elastického materiálu popisují rovnice: [14; 15]

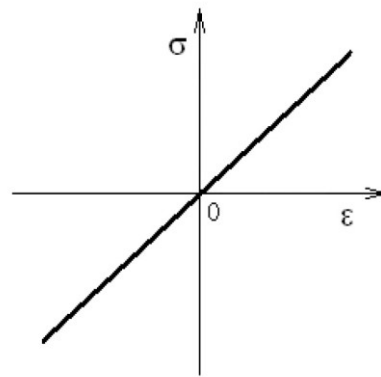
$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t) = \sigma_0 \cos(2\pi f t) \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t) = \varepsilon_0 \cos(2\pi f t) \quad (3.9)$$

Kde: σ – napětí [Pa], σ_0 – napětí na počátku děje [Pa], ε – poměrná deformace [-], ε_0 – poměrná deformace na počátku děje [-], ω – kruhová frekvence [Hz], t – čas [s], π – Ludolfovo číslo [-], f – frekvence [Hz]



Graf 4 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání ideálně elastického materiálu [14]



Graf 5 Závislost napětí a poměrné deformací při harmonickém namáhání ideálně elastického materiálu [14]

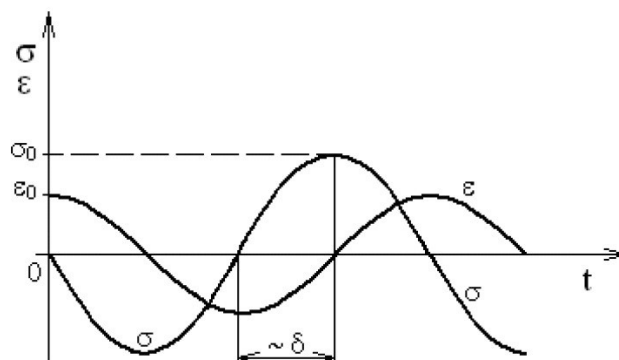
3.2.3 Ideálně viskózní materiál

Ideálně viskózní materiál se při harmonickém namáhání chová zcela opačně ve srovnání s ideálně elastickým materiálem. Veškerá energie vložená do něj se při jeho zatížení disipuje v teplo. Nedochozí tedy k žádnému zpětnému využití vložené mechanické energie při jeho odlehčení. Napětí a poměrná deformace nejsou ve fázi. Napětí předbíhá poměrnou deformaci, fázový posun mezi těmito dvěma veličinami je roven $\pi/2$. U ideálně viskózního materiálu neplatí Hookův zákon, závislost mezi napětím a poměrnou deformací je dána uzavřenou křivkou tvaru elipsy. Chování ideálně viskózního materiálu popisují rovnice: [14; 15]

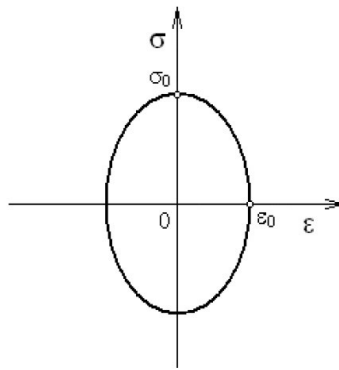
$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) = \sigma_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -\sigma_0 \sin(\omega t) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t) \quad (3.11)$$

Kde: σ – napětí [Pa], σ_0 – napětí na počátku děje [Pa], ε – poměrná deformace [-], ε_0 – poměrná deformace na počátku děje [-], ω – kruhová frekvence [Hz], t – čas [s], π – Ludolfovo číslo [-], δ – fázový posun [-]



Graf 6 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání ideálně viskózního materiálu [14]



Graf 7 Závislost napětí a poměrné deformací při harmonickém namáhání ideálně viskózního materiálu [14]

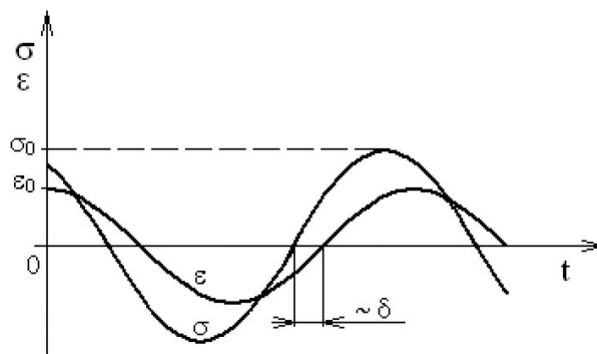
3.2.4 Viskoelastický materiál

U viskoelastického materiálu se část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání využije při odlehčení tohoto materiálu, zbytek se disipuje v tepelnou energii. Tento proces je nevratný. Množství přeměněné mechanické energie v tepelnou energii je úměrné ploše hysterezní křivky, která udává závislost mezi napětím a poměrnou deformací v průběhu jednoho cyklu při harmonickém namáhání. Napětí předbíhá poměrnou deformaci, fázový posun mezi těmito dvěma veličinami leží v intervalu $(0, \pi/2)$. Protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, neplatí Hookův zákon. Chování viskoelastického materiálu popisují rovnice: [14; 15; 18]

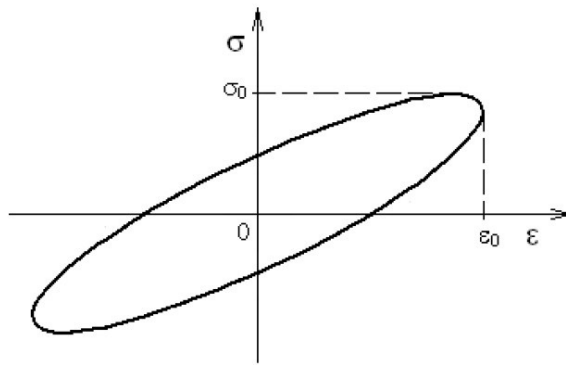
$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t) \quad (3.13)$$

Kde: σ – napětí [Pa], σ_0 – napětí na počátku děje [Pa], ε – poměrná deformace [-], ε_0 – poměrná deformace na počátku děje [-], ω – kruhová frekvence [Hz], t – čas [s], δ – fázový posun [-]



Graf 8 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání viskoelastického materiálu [14]



Graf 9 Závislost napětí a poměrné deformací při harmonickém namáhání viskoelastického materiálu [14]

3.2.5 Komplexní modul pružnosti

Rovnici 3.12 lze dále upravit a zjednodušit do tvaru kde E' je reálná složka komplexního (dynamického, resp. Youngova) modulu pružnosti v tahu a E'' je imaginární složka komplexního modulu pružnosti v tahu, tzv. ztrátový modul. Reálná složka charakterizuje pevnostní vlastnosti materiálu, imaginární složka tlumící vlastnosti materiálu: [11; 13]

$$\sigma = E' \varepsilon_0 \cos(\omega t) + E'' \varepsilon_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.14)$$

Kde: E' - reálná složka modulu pružnosti v tahu [Pa], E'' - imaginární složka modulu pružnosti v tahu [Pa], ε_0 - poměrná deformace na počátku děje [-], ω - kruhová frekvence [Hz], t - čas [s], π - Ludolfovo číslo [-]

Obě složky jsou funkcí frekvence kmitání při harmonickém namáhání a samostatně jsou vyjádřené rovnicemi: [11; 13]

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\delta \quad (3.15)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\delta \quad (3.16)$$

Kde: E' - reálná složka modulu pružnosti v tahu [Pa], E'' - imaginární složka modulu pružnosti v tahu [Pa], σ_0 - napětí na počátku děje [Pa], ε_0 - poměrná deformace na počátku děje [-], δ - fázový posun [-]

Komplexní modul pružnosti se poté skládá z reálné a imaginární složky a je dán vztahem: [11; 13]

$$E^* = E' + iE'' \quad (3.17)$$

Kde: E^* - komplexní modul pružnosti v tahu [Pa], E' - reálná složka modulu pružnosti v tahu [Pa], E'' - imaginární složka modulu pružnosti v tahu [Pa]

Analogicky lze získat komplexní vyjádření dalších dynamických veličin: komplexní dynamický modul ve smyku G^* , komplexní dynamická poddajnost ve smyku J^* , komplexní dynamická viskozita ve smyku η^* . [11; 13; 15]

3.2.6 Činitel vnitřního tlumení

Činitel vnitřního tlumení je bezrozměrná veličina daná poměrem imaginární složky k reálné složce komplexního modulu pružnosti. Slouží k popisu schopnosti materiálu tlumit mechanické vibrace: [14; 15]

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \operatorname{tg} \delta \quad (3.18)$$

Kde: η – činitel vnitřního tlumení [-], E' - reálná složka modulu pružnosti v tahu [Pa], E'' - imaginární složka modulu pružnosti v tahu [Pa], δ – fázový posun [-]

Velikost činitele vnitřního tlumení závisí na velikosti fázového posunu mezi napětím a poměrnou deformací. Při nižších hodnotách fázového posunu převažují elastické vlastnosti, při vyšších hodnotách pak tlumící vlastnosti. Při nižších frekvencích se tedy látka chová jako elastická a dynamicky měkká, při velmi vysokých frekvencích také jako elastická ale dynamicky tuhá. Přechod mezi oběma elastickými stavy látky se uskutečňuje v tzv. *přechodové frekvenční oblasti*. [11; 14; 15]

3.2.7 Energetické poměry při deformaci viskoelastických látek

V návaznosti na rozdělení modulu pružnosti v tahu na reálnou a imaginární složku můžeme rozdělit i deformační práci. Deformační práce $W(t)$ je vkládána reálnou složkou dynamického modulu G' a je periodickou funkcí času, deformační práce $W''(t)$ je pak vkládána imaginární, ztrátovou, složkou G'' , která je monotónně rostoucí funkcí času a nelze ji získat zpět, v tělese se disipuje v teplo. Průměrnou rychlost disipace vkládané deformační energie v objemové jednotce lze vypočítat jako: [15; 19]

$$H_d = \frac{1}{2} \omega G'' \gamma_0^2 \quad (3.19)$$

Kde: H_d – rychlost disipace energie při konstantní amplitudě deformace [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$],
 ω – kruhová frekvence [Hz], G'' – imaginární složka modulu pružnosti ve smyku [Pa],
 γ_0 – poměrné smykové posunutí na počátku děje [-]

Za dokonale adiabatických podmínek by teplota rostla bez omezení. V reálných podmínkách odchází část tepla do okolí a teplota tak může nabývat ustálené hodnoty. Z rovnice 3.19 je patrná úměrnost rychlosti disipace energie amplitudě deformace a ztrátovému modulu. [13; 14; 15]

3.2.8 Vliv strukturních faktorů

Další strukturní faktory mají nezanedbatelný vliv na deformační chování, a tedy i na disipaci deformační práce v teplo. Výrazně se například projevuje vliv plniv. Přidáním plniva vzniká dvoufázová struktura, kterou tvoří kontinuální fáze (polymerní síť) a dispergovaná fáze (částice plniva). Rozdíl modulů těchto fází může být až několik řádů. Tahová křivka se stává méně esovitě prohnutou, roste modul a pevnost a snižuje se tažnost. Pokles tažnosti je způsoben nulovou tažností plniva ve srovnání s polymerní sítí. Přítomnost plniv může modifikovat síťovací proces, neboť částice některých plniv absorbují síťovací činidlo, tím ochuzují hlavní část polymerní matrice o příčné vazby, zatímco v okolí povrchu částic vzniká více zesíťovaná vrstva.

Je-li polymerní síť vystavena zvýšené teplotě za přítomnosti kyslíku, mohou probíhat značnou rychlostí změny struktury sítě, především štěpení řetězců sítě, štěpení nebo naopak vznik dalších příčných vazeb. Analýzou tahových křivek je možné určit, který z uvedených mechanismů převládá.

Další významný vliv je způsoben chemorelaxací a trvalou deformací. Jedním z významných mechanismů chemorelaxace pryží vulkanizovaných sírou jsou přesuny teplotně málo stabilních příčných vazeb z míst zatížených na místa v síti nezatížená. Úbytek první sítě je roven přírůstku sítě druhé. Vlastnosti sítě jsou tedy určovány nejen hustotou příčných vazeb ale i způsobem rozložení příčných vazeb v systému, tzv. topologií sítě. [12; 15; 17; 19]

4 VLIV TEPLoty NA ÚNAVU PRYŽÍ

Ztráta vlastností pryží, v důsledku nahromaděného tepla a dalších molekulárních účinků dynamické deformace, je známa jako *únava*. Jde o důležitý způsob selhání pryžových výrobků, které jsou vystaveny cyklickému dynamickému namáhání, přičemž toto selhání je připisováno místnímu tepelnému rozkladu pryže při zvýšení vnitřní teploty. Podrobněji lze přičíst vývoji vnitřního napětí, dostatečně velkého na to, aby způsobilo praskliny nebo dutiny, což může vést k prasknutí, respektive z hlediska ohřevu k hromadění tepla. Obecně platí, že hromadění tepla je indukováno v místě hlavního namáhání výrobku, kde může být rozptýleno maximum energie. Pro lepší porozumění těchto jevů je nutné pochopit vliv energie, která se disipuje během každého cyklu únavového namáhání a způsobuje zvýšení teploty, na proces porušení pryže. Tedy oddělení reverzibilního ohřevu a ochlazování pryže v důsledku přeměny kinetické energie na vnitřní energii v souladu s entropickou elasticitou pryží. Dále je třeba identifikovat část využitelné akumulované energie, která přispívá k poruchovým procesům. Zejména u vysoce plněných pryžových směsí zatížených vysokou deformací při vysokých frekvencích dochází k vysokému nárůstu teploty až k hodnotám vedoucím k tepelné degradaci, což má za následek snížení mezní pevnosti nebo dokonce vznik poruch před uplynutím návrhové životnosti pryžových součástí. [6; 20; 21; 22; 23]

Existují dva přístupy k řešení únavy pryže. *Mechanika kontinua* se zaměřuje na celkovou životnost. Únavová životnost v mechanice kontinua je definována jako součet počtu cyklů nutných ke vzniku únavové trhliny do určité předem definované velikosti. *Lomová mechanika* se zaměřuje na odolnost vůči defektům. Tolerance defektů v lomové mechanice je založena na tom, že ve všech strojírenských produktech jsou vlastní chyby. Únavová životnost je definována jako počet cyklů nutných pro šíření převládající trhliny z počáteční trhliny do definovaného kritického rozměru. [21; 24]

Hlavní rozdíly mohou záviset na tom, jak jsou kvantitativně definovány iniciace trhlín a fáze šíření trhlín. Pro přístup lomové mechaniky bylo zjištěno, že nejvhodnější formulace je z hlediska rychlosti uvolňování deformační energie, přičemž existuje limitní trhací energie, pod kterou nedochází k šíření trhliny. [21]

Snížení vývinu tepla v pryžových produktech vede k jejich delší životnosti. Pryže, které vykazují nejmenší nárůst tepla a nejmenší změny vlastností jsou obvykle považovány za nejvhodnější pro použití v dynamických aplikacích. Ve strojírenství je běžnou praxí sledovat povrchovou teplotu součástí ve zrychlených zkouškách trvanlivosti. Byla však pozorována

řada neočekávaných, brzkých, poruch, způsobených generováním tepla během zrychlených testů trvanlivosti pryžových součástí. Toto vedlo k rozvoji metodiky predikce vývinu tepla. [6; 20; 21]

4.1 Stanovení meze únavy pryží

Vzhledem k tomu, že hysterezní vývin tepla je hlavním problémem životnosti pryže, řada autorů zkoumala procesy vývinu tepla v pryžích, stejně jako vliv vývinu tepla na životnost pryže a její termomechanické vlastnosti. V současnosti nejrozšířenější metody zkoumání únavové životnosti jsou založeny na vyhodnocování tzv. S-N křivek, vyjadřujících závislost střídavého napětí na počtu cyklů do vzniku porušení. To vyžaduje velmi dlouhé a nákladné únavové zkoušky, což vedlo ke hledání jiných metod zkoumání. Byla zkoušena řada metod jako např. radiografie nebo měření akustických emisí. V posledních letech několik autorů použilo numerický přístup (konečně-prvkové analýzy) k predikci hystereze tvorby tepla. Toto ale neřeší problém zcela, jelikož ke tvorbě numerických modelů je nezbytné získat kvalitní experimentální data popisující tepelné chování pryže. [25; 26; 27]

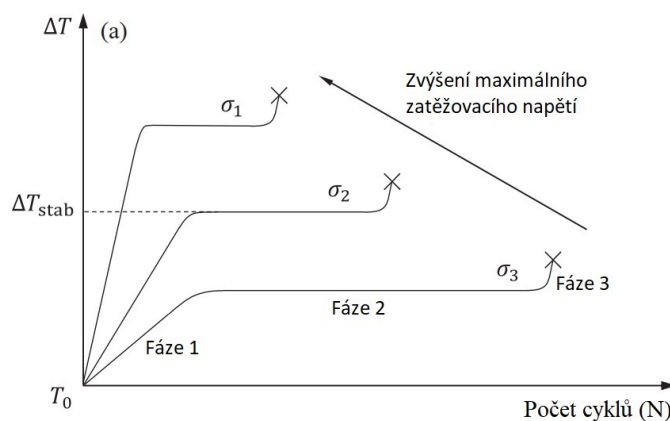
4.1.1 Termografická metoda pro rychlé stanovení meze únavy

Termografická metoda (někdy zvaná Risitano, po svém tvůrci) je založena na možnosti vyhodnotit dynamické chování materiálu a určit mez únavy na základě teploty vnějšího povrchu při aplikaci cyklického namáhání. Nejsou třeba žádné zvláštní testovací stroje a je umožněno získat spolehlivé výsledky s použitím omezeného počtu vzorků ve velmi krátkém čase. Metoda, mimo jiné, poskytuje i informace o energii zadržené vzorkem.

V případě zatížení nad mez únavy je nárůst teploty významný a lze jej detekovat různými experimentálními metodami. Aby bylo možno získat informace o změnách teploty během zkoušek, aniž by detekční systém ovlivnil měření a byl získán celkový pohled na testovaný vzorek, bylo již v roce 1983 navrženo použití termografických technik měření. Důkladné zkoumání dat, získaných měřeními ocelových vzorků, pomocí obrazové analýzy, poukazuje na důležité aspekty, které se ukazují být obecně platné i pro jiné materiály a jsou stále předmětem dalšího zkoumání: [27; 28]

- Oblast, ve které se teplota zvyšuje (kde vzorek následně selhává), je obecně zřejmá prakticky od začátku testu.

- Pokud jsou aplikovaná napětí pod mezí únavy materiálu, je nárůst teploty v nejteplejší části vnějšího povrchu extrémně omezený.
- Pokud jsou napětí nad mezí únavy, teplota se zvyšuje během první části (fáze 1) zkoušky, poté zůstává konstantní (fáze 2) až do krátké doby před selháním, následuje rychlé zvýšení teploty krátce před selháním (fáze 3). Toto chování je pozorováno v mnoha různých materiálech.
- Při zatížení nad mez únavy je rychlost nárůstu teploty s počtem cyklů ve fázi 1 tím vyšší čím větší je aplikované napětí.
- Téměř konstantní, tzv. stabilizační teplota fáze 2 je tím vyšší, čím větší je aplikované napětí.
- Doba trvání fáze 1 se velmi mění. Pro zatížení blízka mezi kluzu je fáze 2 omezená. Pro zatížení mírně nad mezí únavy se rozšiřuje tak, že pokrývá téměř celou životnost vzorku.
- Fáze 1 je omezena na velmi nízký počet cyklů ve srovnání s počtem následně potřebným pro dosažení porušení (řádově 10% celé životnosti vzorku pro zatížení, která se neblíží mezi kluzu).
- Při použití různých frekvencí zatížení pro různé vzorky se nárůst teploty přirozeně zvyšuje s frekvencí, ale průsečík přímky s osou napětí se nemění. [28]



Graf 10 Typický vývoj teplot v průběhu únavové zkoušky [27]

V současné době se testování růstu teploty cyklicky namáhaných pryží běžně provádí pomocí flexometrů Goodrich dle normy ASTM D623, které měří teplo vyvíjené v důsledku cyklického stlačování. Toto jednoosé zatížení však neodpovídá podmínkám některých reálných aplikací, např. u automobilových pneumatik, kde se vyskytuje víceosé namáhání kombinující tah, tlak a smyk. [20; 29]

5 ŠÍŘENÍ TEPLA

Šířením (někdy též sdílením) tepla se nazývá přenos energie z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s nižší teplotou. Základním předpokladem tedy je přítomnost teplotního rozdílu. Proces přenosu energie trvá do vyrovnání teplot obou systémů, tedy dosažení rovnovážného stavu. K tepelné výměně může docházet třemi základními způsoby a jejich kombinacemi. [30; 31]

5.1 Šíření tepla kondukcí

Šíření tepla kondukcí neboli vedením, se uskutečňuje především v pevných látkách, omezeně v tekutinách a plynech. Je způsobeno kmitáním částic s různou teplotou kolem svých rovnovážných poloh, které předávají svou kinetickou energii, prostřednictvím vzájemných srážek, sousedním částicím, nebo je způsoben pohybem volných elektronů. Podstatné je, že nedochází k výraznému přemísťování molekul látky. Rozdělení teplot v prostoru popisuje teplotní pole. Teplotní pole může být stacionární (ustálené – časově nezávislé) nebo nestacionární (neustálené – časově závislé). Matematicky lze zapsat jako:

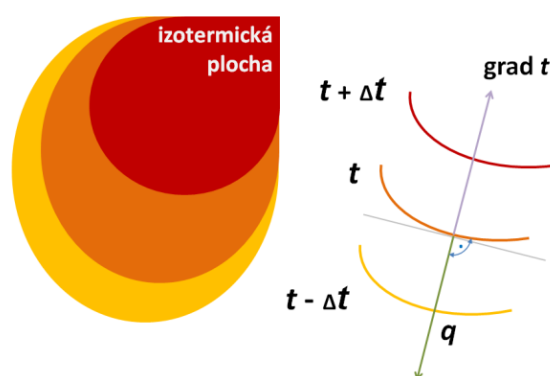
$$T = f(x, y, z, t) \quad (5.1)$$

Kde: T – teplotní pole [$^{\circ}\text{C}$], x, y, z – prostorové proměnné [m], t – čas [s]

Teplota se v materiálu mění ve všech směrech, její nárůst je dán gradientem teploty, což je vektor kolmý k izotermě (místům ve kterých je teplota stejná) a směřující na stranu nárůstu teploty: [30; 32]

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} = \nabla T \quad (5.2)$$

Kde: T – teplota [K], x, y, z – prostorové proměnné [m], ∇ – nabla operátor [-]



Obrázek 3 Teplotní pole a izotermy [30]

Stacionární vedení tepla v prostoru vyjadřuje *První Fourierův zákon*, udávající, že elementární množství tepla, procházející elementární plochou, za elementární časový úsek je úměrné zápornému gradientu teploty: [30; 32]

$$dQ = -\lambda \cdot \text{grad}T \cdot dS \cdot dt \quad (5.3)$$

Kde: Q – teplo [J], λ – součinitel teplotní vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], T – teplota [K], S – plocha [m²], t – čas [s]

Vydělením rovnice časovým inkrementem by byl získán vztah pro *tepelný tok* \dot{Q} . Nestacionární vedení tepla v prostoru vyjadřuje *Druhý Fourierův zákon*, který lze odvodit jako řešení úvodního vztahu 3.6: [30; 32]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (5.4)$$

Kde: T – teplota [K], t – čas [s], a – součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], ∇^2 – Laplaceův operátor [-]

5.2 Šíření tepla konvekcí

Šíření tepla konvekcí neboli prouděním, se uskutečňuje v pohybuujícím se (proudícím) prostředí. Ke konvekci může docházet nejen mezi tekutinou a tuhou látkou ale i mezi dvěma plynnými, dvěma kapalnými nebo kapalnou a plynnou látkou. Pohybem hmoty dochází ke vzájemnému pohybu jednotlivých částí, které mají rozdílnou vnitřní energii, tím dochází k přenosu tepla. Proudění můžeme podle způsobu iniciace rozdělit na přirozené a vynucené. Podíl přirozené konvekce se odvíjí od rychlosti proudění, je tím větší, čím menší je rychlost nuceného proudění a čím větší jsou teplotní gradienty v tekutině. Při vysoké rychlosti proudění je vliv přirozeného proudění zanedbatelný. Celkový přenos tepla typicky koreluje s *Newtonovým zákonem ochlazování*, kde jsou přenosové vlastnosti soustředěny do *součinitele přestupu tepla konvekcí*, který se stává funkcí vlastností média, průtoku a geometrie. Tepelný tok je potom vyjádřen jako: [30; 32]

$$d\dot{Q} = \alpha \cdot \Delta T \cdot dS \quad (5.5)$$

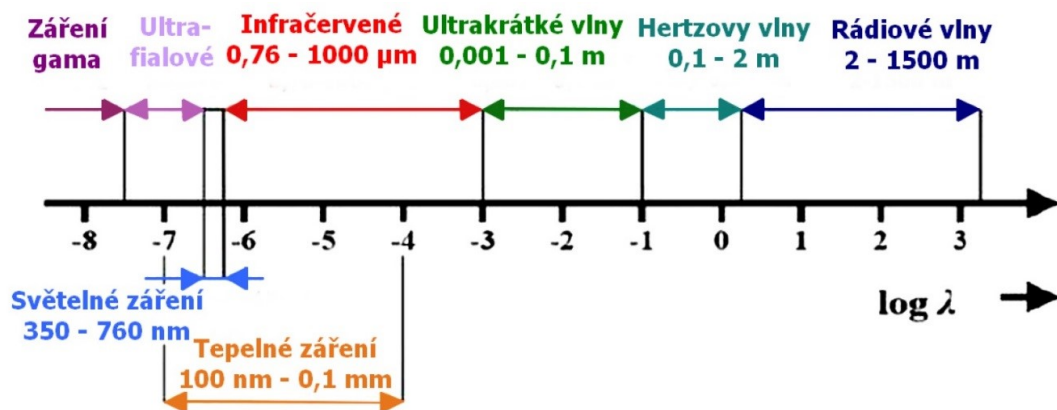
Kde: \dot{Q} – tepelný tok [W], α – součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], ΔT – teplotní rozdíl [K], S – plocha [m²]

Konvekce je v reálných případech často doprovázena kondukcí, hovoříme tak o konvekčně-kondukčním sdílení tepla, přičemž dochází ke vzniku mezních vrstev, nelze tak

uplatnit Fourierův zákon. Poměr konvekce a kondukce je různý, záleží na druhu proudění a fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny, čím intenzivnější je pohyb molekul, tím menší je podíl přenosu tepla kondukcí. [30; 33]

5.3 Šíření tepla radiací

Šíření tepla radiací neboli zářením, je definováno jako přenos energie přes hranici systému pomocí elektromagnetického mechanismu, způsobeného výhradně teplotním rozdílem. Tepelné záření je vyzařováno hmotou při teplotách vyšších než 0 K v důsledku změn v elektronické konfiguraci atomů nebo molekul v ní, k šíření nepotřebuje žádné médium, může tedy probíhat i ve vakuu. Rozhodující oblast elektromagnetického záření, ležící v rozsahu vlnových délek přibližně 10^{-4} až 10^{-7} m, je souhrnně nazývána jako tepelné záření, zahrnuje podoblasti ultrafialového, světelného a infračerveného záření. [31; 32]



Obrázek 4 Rozsah oblasti tepelného záření v elektromagnetickém poli [34]

Rozlišujeme dvě teorie chování světla – *vlnovou teorii* a *částicovou (korpuskulární) teorii*, můžeme tak hovořit o vlnově-částicové povaze světla. Při vlnové teorii se světlo řídí zákony vlnové optiky, světlo má charakter vlny a rychlost světla je vyjádřena jako součin frekvence a vlnové délky: [30]

$$c = f \cdot \lambda \quad (5.6)$$

Kde: c – rychlost světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], f – frekvence [Hz], λ – vlnová délka [m]

Podle částicové teorie nemůže mít záření libovolnou energii ale je vždy vyzařováno nebo pohlcováno v určitých dávkách – kvantech. *Energie záření* je úměrná frekvenci a Planckově konstantě: [30; 35]

$$Q_e = h \cdot f \quad (5.7)$$

Kde: Q_e – energie záření [J], h – Planckova konstanta [$\text{J}\cdot\text{s}$], f – frekvence [Hz]

Čím kratší vlnovou délku má elektromagnetická vlna, tím výraznější kvantové chování u ní pozorujeme. Vyzařovaná energie je tím větší, čím větší je frekvence, nebo čím menší je vlnová délka. Celkové množství takto vyzařené energie za jednotku času je nazýváno *zářivý tok*: [30; 35]

$$P = \frac{Q_e}{dt} \quad (5.8)$$

Kde: P – zářivý tok [W], Q_e – energie záření [J], t – čas [s]

Intenzitou vyzařování poté rozumíme plošnou hustotu zářivého toku podle: [30]

$$E = \frac{dP}{dS} \quad (5.9)$$

Kde: E – intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], P – zářivý tok [W], S – plocha [m^2]

Výše zmíněné veličiny jsou vždy vztaženy k celé oblasti spektra a jsou souhrnně označovány jako *integrální veličiny*. Veličiny vyjadřující rozdělení energie mezi jednotlivé vlnové délky nazýváme *spektrálními veličinami* a jsou derivacemi integrálních veličin. Příkladem může být *spektrální intenzita vyzařování*: [30]

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad (5.10)$$

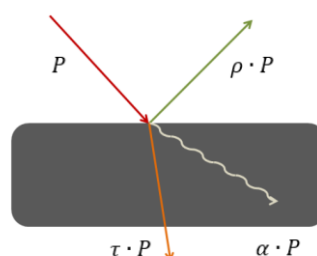
Kde: E_λ – spektrální intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$], E – intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], λ – vlnová délka [m]

Záření dopadající na povrch tělesa může být povrchem částečně pohlceno, odraženo nebo propuštěno. Ze zákona zachování energie plyne následující bilance: [30]

$$P = \alpha \cdot P + \rho \cdot P + \tau \cdot P \quad (5.11)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5.12)$$

Kde: P – zářivý tok [W], α – součinitel pohlcení [-], ρ – součinitel odrazu [-], τ – součinitel prostupu [-]



Obrázek 5 Radiační vlastnosti [30]

Pevné látky obecně záření nepropouštějí, platí $\tau=0$, $\alpha+\rho=0$. Pro popis vyzařování reálných těles byl zaveden idealizovaný model *absolutně černého tělesa*, pro které platí, že veškeré dopadající záření je pohlceno, tedy $\tau + \rho = 0$, $\alpha = 1$. Absolutně černé těleso reálně neexistuje, reálná tělesa považujeme za tzv. *šedá tělesa*, jejich chování je kombinací jednotlivých radiačních vlastností. Poměr jejich intenzity vyzařování k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa, při stejné teplotě vyjadřuje *emisivita*: [30]

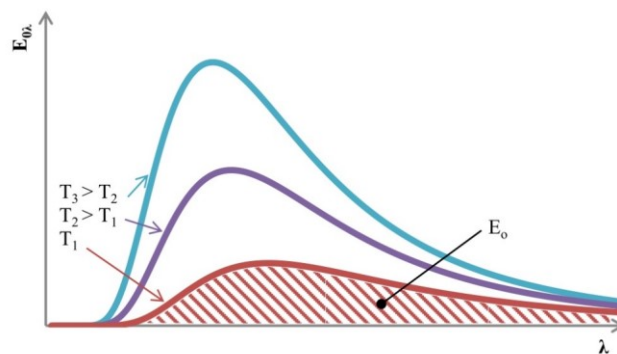
$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (5.13)$$

Kde: ε – emisivita [-], E – intenzita vyzařování [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], E_0 – intenzita vyzařování absolutně černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

Emisivita absolutně černého tělesa je rovna jedné, emisivita šedých těles leží v intervalu $(0;1)$. Hodnota emisivity závisí na povrchu materiálu, je funkcí teploty a může tak svou hodnotu měnit. Intenzitu záření absolutně černého tělesa popisuje *Stefan-Boltzmannův zákon*, říkájící, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa: [30; 31; 32]

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (5.14)$$

Kde: E – intenzita vyzařování absolutně černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$], T – teplota [K]



Graf 11 Grafické znázornění Stefan-Boltzmannova zákona [34]

Spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa je závislá na vlnové délce a teplotě podle *Planckova vyzařovacího zákona*: [30]

$$E_{0,\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (5.15)$$

Kde: $E_{0,\lambda}$ – spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$], π – Ludolfovo číslo [-], h – Planckova konstanta [$\text{J}\cdot\text{s}$], c – rychlost světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], λ – vlnová délka [m], k – Boltzmannova konstanta [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$], T – teplota [K]

Předpokladem Planckova vyzařovacího zákona je, že vyzařovaná energie není spojitá ale mění se po určitých kvantech podle:

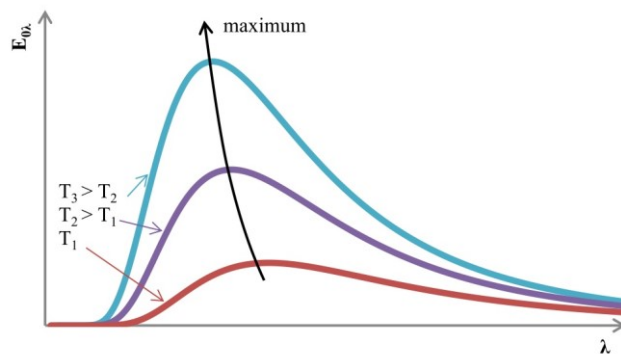
$$E = h \cdot f \quad (5.16)$$

Kde: E – energie [J], h – Planckova konstanta [$\text{J}\cdot\text{s}$], f – frekvence [Hz]

Z Planckova zákona poté lze odvodit *Wienův zákon posunu*, říkájící, že s rostoucí teplotou se maximum intenzity vyzařování ve spektru posouvá ke kratším vlnovým délkám. Můžeme tak identifikovat dominantní vlnovou délku záření jako:

$$\lambda_{max.} = \frac{b}{T} \quad (5.17)$$

Kde: $\lambda_{max.}$ – vlnová délka s maximální spektrální intenzitou vyzařování [m], b – Wienova konstanta [$\text{m}\cdot\text{K}$], T – teplota [K]



Graf 12 Grafické znázornění Planckova a Wienova zákona [34]

Vzájemný vztah mezi emisivitou a pohltivostí těles je pak popsán *Kirchhoffovým zákonem*. Při tepelné rovnováze je pohltivost tělesa rovna jeho emisivitě. Kirchhoffův zákon platí jak pro černá, tak šedá tělesa. Rovnost platí, i když šedé těleso není v tepelné rovnováze s okolím. Integrální pohltivost šedého tělesa je vždy rovna integrální emisivitě, při změně teploty se mohou měnit, avšak rovnost zůstává zachována: [30; 31; 32]

$$A = \varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma \cdot T^4} \quad (5.18)$$

Kde: A – pohltivost [-], ε – emisivita [-], E – intenzita vyzařování [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], E_0 – intenzita vyzařování černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$], T – teplota [K]

6 MĚŘENÍ TEPLOTY

K určování teploty se využívá závislosti vhodných fyzikálních veličin na teplotě, to umožňuje převést měření teploty na měření jiné fyzikální veličiny. Mezi teplotně závislé veličiny patří např. délkové rozměry a objem pevných a kapalných těles, tlak plynů, elektrický odpor vodičů nebo elektromagnetické napětí termoelektrických článků. Pro měření vysokých teplot se využívá detekce radiometrických vlastností elektromagnetických vln, které tělesa vyzařují. Stanovovat teplotu přímo podle definice termodynamické teploty je nepřesné. Neexistuje ani žádný vhodný fyzikální jev, kterého by bylo možno využít pro celý rozsah měřených teplot. Řešením je proto mezinárodní teplotní stupnice, založená na přesně definovaných a prakticky realizovatelných referenčních bodech teploty a na přesné metodice použité pro interpolaci mezi těmito referenčními body. Referenčními body mohou být teploty tuhnutí, teploty kondenzace nebo teploty trojných bodů vhodných látek. V současné době se používá mezinárodní teplotní stupnice ITS-90. [31; 36]

6.1 Kontaktní měření teploty

Kontaktní měření teploty probíhá pomocí kontaktních (dotykových) teploměrů, které jsou, jak vyplývá z názvu, v přímém kontaktu s měřeným prostředím (objektem). Podle fyzikálního principu funkce dělíme kontaktní teploměry na:

- Dilatační – využívají teplotní roztažnosti tuhých látek, kapalin a plynů.
- Parní – využívají teplotní závislosti tlaku syté páry teploměrové kapaliny.
- Odporové – využívají teplotní závislosti elektrického odporu vodičů a polovodičů.
- Polovodičové – využívají změn vlastností polovodičů s teplotou, velmi často je tato změna převáděna na změnu odporu čidla, proto jsou také často řazeny k odporovým.
- Termoelektrické – využívají teplotní závislosti termoelektrického napětí termoelektrického článku.
- Optovláknové – využívají změn vlastností optických vláken s teplotou.
- Speciální – využívají změn vybraných fyzikálních vlastností pevných látek a kapalin s teplotou (např. měknutí, tavení, index lomu apod.).

Základním předpokladem správného měření teploty kontaktními teploměry je správné umístění snímače teploty v měřeném prostředí. Pro dosažení co nejmenší chyby měření je nutno zajistit, aby tepelné ztráty ze snímače teploty do okolí byly co nejmenší, a aby byl

zajištěn co největší přestup tepla z měřeného prostředí do snímače teploty. Při měření teploty na povrchu dotyk snímače způsobuje změnu šíření tepla mezi tělesem a okolním prostředím a měřená teplota je pak zatížena chybou, což je nutno při tomto způsobu měření brát na zřetel. Měření teploty uvnitř tělesa je spojeno s nutností vytvořit do tělesa otvor (dutinu). Snímače umisťujeme vždy do místa, kde lze naměřit požadovanou teplotu. Pro měření teploty uvnitř těles je nejčastěji používáno odporových teploměrů. [36; 37]

6.2 Bezkontaktní měření teploty

Bezdotykové měření teploty je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem) záření, který se nachází v určité vzdálenosti od měřeného objektu. Fyzikální princip vychází ze zákonů uvedených v kapitole 5.3.

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- Zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt.
- Možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech.
- Měření teploty z bezpečné vzdálenosti.
- Možnost měření velmi rychlých změn teploty.
- Možnost měřit a dále číslicově zpracovat teploty celých povrchů těles (termografie).
- Možnost měřit velmi vysoké teploty.

Nevýhody bezdotykového měření teploty:

- Nejistota měření způsobená neznalostí emisivity povrchu tělesa.
- Nejistota měření způsobená propustností prostředí, ve kterém probíhá měření.
- Nejistota měření způsobená odraženým zářením z okolního prostředí. [36; 37]

6.2.1 Přístroje pro bezkontaktní měření teploty

Zařízení pro bezkontaktní měření teploty jsou označována jako pyrometry neboli infračervené teploměry. V praxi se můžeme setkat s řadou přístrojů používaných pro bezdotykové měření teploty, pracujících na různých principech a lze je rozdělit na: [37; 38]

- Měřicí pyrometry – měří teplotu v jednom místě povrchu těles.
 - Subjektivní pyrometry – detektorem záření je lidské oko, využití těchto přístrojů je již delší dobu na ústupu.
 - Objektivní pyrometry – k vyhodnocení tepelného záření je využito tepelných nebo kvantových detektorů, je možno je dále dělit na:
 - Úhrnné – snímají a vyhodnocují záření v celém spektru vlnových délek.
 - Monochromatické – pro měření je využito záření dané vlnové délky.
 - Pásmové – záření je měřeno ve vymezeném pásmu vlnových délek, velikost pásma je dána vlastnostmi použitého detektoru a optické soustavy pyrometru.
- Zobrazovací zařízení – zobrazují celá teplotní pole povrchu těles.
 - S rozkladem obrazu – tepelné záření prochází optickou soustavou zařízení, kde je opto-mechanickým rozkladem obraz rozložen na jednotlivé body, které jsou vyhodnoceny a zobrazeny, jedná se o překonanou metodu.
 - Fotometry – teplota je určována fotochemickou cestou, jedná se také o překonanou metodu.
 - S maticovým detektorem – využívají principů moderních detektorů teploty.

Detektory pro bezdotykové měření teploty zjišťují teplotu nepřímým způsobem – převádějí zářivou energii na energii elektrickou. Detektory lze rozdělit na:

- Fotochemické – pro detekci záření se využívají fotografické materiály, energie optického záření je spotřebována pro iniciaci chemické reakce, měrou absorbované energie je hustota vyvolaného fotografického snímku, využívají se ve fotometrii.
- Tepelné – energie dopadající na detektor je absorbována a následně vyhodnocena změna teploty, detektory lze dále dělit na:
 - Termoelektrické detektory – pro zjištění teploty je užíváno změny termoelektrického napětí, vznikajícího vlivem rozdílu teplot měřícího a srovnávacího vodiče v detektoru.
 - Bolometry – pro zjištění teploty objektu je využita změna elektrického odporu detektoru v důsledku změny jeho teploty.

- Pyroelektrické snímače – změna teploty je doprovázena změnou elektrostatické polarizace snímače, vyhodnocením změny lze zjistit teplotu měřeného objektu.
- Kvantové – pracují na principu fotoelektrického jevu. Záření dopadající na plochu detektoru se skládá z kvant energie, která po dopadu reagují s atomy uvnitř materiálu, dochází k přímé přeměně dopadajícího záření na elektrický náboj. Výhodou je malá časová konstanta, nevýhodou nutnost chlazení na nízké teploty. [37; 38]

6.2.2 Termografie

Pojem termografie zobecňuje metody pro pozorování teplotních polí na povrchu pozorovaných těles, které je reprezentováno energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa. Infračervená termografie je názvem techniky, která je obecně určitým transformačním systémem, pomocí kterého je možné zobrazit pro lidské oko neviditelné infračervené záření vyzařované z objektů, a to v závislosti na jejich tepelných stavech. Nástrojem nekontaktní infračervené termografie je technika zvaná termovize, nebo obecně infratechnika. Moderní sofistikované infračervené kamery umožňují teplotní pole nejen zobrazovat ale i kvantifikovat. Pro zobrazení teplotního pole je užíváno zobrazení v tzv. falešných barvách, kdy každá barva, popř. odstín představuje určitou teplotu, resp. množství tepelného toku, rozsahu měření. Radiace měřená termovizní kamerou nezávisí pouze na teplotě objektu, ale na řadě faktorů a vlivů, bez jejichž znalosti by nebyla povrchová teplota objektu změřena. Kompenzace těchto faktorů a vlivů je u moderních termovizních aparatur prováděna převážně automaticky. Do měřícího řetězce vstupují tři zářivé toky: [37; 38; 39; 40]

- Záření od měřeného objektu – jehož intenzita je úměrná emisivitě ε , které při průchodu atmosférou se součinitelem prostupu τ má výslednou hodnotu: [41]

$$P_{obj} = \varepsilon \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 \quad (6.1)$$

Kde: P_{obj} – zářivý tok od měřeného objektu [W], ε – emisivita [-], τ – součinitel prostupu [-], σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$], T_{obj} – termodynamická teplota měřeného objektu [K]

- Odrážející se záření od povrchu měřeného objektu – nazýváno také jako odražená zdanlivá teplota: [41]

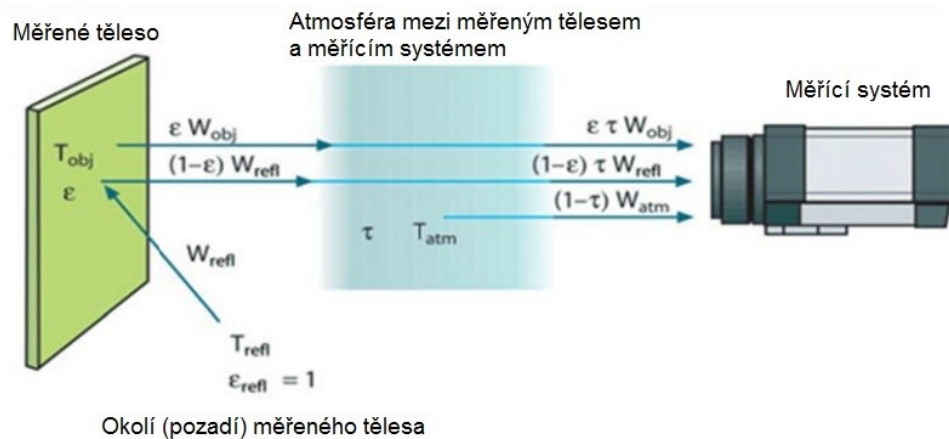
$$P_{odr} = (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{okolí}^4 \quad (6.2)$$

Kde: P_{odr} – zářivý tok odrážející se od měřeného objektu [W], ε – emisivita [-], τ – součinitel prostupu [-], σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$], T_{okol} – termodynamická teplota okolí objektu [K]

- Záření atmosféry – vyjádřeno jako: [41]

$$P_{atm} = (1 - \tau) \cdot T_{atm}^4 \quad (6.3)$$

Kde: P_{atm} – zářivý tok atmosféry [W], τ – součinitel prostupu [-], T_{atm} – termodynamická teplota atmosféry [K]



Obrázek 6 Měřicí řetězec (pozn. je užito jiného značení, smysl je však zřejmý) [41]

Existují dva základní přístupy pro měření a vyhodnocování teplotních polí:

- Pasivní termografie – měřené objekty jsou snímány za jejich přirozeného stavu, dnes nejrozšířenější způsob. K detekci teplotního pole stačí vyhodnocení jednoho snímku.
- Aktivní termografie – zkoumaný objekt je řízeně stimulován externím zdrojem tepla, to jakým způsobem se teplo šíří objektem se projevuje i na teplotě povrchu, díky tomu je možné zkoumat objekty i pod jejich povrchem. Vyhodnocována je tedy reakce a vývoj teplotního pole na tepelný stimul. [40; 39; 41]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Hlavním cílem praktické části bakalářské práce je popsat vliv různých typů elastomerů, resp. kaučuků na kinetiku vývoje tepla uvnitř a na povrchu cyklicky zatěžovaných pryží. Dále pak popsat rozdíly v kinetice růstu teploty při různých frekvencích namáhání a zdokumentovat teplotní gradienty na povrchu zkušebních těles. V poslední řadě pak provést komparaci výsledků a jejich uvedení do kontextu s mechanickými vlastnostmi jednotlivých pryží.

8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro výrobu zkušebních těles bylo připraveno pět gumárenských směsí, založených na různých typech kaučuků, nejpoužívanějších pro výrobu technických pryží. Zvoleny byly přírodní kaučuk (dále jen směs NR), butadienový kaučuk (dále jen směs BR), styren butadienový kaučuk (dále jen směs SBR), butadien-akrylonitrilový kaučuk (dále jen směs NBR) a ethylen-propylenový kaučuk (dále jen směs EPDM). Pro eliminaci různého vlivu přísad a postupu míchání se směsi lišily pouze použitým typem kaučuku, ostatní přísady byly zvoleny stejné a ve stejném obsahu, stejně tak postup míchání byl pro všechny připravené směsi stejný. Složení jednotlivých gumárenských směsí uvádí tabulka 3.

Tabulka 3 Složení gumárenských směsí

Složka	dsk				
	NR	100	-	-	-
BR	-	100	-	-	-
SBR	-	-	100	-	-
NBR	-	-	-	100	-
EPDM	-	-	-	-	100
Plnivo – saze N339	50	50	50	50	50
Aktivátor – ZnO	2	2	2	2	2
Emulgátor – stearin	1	1	1	1	1
Stabilizátor – 6PPD	1	1	1	1	1
Vulkanizační činidlo – síra	2	2	2	2	2
Akcelerátor – TBBS	1	1	1	1	1
Celkem	157	157	157	157	157

8.1 Míchání gumárenských směsí

Míchání gumárenských směsí proběhlo ve vnitřním hnětiči SYD-2 L (Everplast Machinery, Taiwan) dvoustupňovým postupem, přesný postup míchání uvádí tabulka 4. Takto připravené gumárenské směsi byly poté ručně zpracovány na dvouválcovém kalandru (Labtech Engineering, Finsko) do podoby plátů. Před dalším zpracováním byly ponechány 24 h při laboratorní teplotě.

Tabulka 4 Postup míchání gumárenských směsí

1. stupeň			Počáteční teplota: 80 °C
	Přidávaná složka	Doba míchání	Otáčky [ot./min.]
1.	Kaučuk	1 min.	35
2.	Saze 1/2	1 min.	35
3.	Saze 1/2 + ZnO + 6PPD + stearin	1 min.	35
4.	-	3 min. nebo to teploty 150 °C	45

2. stupeň			Počáteční teplota: 70 °C
	Přidávaná složka	Doba míchání	Otáčky [ot./min.]
1.	Směs z 1. stupně	1 min.	30
2.	Síra + TBBS	Do teploty 110 °C	30



Obrázek 7 Jednotlivé typy kaučuků připravené pro míchání gumárenských směsí



Obrázek 8 Vnitřní hnětič



Obrázek 9 Dvouválcový kalandr



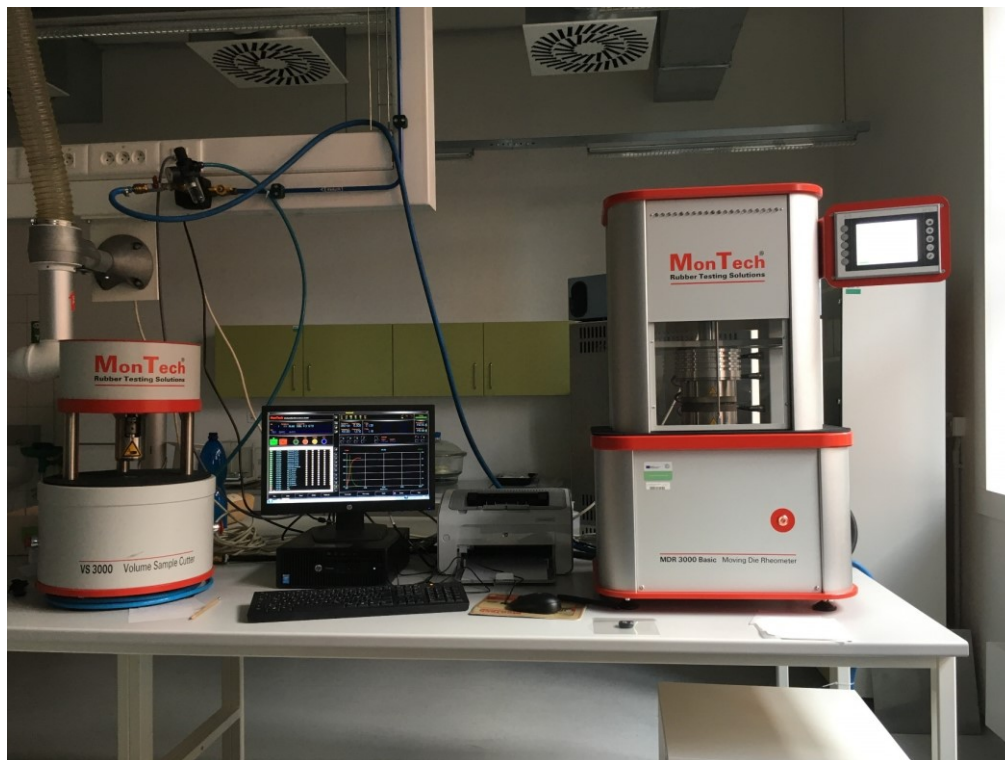
Obrázek 10 Připravené gumárenské směsi

8.2 Určení vulkanizačních charakteristik

Z každé gumárenské směsi byl odebrán a připraven vzorek daného objemu a tvaru na laboratorním vysekávacím lise VS 3000 (MonTech, Německo). Analýza vzorků proběhla na oscilačním reometru MDR 3000 Basic (MonTech GmbH, Německo), dle normy ASTM 6204. Byly určeny vulkanizační křivky, ze kterých byly odečteny hodnoty času t_{90} pro teplotu vulkanizace 150 °C. Jelikož čas t_{90} byl určen pro vzorek o tloušťce 1 mm, zatímco připravovaná zkušební tělesa měla různou tloušťku, v závislosti na typu provedené zkoušky, bylo nutné, k hodnotám času t_{90} připočíst 60 s pro každý milimetr tloušťky navíc. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Vulkanizační charakteristiky

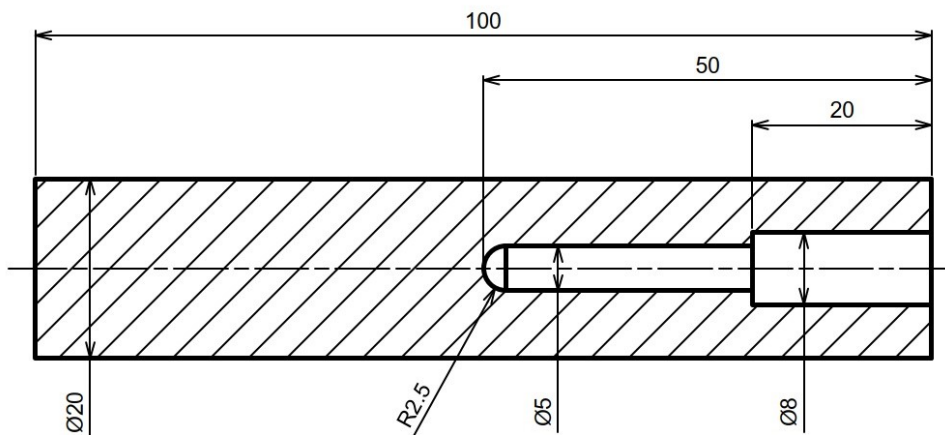
Směs	t_{90} [min.]	S'_{min} [d·Nm]	S'_{max} [d·Nm]	ts_2 [min.]
NR	5:09	2,87	21,41	1:43
BR	10:16	4,58	30,42	4:24
SBR	19:20	2,57	22,61	4:59
NBR	7:55	4,10	25,72	2:46
EPDM	20:28	3,16	16,41	7:37



Obrázek 11 Laboratorní vysekávací lis a oscilační reometr

8.3 Lisování a vulkanizace

Na ručním lise byly z připravených gumárenských směsí vysekány kvádry potřebných rozměrů a hmotnosti pro vložení do šestinásobné lisovací/vulkanizační formy. Při vkládání do formy byl do materiálu vtlačen trn pro vytvoření dutiny. Samotná vulkanizace probíhala v laboratorním lisu LabEcon (Fontijne Presses, Nizozemsko) za použití uzavírací síly 300kN a teplotě 150 °C po dobu získanou na základě změřených vulkanizačních charakteristik. Po vyjmutí z formy byly ručně odstraněny přetoky.



Obrázek 12 Rozměry vyráběných testovacích těles



Obrázek 13 Materiál připravený pro vložení do formy



Obrázek 14 Použitá forma s trny



Obrázek 15 Laboratorní lis



Obrázek 16 Hotový vulkanizát s neodstraněnými přetoky

9 POPIS PROVEDENÝCH ZKOUŠEK

Na připravených zkušebních tělesech byla provedena série základních mechanických zkoušek za účelem charakterizace vlivu typu kaučuku na výsledné vlastnosti pryže. Vliv typu kaučuku na hřetí pryže v průběhu cyklického zatěžování byl stanoven pomocí zařízení Heat Build-up Analyser a to při různých frekvencích zatěžování. Při zkouškách byla kontinuálně zaznamenávána vnitřní a povrchová teplota zkušebních těles.

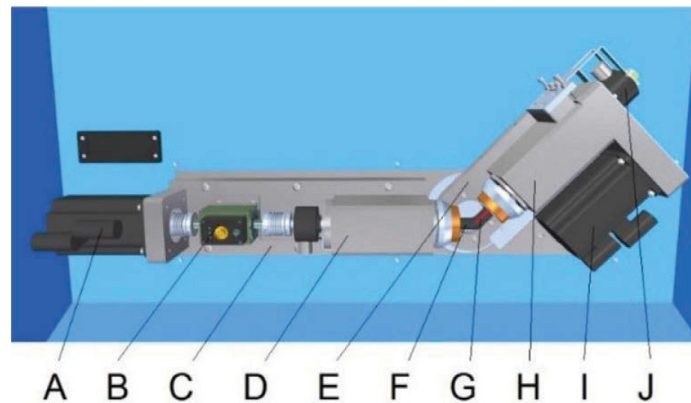
9.1 Základní mechanické zkoušky

Ze zbývajících množství připravených gumárenských směsí byly připraveny vzorky pro měření mechanických vlastností jednotlivých vulkanizátů. Vzhledem ke všeobecné známosti průběhu těchto zkoušek a doporučenému rozsahu práce podrobnosti o průběhu zkoušek neuvádím. Provedeny byly tahové zkoušky na zkušebním stroji M350-5CT (Testometric, Velká Británie) dle normy ISO 37 s použitím vzorků typu 2. Tvrdost vzorků byla měřena na tvrdoměru Shore A (Wallace, Velká Británie) dle normy ISO 868. Dále byly provedeny dynamické mechanické analýzy pomocí reometru RPA 2000 (Alpha Technologies, USA).

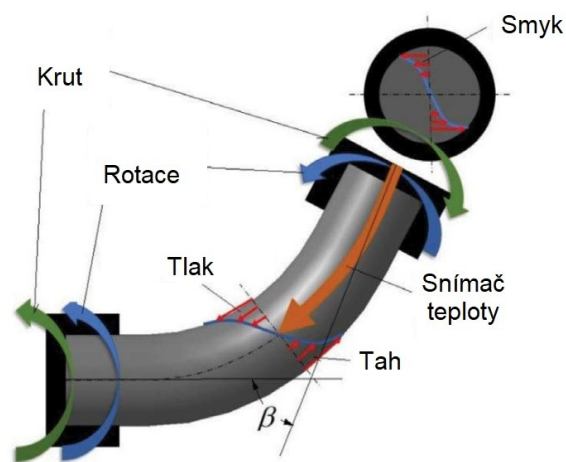
9.2 Popis zařízení Heat Build-up Analyser

Všechny cyklické mechanické zkoušky proběhly na zařízení Heat Build-up Analyser vyvinutého německou společností Coesfeld. Konstrukce zařízení umožňuje rychlé střídání namáhání testovaného vzorku na tah a tlak. Testovaný vzorek je upnut na obou koncích do vřeten (primárního a sekundárního) v protiběžné pozici o rozteči 70 mm. Testovaný vzorek je poté ohnut o úhel β pootočením sekundárního vřetene uloženého na otočném kloubu. V testovaném vzorku je tak vyvolán tah a tlak kolem neutrálního vlákna. Dále může být pootočením vzájemné polohy vřeten vyvolán v testovaném vzorku krut čímž dojde k jeho namáhání na stříh. Rotací vřeten je pak v testovaném vzorku vyvoláno cyklické kombinované namáhání, podobné např. odvalování automobilových pneumatik. K maximální deformaci, tedy i k maximálnímu napětí dochází na povrchu vzorku, lze proto předpokládat, že teplota se nejprve zvýší na povrchu, odkud se bude dále šířit.

Vnitřní teplota je měřena kontaktně pomocí pružného snímače teploty, zavedeného do dutiny v testovaném vzorku. Povrchová teplota může být měřena bezkontaktně, termografickými technikami. Zařízení umožňuje kontinuální získávání dat i při vysokých frekvencích namáhání.



Obrázek 17 Schéma zařízení HBU Analyser, A – hlavní motor, B – snímač kroutícího momentu, C – rám zařízení, D – hlavní vřeteno, E – otočný kloub, F – zkušební těleso, G – pružný snímač teploty, H – sekundární vřeteno, I – sekundární motor, J – datový provider tepelného senzoru [20]



Obrázek 18 Schéma principu měření [20]

Tabulka 6 Základní parametry zařízení HBU Analyser

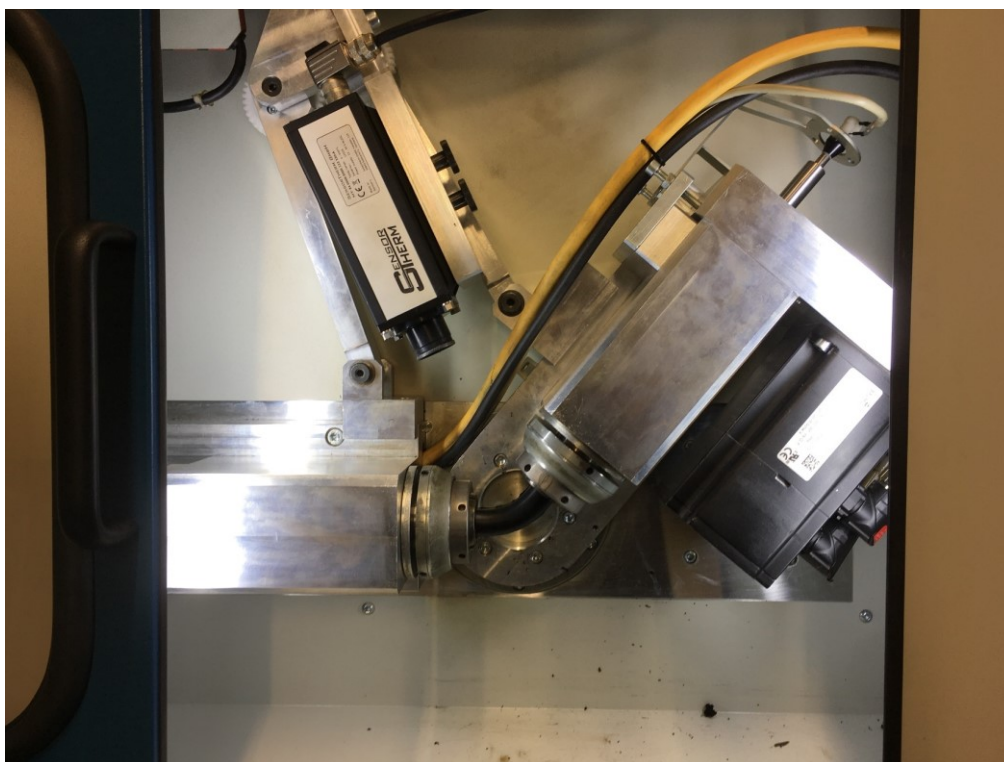
Max. otáčky vřeten, [ot./min.]	1 500
Max. měřená teplota, [°C]	300
Max. rychlost záznam teplotních dat, [Hz]	10
Max. úhel ohybu β , [°]	90
Max. snímaný kroutící moment, [N·m]	10
Max. regulace kroutícího momentu, [N·m]	10
Max. délka měření	neomezená

9.3 Průběh měření růstu teploty pyrometrem a kontaktním snímačem

Všechna měření proběhla za podmínek uvedených v tabulce 7, za laboratorní teploty 24 °C. Od každého druhu vulkanizátu byly měřeny vždy tři testovací vzorky za obou uvedených podmínek. Regulace kroučícího momentu byla nastavena na nulu, testované vzorky tedy byly namáhány pouze na tah a tlak. Teplota uvnitř vzorku (dále jen jako vnitřní teplota) byla měřena kontaktním odporovým snímačem teploty TR 021NA-64 (Sensit, Česká republika). Zároveň byla měřena i teplota na povrchu testovaných vzorků (dále jen jako vnější teplota) pomocí pyrometru MY 84 (Sensor Therm, Německo).

Tabulka 7 Podmínky měření pyrometrem a kontaktním snímačem

Frekvence namáhání, [Hz]	10	20
Otáčky vřetene, [ot./min.]	600	1 200
Rychlost záznam teplotních dat, [Hz]	10	10
Úhel ohybu β , [°]	50	50
Regulace kroučícího momentu, [N·m]	0	0
Počet měřených cyklů [-]	30 000	30 000
Délka měření [min.]	50	25



Obrázek 19 Vzorek připravený k měření v zařízení HBU Analyser

9.4 Průběh měření růstu teploty termokamerou

Cílem měření teplot pomocí termokamery bylo zmapování šíření tepla na celé ploše povrchu testovaných vzorků. Použita byla fotonová termokamera s chlazeným detektorem InfraTec ImageIR 9400 (InfraTec, Německo) pracující v mid pásmu. Před samotným měřením byla vhodně nastavena poloha termokamery vůči zkoušeným vzorkům a zastíněny zdroje možného odraženého záření. Na pozadí byl nanesen thermaspray s hodnotou emisivity 0,96. Všechna měření proběhla za podmínek uvedených v tabulce 8, za laboratorní teploty 24 °C.

Tabulka 8 Podmínky měření termokamerou

Frekvence namáhání, [Hz]	10
Otáčky vřetene, [ot./min.]	600
Úhel ohybu β , [°]	50
Regulace krouťícího momentu, [N·m]	0
Počet měřených cyklů [-]	15 000
Délka měření [min.]	25
Snímková frekvence termokamery, [Hz]	60
Formát detektoru, [IR pixel]	1280x1024
Teplotní rozsah, [°]	-40 až 300



Obrázek 20 Vzorek připravený k měření termokamerou

10 VÝSLEDKY ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Tahová zkouška byla provedena pro každou směs pětkrát, zejména hodnoty napětí při nižší deformaci jsou srovnatelné s podmínkami při měření na zařízení HBU Analyser. Hodnoty napětí pro 50 % a 100 % prodloužení u směsi NBR jsou výrazně vyšší, lze tedy konstatovat že tento materiál je výrazně tužší než ostatní pryže. Tvrdost byla měřena na šesti vzorcích. Výsledky jednotlivých zkoušek i průměrné hodnoty uvádí tabulky 9 a 10.

Tabulka 9 Výsledky tahových zkoušek

Směs		1	2	3	4	5	Přůměr	Sm.odch.	Var.koef.
NR	M50 [MPa]	1,01	1,01	1,07	0,98	1,02	1,02	0,03	3,21
	M100 [MPa]	1,60	1,64	1,74	1,57	1,70	1,65	0,07	4,24
	M300 [MPa]	10,00	10,36	10,80	9,89	11,08	10,43	0,51	4,89
	Napětí při přetržení	23,00	25,57	25,17	24,66	24,38	24,56	0,98	4,00
	Tažnost [%]	560,38	604,44	603,56	599,69	559,50	585,51	23,42	4,00
BR	M50 [MPa]	1,33	1,21	1,47	1,33	1,35	1,34	0,09	6,90
	M100 [MPa]	1,85	1,64	2,10	1,81	1,91	1,86	0,17	8,95
	M300 [MPa]	8,24	7,04	9,76	7,93	8,68	8,33	1,00	12,00
	Napětí při přetržení	18,24	17,34	20,35	16,42	18,87	18,24	1,50	8,21
	Tažnost [%]	560,76	585,72	551,94	515,31	551,12	552,97	25,28	4,57
SBR	M50 [MPa]	1,57	1,56	1,56	1,58	1,56	1,57	0,01	0,57
	M100 [MPa]	2,54	2,52	2,51	2,59	2,52	2,54	0,03	1,27
	M300 [MPa]	13,54	13,24	13,58	13,79	13,66	13,56	0,20	1,50
	Napětí při přetržení	27,16	26,83	27,75	27,62	26,75	27,22	0,45	1,66
	Tažnost [%]	553,25	560,94	565,25	557,38	535,69	554,50	11,41	2,06
NBR	M50 [MPa]	2,14	1,95	2,20	2,06	1,91	2,05	0,12	5,98
	M100 [MPa]	3,76	3,27	3,77	3,59	3,15	3,51	0,28	8,11
	M300 [MPa]	17,19	17,15	16,75	17,30	16,93	17,06	0,22	1,30
	Napětí při přetržení	24,88	25,67	23,82	24,96	26,19	25,10	0,90	3,57
	Tažnost [%]	424,00	424,56	408,44	422,17	442,13	424,26	11,98	2,82
EPDM	M50 [MPa]	1,22	1,14	1,21	1,23	1,19	1,20	0,04	2,97
	M100 [MPa]	1,73	1,60	1,68	1,73	1,68	1,68	0,05	3,16
	M300 [MPa]	6,31	5,71	5,95	6,26	6,12	6,07	0,25	4,04
	Napětí při přetržení	20,08	19,50	20,32	20,94	20,18	20,20	0,52	2,56
	Tažnost [%]	743,00	729,94	761,36	741,31	755,22	746,17	12,35	1,65

Tabulka 10 Výsledky měření tvrdosti

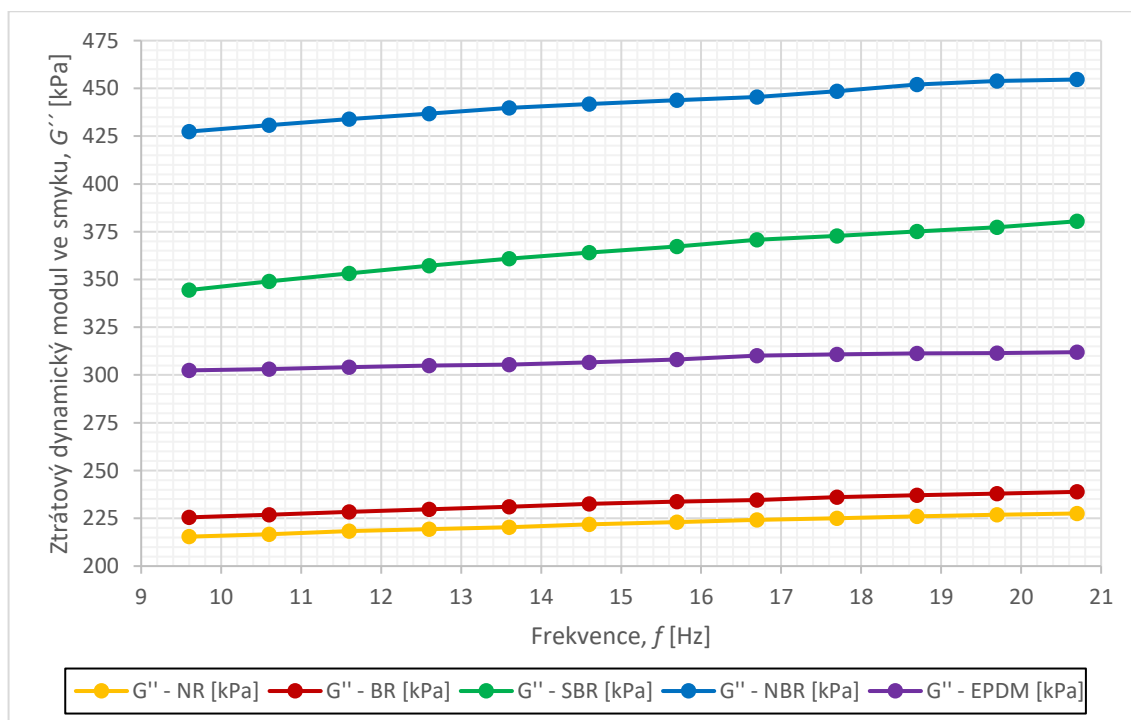
Směs	1	2	3	4	5	6	Přůměr	Sm. odch.	Var. koef.
NR	64,0	65,0	64,0	62,5	61,0	61,5	63,0	1,58	2,51
BR	67,0	67,0	67,0	65,0	65,0	65,0	66,0	1,10	1,66
SBR	62,0	62,0	62,0	64,0	64,0	64,0	63,0	1,10	1,74
NBR	64,5	64,5	65,5	64,0	64,0	64,5	64,5	0,55	0,85
EPDM	59,0	59,5	59,0	59,0	59,5	59,0	59,2	0,26	0,44

Dynamickými mechanickými analýzami byly získány hodnoty komplexních dynamických modulů ve smyku, komplexních dynamických poddajností ve smyku a komplexních dynamických viskozit ve smyku. Vzhledem ke značnému množství získaných dat jsou níže uvedeny pouze hodnoty komplexních dynamických modulů ve smyku, jejichž ztrátová složka má vzhledem ke svému charakteru prokazatelný vliv na hřetí pryží. Od každé směsi byly měřeny tři vzorky. Tabulka 11 i graf 13 uvádí průměrné hodnoty těchto měření.

Tabulka 11 Hodnoty komplexních dynamických modulů ve smyku

Směs	Frekvence [Hz]	G* [kPa]	G' [kPa]	G'' [kPa]	tan δ [-]
NR	9,6	1596,58	1581,64	215,41	0,141
	10,6	1602,00	1586,93	216,73	0,141
	11,6	1606,52	1591,28	218,27	0,142
	12,6	1611,20	1595,84	219,39	0,142
	13,6	1615,44	1599,98	220,38	0,142
	14,6	1619,15	1603,52	221,90	0,143
	15,7	1623,16	1607,40	223,00	0,144
	16,7	1626,23	1610,33	224,23	0,144
	17,7	1629,55	1613,57	225,04	0,144
	18,7	1632,26	1616,18	225,99	0,144
	19,7	1634,86	1618,69	226,80	0,145
20,7	1637,23	1620,98	227,54	0,145	
BR	9,6	1837,60	1823,24	225,50	0,128
	10,6	1844,01	1829,53	226,91	0,129
	11,6	1850,43	1835,82	228,42	0,129
	12,6	1855,70	1840,97	229,72	0,130
	13,6	1861,10	1846,24	231,05	0,130
	14,6	1865,80	1850,79	232,58	0,130
	15,7	1870,32	1855,20	233,77	0,131
	16,7	1875,47	1860,30	234,56	0,131
	17,7	1878,13	1862,78	236,08	0,131
	18,7	1881,43	1865,98	237,08	0,132
	19,7	1884,41	1868,88	237,93	0,132
20,7	1887,41	1871,78	238,85	0,132	
SBR	9,6	1804,88	1771,71	344,44	0,194
	10,6	1818,30	1784,50	348,97	0,195
	11,6	1831,19	1796,81	353,21	0,196
	12,6	1842,67	1807,73	357,14	0,198
	13,6	1853,58	1818,09	360,97	0,199
	14,6	1863,52	1827,62	364,06	0,199
	15,7	1873,17	1836,82	367,23	0,200
	16,7	1882,17	1845,30	370,71	0,201
	17,7	1889,61	1852,49	372,73	0,201
	18,7	1896,91	1859,46	375,06	0,202
	19,7	1904,27	1866,50	377,38	0,202
20,7	1913,41	1875,21	380,45	0,203	

NBR	9,6	2233,01	2191,73	427,40	0,195
	10,6	2248,05	2206,38	430,81	0,195
	11,6	2262,93	2220,92	433,99	0,195
	12,6	2276,10	2233,77	436,86	0,195
	13,6	2287,94	2245,27	439,80	0,196
	14,6	2299,55	2256,69	441,86	0,196
	15,7	2309,84	2266,78	443,88	0,196
	16,7	2319,54	2276,34	445,56	0,196
	17,7	2330,77	2287,21	448,48	0,196
	18,7	2344,38	2300,38	452,03	0,196
	19,7	2354,18	2310,00	453,90	0,197
	20,7	2360,11	2315,91	454,63	0,196
EPDM	9,6	1512,90	1482,35	302,42	0,204
	10,6	1520,34	1489,80	303,16	0,203
	11,6	1526,96	1496,37	304,09	0,203
	12,6	1533,29	1502,66	304,87	0,203
	13,6	1538,55	1507,93	305,39	0,203
	14,6	1544,39	1513,65	306,58	0,203
	15,7	1551,50	1520,59	308,09	0,202
	16,7	1560,19	1529,05	310,15	0,203
	17,7	1563,77	1532,58	310,75	0,202
	18,7	1566,23	1534,97	311,33	0,203
	19,7	1568,30	1537,05	311,48	0,202
	20,7	1570,49	1539,20	311,95	0,203



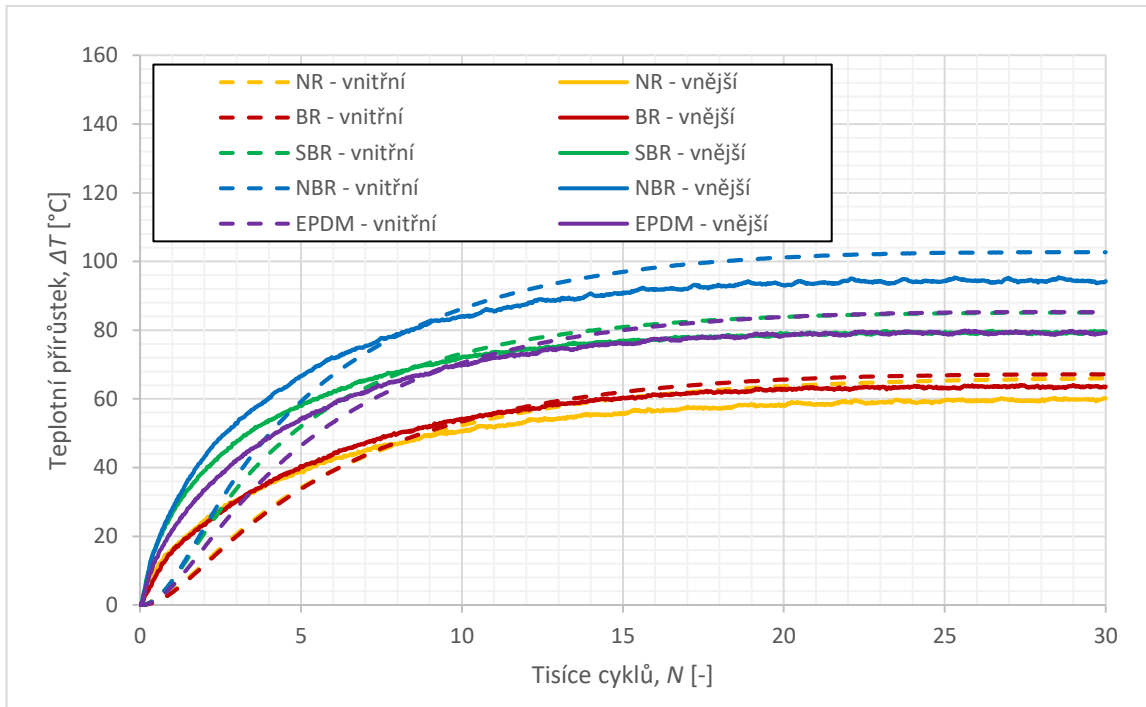
Graf 13 Graf vztahu hodnoty ztrátového dynamického modulu ve smyku a frekvence

11 VÝSLEDKY MĚŘENÍ RŮSTU TEPLoty PŘI CYKLICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ

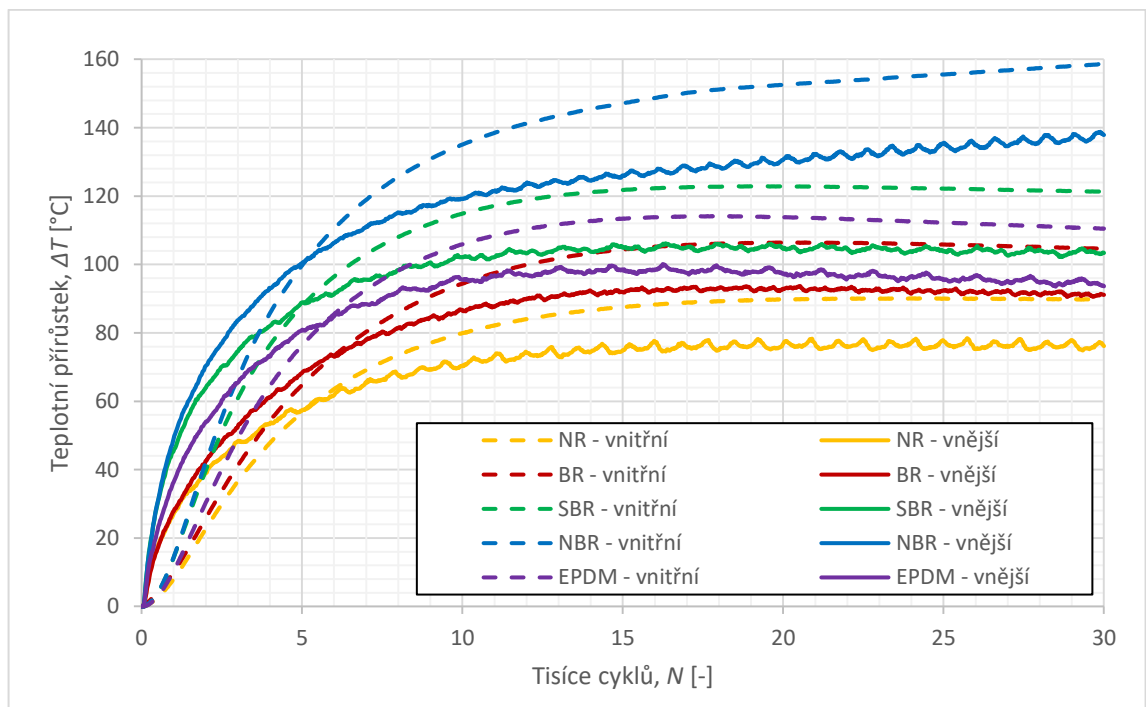
Jak je popsáno v podkapitole 4.1.1 průběh růstu teploty při cyklickém namáhání lze rozdělit do tří fází. Fáze 1, stěžejní pro odhad životnosti materiálu, se vyznačuje prudkým růstem teploty. Na počátku fáze 2 dochází ke zpomalení růstu teploty až do jejího vyrovnání. Fáze 3, vyznačující se opětovným prudkým nárůstem teploty před samotným mechanickým selháním nebyla během měření pozorována, jelikož měření neprobíhala až do selhání vzorků.

11.1 Výsledky měření pyrometrem a kontaktním snímačem

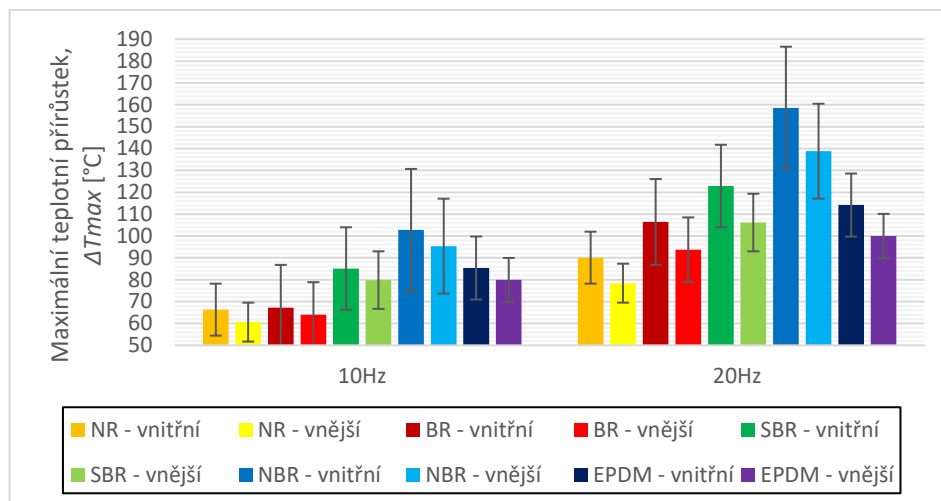
Od každého typu pryže byly měřeny vždy tři testovací vzorky, za podmínek uvedených v podkapitole 9.3. Od naměřených teplot byla odečtena počáteční teplota zkušebních vzorků, zpracovávaná data tedy byla v podobě teplotních přírůstků. Každé měření bylo níže uvedenou metodou vyhodnoceno zvlášť, prezentované výsledky jsou pak aritmetickým průměrem těchto tří měření. Získané teplotní křivky uvádějí grafy 14 a 15, grafickou komparaci maximálních dosažených teplotních přírůstků uvádí graf 16. Z teplotních křivek je jasně patrné, že v průběhu prvních několika set, v případě povrchové teploty, a několika tisíc, v případě vnitřní teploty, cyklů zatěžování dochází k nárůstu teploty vysokou rychlostí. Povrchová teplota vykazuje v počáteční fázi zatěžování výrazně vyšší nárůst oproti teplotě uvnitř vzorku, což je způsobeno výrazně vyšší deformační energií působící na povrchu vzorku. Teplota uvnitř vzorku z počátku roste pomaleji z důvodu zpoždění vedení tepla z povrchu do středu vzorku. Následně se rychlost nárůstu teploty zpomaluje, až je dosaženo teplotního maxima, po němž následuje teplotní plató. Teplotní plató nebylo pozorováno pouze u směsi NBR při frekvenci zatěžování 20 Hz, u které na konci měření stále docházelo k pomalému růstu teploty. Při delším měření lze očekávat že by se teplotní plató objevilo i v tomto případě. Přesto, že teplota uvnitř vzorku roste pomaleji, podstatně vyšší hodnoty maximální teploty je dosaženo právě uvnitř vzorku, což je způsobeno akumulací tepla, v důsledku nízké tepelné vodivosti pryže. Teplotní křivky vnější teploty vykazují, především při frekvenci cyklického zatěžování 20 Hz, množství drobných lokálních extrémů, pravděpodobná příčina tohoto jevu je popsána v podkapitole 11.2.



Graf 14 Průběhy růstu teploty při frekvenci zatěžování 10 Hz



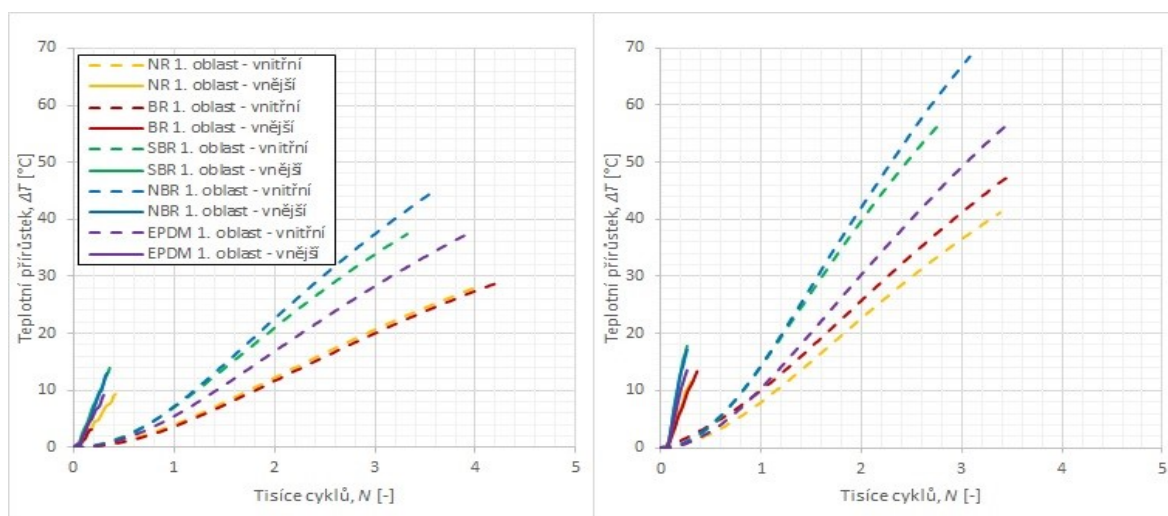
Graf 15 Průběhy růstu teploty při frekvenci zatěžování 20 Hz



Graf 16 Komparace maxim teplotních přírůstků při frekvenci zatěžování 10 Hz a 20 Hz

11.1.1 Určení 1. fáze průběhu růstu teploty

Byla provedena postupná lineární regrese teplotních přírůstků pomocí metody nejmenších čtverců. Nejprve byla provedena lineární regrese pouze prvních dvou hodnot, poté prvních tří, čtyř atd. Jak hodnoty teplotních přírůstků od začátku cyklického zatěžování postupně rostou, roste i hodnota směrnice regresní přímky, od určitého počtu hodnot teplotních přírůstků poté hodnota směrnice regresní přímky opět klesá, stejně jako klesá velikost teplotních přírůstků a nastává fáze vyrovnání teplot. Tímto způsobem byla identifikována délka 1. fáze prudkého růstu teploty, jako počet naměřených hodnot, resp. počet cyklů zatěžování, při kterém směrnice regresní přímky dosahuje nejvyšší hodnoty. Detaily fáze 1 teplotních křivek uvádějí grafy 17 a 18.



Grafy 17, 18 Fáze 1 růstu teploty při frekvenci zatěžování 10 Hz (vlevo) a 20 Hz (vpravo), legenda je pro oba grafy společná

11.1.2 Regrese získaných dat

Pro vzájemné porovnání kinetiky růstu teploty jednotlivých typů pryží byla provedena regrese získaných dat metodou nejmenších čtverců. Ve fázi 1 roste teplota téměř lineárně, proto ji vhodně popisuje regresní přímka s počátkem v nule. Fáze 2 růstu teploty poskytuje informace především o rychlosti dosažení teplotního maxima. Pro fázi 2 byla zvolena regresní funkce, jejíž kompletní proces hledání byl poprvé představen v publikaci [42] v níže uvedeném tvaru.

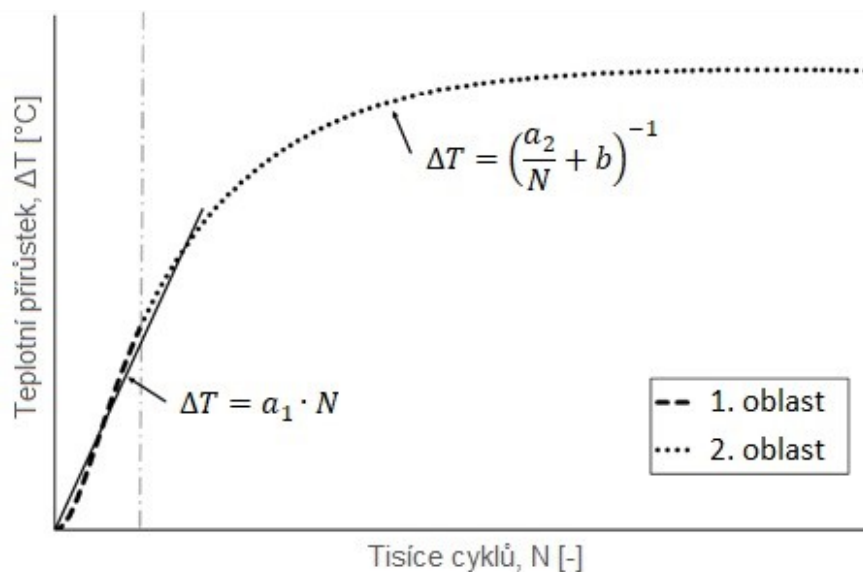
Regresní rovnice fáze 1 růstu teploty:

$$\Delta T = a_1 \cdot N \quad (11.1)$$

Regresní rovnice fáze 2 růstu teploty:

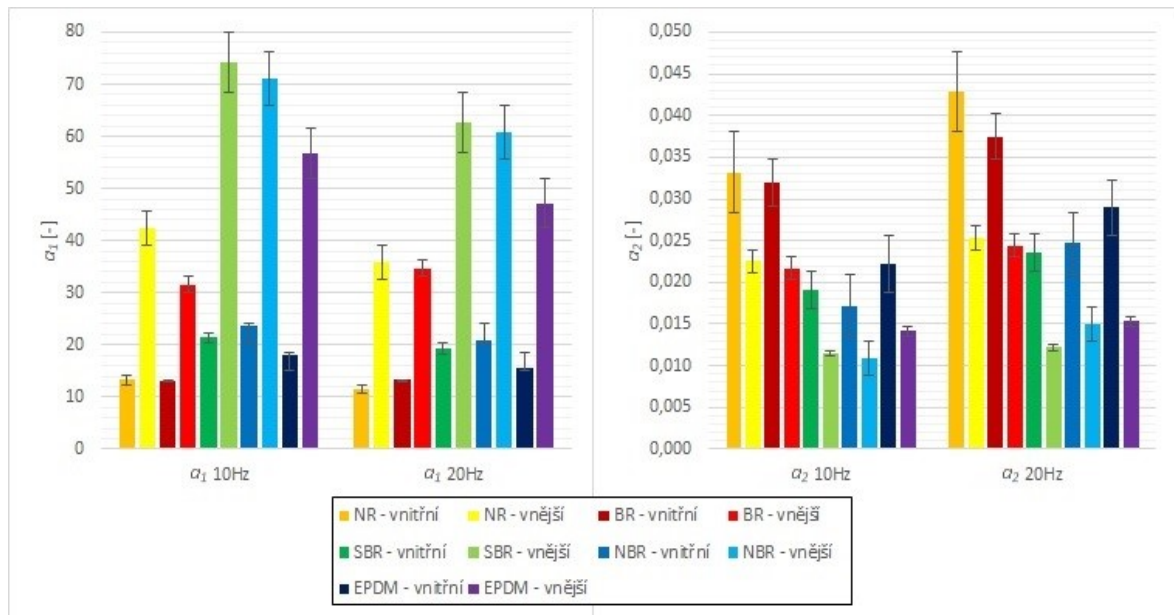
$$\Delta T = \left(\frac{a_2}{N} + b \right)^{-1} \quad (11.2)$$

Kde: ΔT – teplotní přírůstek [°C], N – tisíce cyklů [-], a_1 , a_2 , b – hledané koeficienty [-]



Graf 19 Znárodnění regrese výsledků měření

Získané hodnoty koeficientů a_1 , a_2 a b dobře korelují s rychlostmi růstu teplot a hodnotami dosažených teplotních maxim a počty cyklů k jejich dosažení potřebnými. Grafickou komparaci hodnot koeficientů a_1 a a_2 uvádějí grafy 20 a 21. Přesné hodnoty všech získaných koeficientů a_1 uvádí tabulka 12, přesné hodnoty všech získaných koeficientů a_2 a b uvádí tabulka 13.


 Grafy 20, 21 Grafická komparace koeficientů a_1 a a_2 , legenda je pro oba grafy společná

 Tabulka 12 Přehled koeficientů a_1

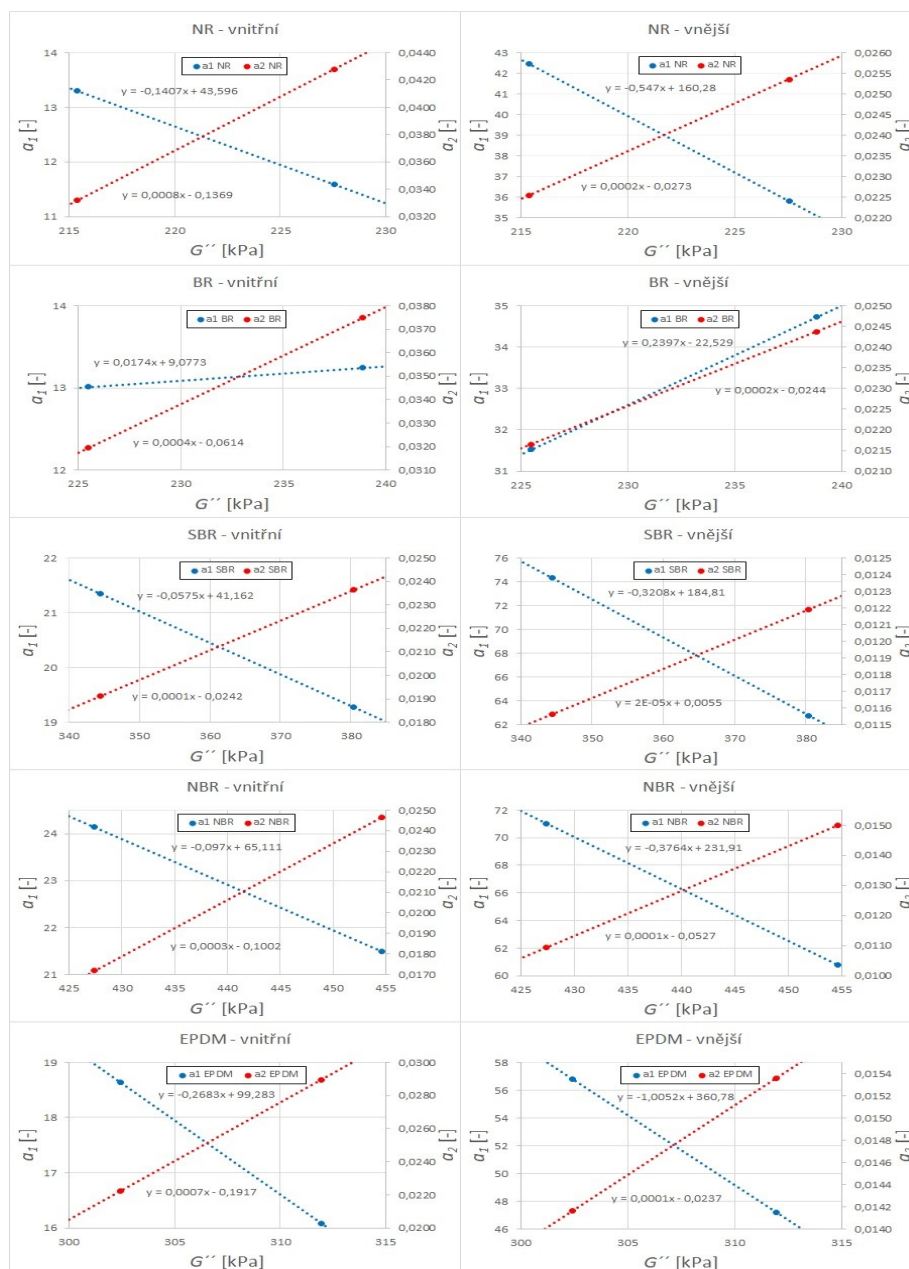
Frekv.	Poloha	Směs	Koef.	1	2	3	Průměr	Sm. odch.	Var. koef.
10 Hz	vnitřní	NR	a_1	13,131	13,349	13,417	13,299	0,149	1,12
		BR	a_1	13,403	13,305	12,327	13,012	0,595	4,57
		SBR	a_1	21,899	20,742	21,404	21,348	0,581	2,72
		NBR	a_1	23,703	23,864	23,359	23,642	0,258	1,09
		EPDM	a_1	18,059	18,349	18,004	18,137	0,185	1,02
	vnější	NR	a_1	36,868	45,807	44,723	42,466	4,878	11,49
		BR	a_1	29,722	34,863	29,997	31,527	2,892	9,17
		SBR	a_1	74,597	72,191	76,111	74,300	1,977	2,66
		NBR	a_1	69,315	73,468	70,295	71,026	2,171	3,06
		EPDM	a_1	60,674	55,008	54,659	56,780	3,377	5,95
20 Hz	vnitřní	NR	a_1	11,918	11,364	11,490	11,591	0,290	2,51
		BR	a_1	15,203	12,514	12,019	13,245	1,713	12,94
		SBR	a_1	20,566	18,929	18,338	19,278	1,154	5,99
		NBR	a_1	21,997	20,515	20,488	21,000	0,864	4,11
		EPDM	a_1	15,578	15,397	15,761	15,579	0,182	1,17
	vnější	NR	a_1	35,846	36,291	35,335	35,824	0,478	1,34
		BR	a_1	37,816	32,963	33,404	34,728	2,684	7,73
		SBR	a_1	68,922	59,922	59,402	62,749	5,353	8,53
		NBR	a_1	60,354	62,167	59,806	60,776	1,236	2,03
		EPDM	a_1	46,461	46,236	48,896	47,198	1,475	3,13

Tabulka 13 Přehled koeficientů a_2 a b

Frekv.	Poloha	Směs	Koef.	1	2	3	Průměr	Sm. odch.	Var. koef.
10 Hz	vnitřní	NR	a_2	0,034237	0,032978	0,032404	0,033206	0,000938	2,82
			b	0,013618	0,013212	0,013064	0,013298	0,000287	2,16
		BR	a_2	0,030088	0,030183	0,035576	0,031949	0,003142	9,83
			b	0,013188	0,013036	0,013488	0,013237	0,000230	1,74
		SBR	a_2	0,018485	0,019734	0,019136	0,019119	0,000625	3,27
			b	0,010532	0,010825	0,010677	0,010678	0,000146	1,37
		NBR	a_2	0,017076	0,017101	0,017382	0,017186	0,000170	0,99
			b	0,008751	0,008822	0,008871	0,008815	0,000060	0,69
	EPDM	a_2	0,022692	0,021766	0,022181	0,022213	0,000464	2,09	
		b	0,010665	0,010567	0,010478	0,010570	0,000093	0,88	
	vnější	NR	a_2	0,024953	0,021533	0,021140	0,022542	0,002097	9,30
			b	0,016355	0,015128	0,014972	0,015485	0,000757	4,89
		BR	a_2	0,021181	0,020237	0,023526	0,021648	0,001693	7,82
			b	0,014796	0,014392	0,014751	0,014646	0,000221	1,51
		SBR	a_2	0,011190	0,011958	0,011538	0,011562	0,000385	3,33
			b	0,011854	0,012175	0,011939	0,011989	0,000166	1,39
NBR		a_2	0,010822	0,010996	0,011036	0,010951	0,000114	1,04	
		b	0,009987	0,010030	0,010097	0,010038	0,000055	0,55	
EPDM	a_2	0,014897	0,013603	0,013992	0,014164	0,000664	4,69		
	b	0,012253	0,011755	0,011787	0,011932	0,000279	2,34		
20 Hz	vnitřní	NR	a_2	0,041436	0,043848	0,043101	0,042795	0,001235	2,89
			b	0,008987	0,009140	0,008999	0,009042	0,000085	0,94
		BR	a_2	0,030718	0,037343	0,044363	0,037475	0,006824	18,21
			b	0,008230	0,007682	0,006905	0,007606	0,000666	8,75
		SBR	a_2	0,022405	0,023853	0,024675	0,023644	0,001149	4,86
			b	0,006793	0,006998	0,007028	0,006939	0,000128	1,84
		NBR	a_2	0,022785	0,024321	0,026889	0,024665	0,002073	8,41
			b	0,005344	0,005544	0,005009	0,005299	0,000270	5,10
	EPDM	a_2	0,029208	0,029372	0,028287	0,028956	0,000585	2,02	
		b	0,007268	0,007337	0,007454	0,007353	0,000094	1,28	
	vnější	NR	a_2	0,024183	0,026323	0,025558	0,025355	0,001084	4,28
			b	0,011843	0,012010	0,011733	0,011862	0,000140	1,18
		BR	a_2	0,021408	0,022857	0,028851	0,024372	0,003946	16,19
			b	0,010270	0,009709	0,008831	0,009604	0,000725	7,55
		SBR	a_2	0,011848	0,012147	0,012579	0,012191	0,000368	3,02
			b	0,008868	0,008937	0,008954	0,008919	0,000046	0,51
NBR		a_2	0,013826	0,014038	0,017163	0,015009	0,001868	12,45	
		b	0,007078	0,007107	0,006464	0,006883	0,000363	5,28	
EPDM	a_2	0,015340	0,015751	0,014986	0,015359	0,000383	2,49		
	b	0,009287	0,009434	0,009673	0,009465	0,000194	2,05		

11.1.3 Vztah růstu teploty a ztrátového dynamického modulu ve smyku

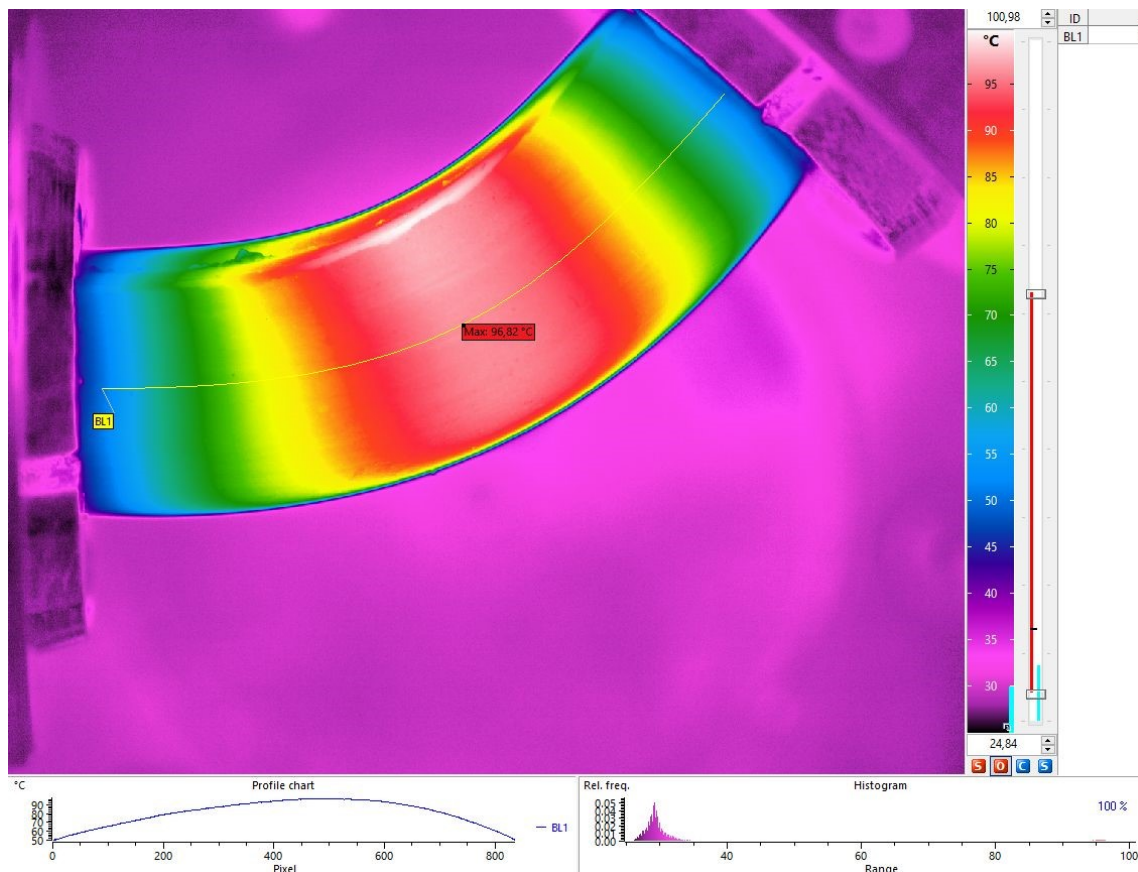
Hodnoty koeficientů a_1 a a_2 z obou měřených frekvencích cyklického zatěžování byly uvedeny do vzájemného vztahu s hodnotami ztrátových dynamických modulů ve smyku viz kapitola 10. Grafickou interpretaci těchto vztahů uvádějí grafy 22-31. Výsledky ukazují trend poklesu hodnoty směrnice počátečního nárůstu teploty s rostoucí frekvencí zatěžování a rostoucí hodnotou ztrátového modulu, teplotní maximum naopak s rostoucí frekvencí a hodnotou ztrátového modulu roste také. Jedinou výjimku z tohoto trendu vykazovala směs BR, u které se směrnice počátečního růstu vnitřní teploty s frekvencí měnila jen velice málo, u vnější teploty dokonce výrazně stoupala.



Grafy 22-31 Vztah hodnot koeficientů a_1 , a_2 , a hodnot ztrát. dynam. modulu ve smyku

11.2 Výsledky měření termokamerou

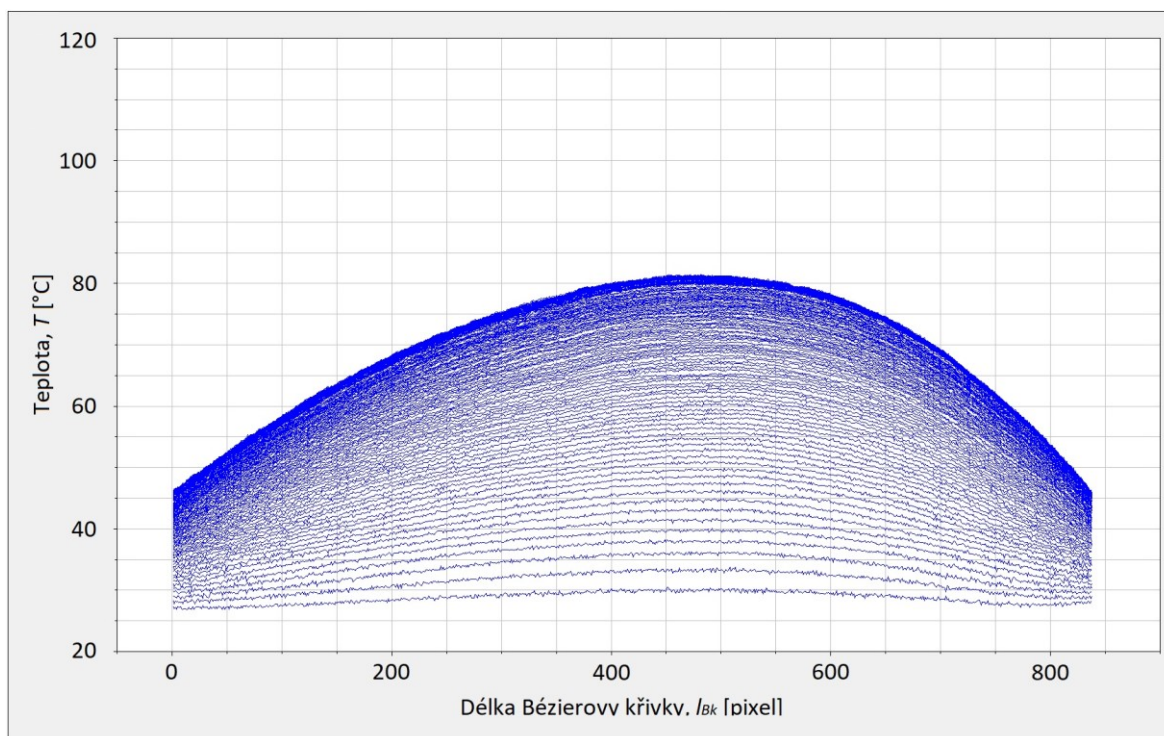
Od každé směsi byl měřen jeden vzorek za podmínek uvedených v podkapitole 9.4. Záznamy z termokamery byly vyhodnoceny pomocí software IRBIS 3 (InfraTec, Německo). Bylo využito stroboskopického efektu, přičemž snímky byly proloženy Bézierovou křivkou jako pomyslným průmětem osy testovaného vzorku na jeho povrch. Z takto definovaných křivek byla vyhodnocena teplota pro každý pixel její délky po celý čas měření.



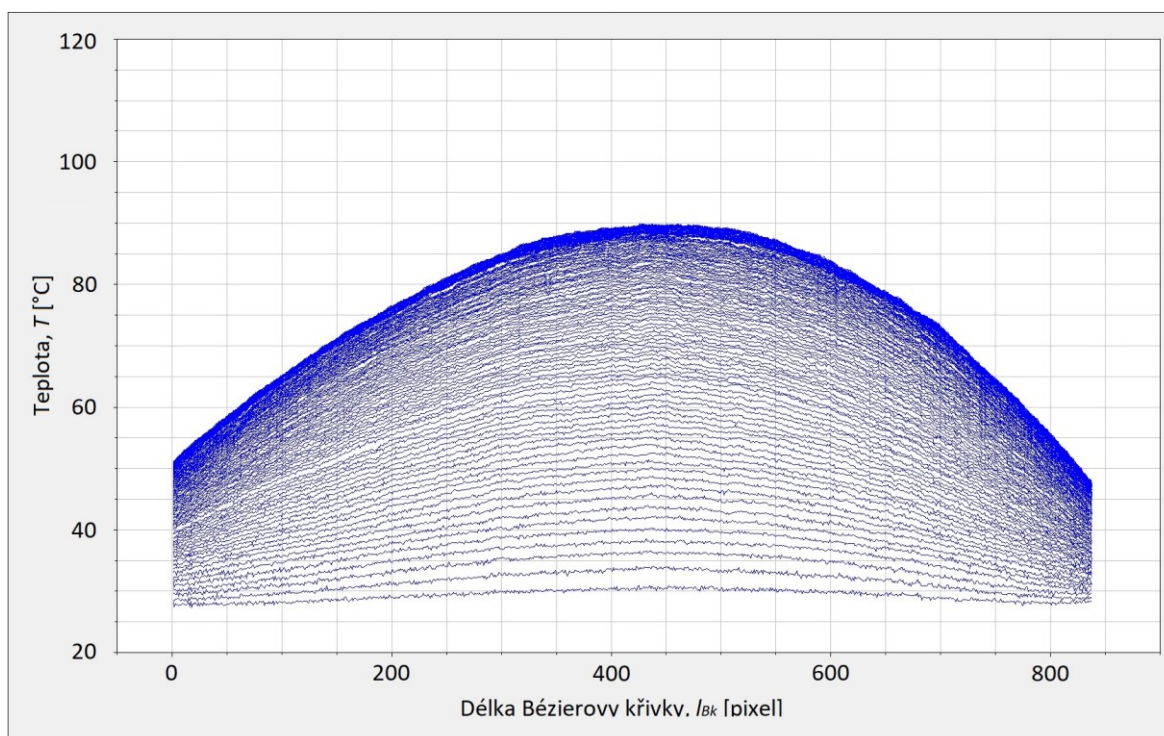
Obrázek 21 Princip vyhodnocení pomocí proložení Bézierovou křivkou

Výsledkem jsou teplotní profily, zobrazující vývoj teploty v čase po celé délce testovaného vzorku, výsledky uvádějí grafy 32-36. Výsledky ukazují, že ač může být teplotní maximum některých vzorků velice podobné, celkové rozložení teplot v celém povrchu je značně odlišné a v různé vzdálenosti od místa největšího namáhání, resp. polohy teplotního maxima, dochází k různé úrovni akumulace teploty, vzorky tedy vykazují jiné hodnoty tepelné vodivosti. Z výsledků je patrné jisté vychýlení teplotního maxima od středové polohy, kde je teplotní maximum předpokládáno. To mohlo být způsobeno nesymetričností konců, při vyhodnocení užití, Bézierovy křivky i ne zcela přesnou konstrukcí zařízení HBU

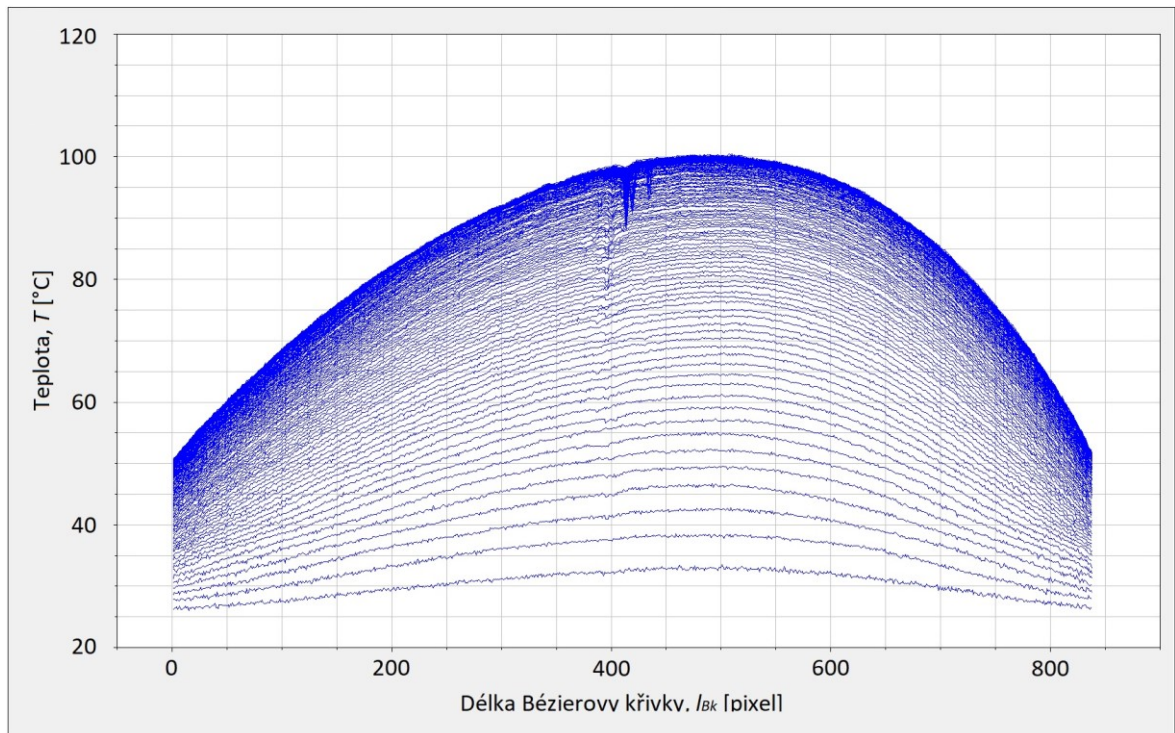
Analýser, kdy osa otočného kloubu sekundárního vřetene neleží zcela přesně ve středu neohnutého testovaného vzorku a nedochází tak ke zcela symetrickému ohybu vzorku.



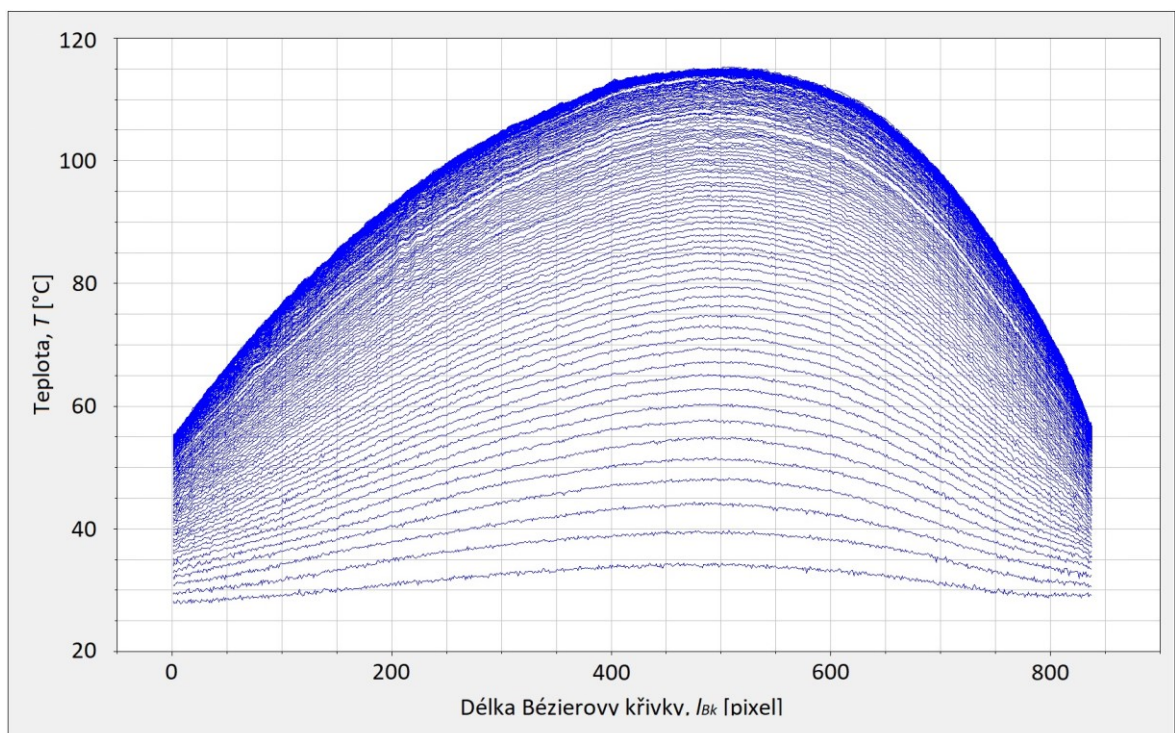
Graf 32 Průběhy růstu teploty – směs NR



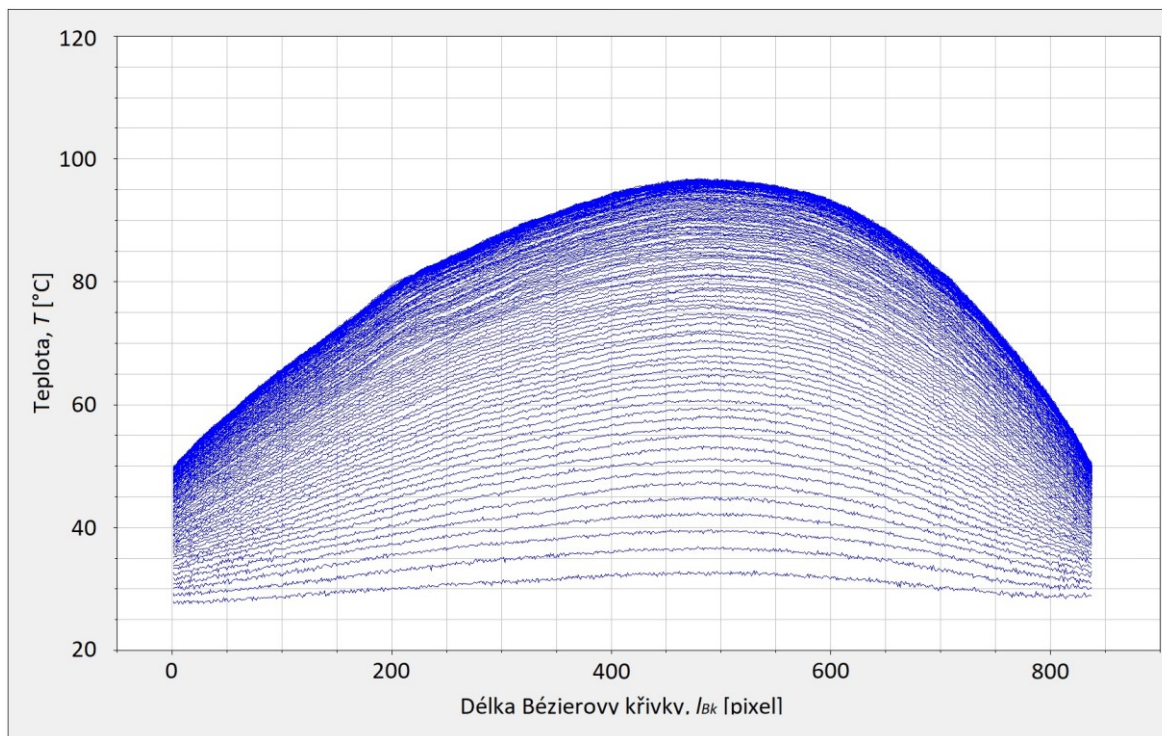
Graf 33 Průběhy růstu teploty – směs BR



Graf 34 Průběhy růstu teploty – směs SBR

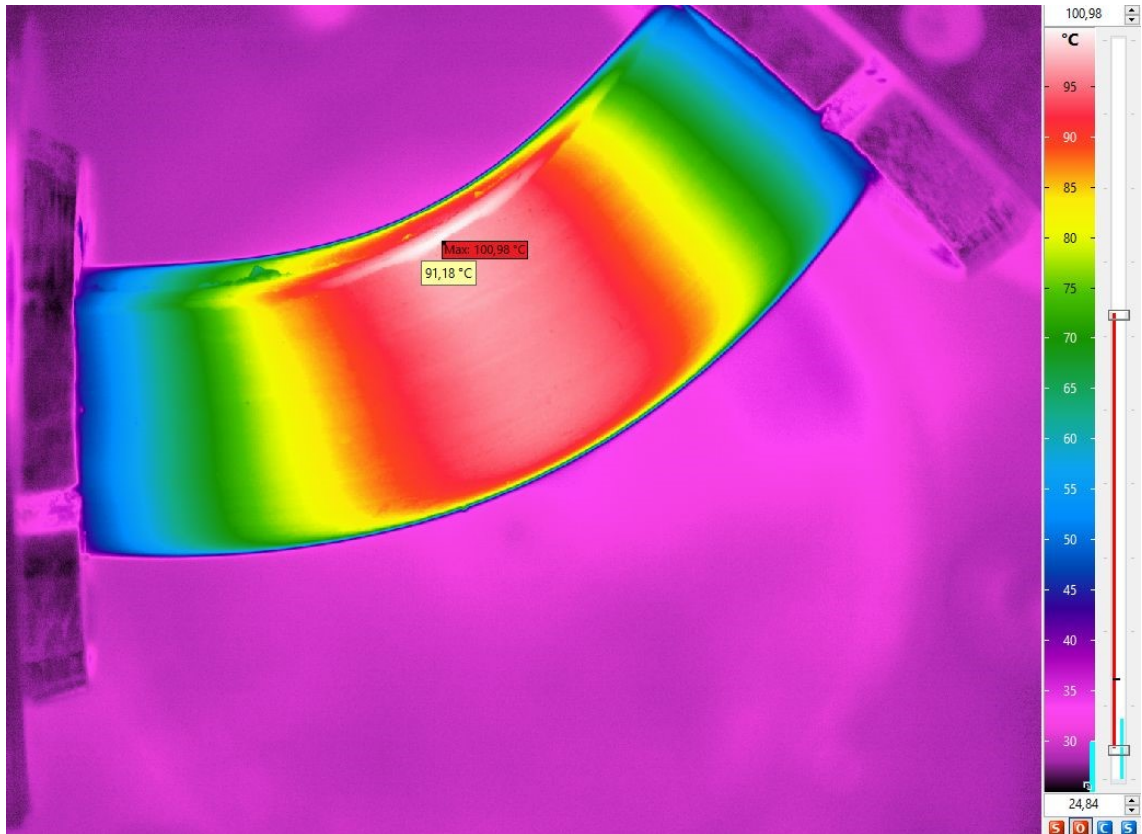


Graf 35 Průběhy růstu teploty – směs NBR

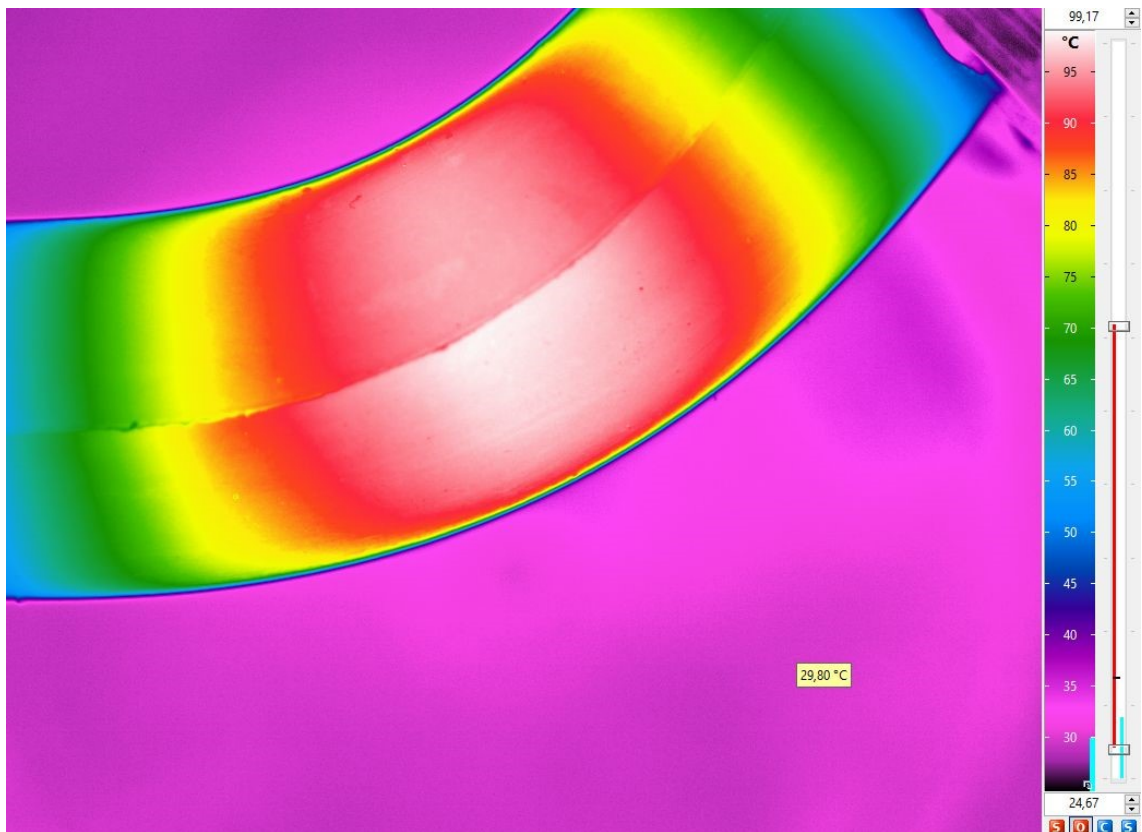


Graf 36 Průběhy růstu teploty – směs EPDM

Velice zajímavým jevem, pozorovaným u všech měřených vzorků, je značný teplotní gradient v těsné blízkosti technologického ořepu, způsobeného dělicí rovinou formy, obrázek 22. Na vzdálenosti pouze několika mm dochází k teplotnímu rozdílu téměř 10 °C. Za povšimnutí stojí také teplotní rozdíl v okolí technologického ořepu, kdy vzorek po obou stranách vykazuje odlišné teploty, což naznačuje, že materiál není zcela homogenní, obrázek 23. Zároveň tyto dva jevy mohou stát za vysvětlením výše zmíněných drobných lokálních extrémů teplotních křivek povrchové teploty měřené pomocí pyrometru. Jelikož použitý pyrometr má značný integrační čas a plochu a nelze jej synchronizovat s otáčkami zařízení, některé hodnoty byly patrně naměřeny v oblasti technologického ořepu a materiálových nehomogenit.



Obrázek 22 Teplotní rozdíl v oblasti technologického otřepu (směs EPDM)



Obrázek 23 Teplotní rozdíl v okolí technologického otřepu (směs EPDM)

ZÁVĚR

Hlavním cílem praktické části bakalářské práce bylo popsat vliv různých typů elastomerů, resp. kaučuků na kinetiku vývoje tepla uvnitř a na povrchu cyklicky zatěžovaných pryží. Kinetika teplotního vývoje byla měřena na zkušebních tělesech založených na pěti různých typech kaučuků (NR, BR, SBR, NBR, EPDM), hojně využívaných v oblasti technických pryží. Zkoumané pryže byly podrobeny sérii základních mechanických zkoušek, které potvrdily vliv typu kaučuku na mechanické vlastnosti výsledných pryží. Dynamickými mechanickými analýzami byl potvrzen trend růstu hodnoty ztrátového dynamického modulu ve smyku s rostoucí frekvencí cyklického zatěžování. Ke stanovení vývoje teploty při cyklickém zatěžování bylo použito zařízení HBU Analyser, umožňující vyvolat v testovaných vzorcích cyklické kombinované namáhání, podobné např. odvalování automobilových pneumatik. Byl potvrzen vliv použitého typu kaučuku a vliv frekvence cyklického zatěžování na kinetiku vývoje tepla zkoumaných vzorků. Křivky vývoje teplot byly kompletně matematicky popsány regresními funkcemi, což umožnilo vzájemné porovnání teplotního chování na základě hodnot matematických koeficientů těchto regresních funkcí. Komparace získaných dat ukázala, že nejnižší hodnoty hřetí, a tedy i nejlepší předpoklady pro cyklicky namáhané aplikace, vykazuje pryž založená na NR, jen o málo vyšší hodnoty hřetí vykazuje pryž založená na BR. Nejvyšší hodnoty hřetí byly pozorovány u vzorků založených na NBR, které zároveň při měření mechanických vlastností vykazovaly nejvyšší tuhost. Je tedy zřejmé, že i zde se projevuje souvislost mechanických vlastností s kinetikou vývoje tepla. Dále byl zkoumán vztah kinetiky růstu teploty a hodnot ztrátového dynamického modulu ve smyku společně s frekvencí zatěžování. Bylo popsáno několik trendů, z nichž jedinou výjimku vykazovala směs BR. Pro vyloučení možných chyb a vnějších vlivů by bylo vhodné provést kontrolní měření s nově umíchanou gumárenskou směsí a zjistit, zda bude vykazovat stejné trendy.

Pro plný, komplexní a naprosto exaktní matematicko-fyzikální popis kinetiky vývoje tepla je však nutné na růst teploty nahlížet jako na odezvu setrvačného členu 2. a vyššího řádu. Vhodné by bylo teplotní křivky nejprve „vyhladit“ od množství drobných lokálních extrémů, jejichž pravděpodobná příčina byla objasněna, pomocí speciálních statistických metod, poté hledat vhodné polynomické regresní modely a následně identifikovat oblasti 1 růstu teploty na základě inflexních bodů. Dalším krokem by poté mohlo být hledání matematických souvislostí s nelineárními hyperelastickými matematickými modely.

Dále bylo provedeno měření teploty celé plochy povrchu testovaných vzorků pomocí termokamery, poskytující informace o odlišnostech v tepelné vodivosti měřených vzorků. Byl pozorován značný teplotní gradient v oblasti technologického otřepu způsobeného dělicí rovinou formy. Pozorovaný jev vyzdvihuje důležitost zabývat se při návrhu a výrobě pryžových součástí jak geometrickou plynulostí povrchu součástí, tak přesnému slícování používaných forem a technologií začišťování vzniklých přetoků. Pozorovány byly i různé teploty v oblastech po obou stranách technologického otřepu, vypovídající o pravděpodobně ne zcela homogenní struktuře materiálu. Přesné příčiny vzniku a možnosti odstranění těchto jevů představují potenciál pro další zkoumání.

K podrobnému popisu teplotních polí testovaných vzorků by bylo vhodné využít možnosti exportu dat do SCV formátu a provést jejich další matematickou analýzu. Problém ve zpracování dat může představovat, že použitý software je licenčně vázán na PC dodaný společně s použitou termokamerou. Stejně tak může problém představovat i značný objem dat, kdy záznam pěti provedených měření má celkovou velikost cca 750 GB, což představuje značné nároky na uložení experimentálních dat i výpočetní kapacitu při zpracování.

Měření provedená v praktické části této bakalářské práce poskytla množství dat, která mohou posloužit jako dobrý základ dalšího zkoumání termomechanických vlastností pryží. Vhodné by bylo doplnění o měření při dalších frekvencích cyklického zatěžování a různých koncentracích a typech plniva. Pro hledání dalších termomechanických souvislostí by bylo vhodné zaznamenávat při měření i hodnoty ohybového momentu potřebného k ohnutí testovaného vzorku o požadovaný úhel a využít možnosti zaznamenávat hodnoty krouticího momentu primárního vřetene potřebného ke kompenzaci rotace vřetene sekundárního, které by poskytly cenná data o ztrátě mechanických vlastností v průběhu zatěžování. Pro ověření vztahu růstu teploty k celkové funkční životnosti pryže by bylo vhodné provést i ověřovací měření až do mechanického selhání vzorků. Takto získaná data a z nich plynoucí vztahy mohou poskytnout cenné vědomosti nejen pro oblast základního výzkumu fyzikálních vlastností pryží, ale mohou mít i velký význam pro technickou praxi v podobě dat pro tvorbu vhodných konečně-prvkových analýz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PRINCI, Elisabetta. *Rubber: Science and Technology*. 2019. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co KG. ISBN 978-3-11-064031-1.
- [2] MALÁČ, Jiří. *Gumárenská technologie* [online]. In: . 2005. Zlín, 2005, s. 1-1000 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/32199886-Gumarenska-technologie.html>
- [3] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. 2009. Praha: VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [4] VISAKH, P.M., S. THOMAS, A.K. CHANDRA a A.P. MATHEW. *Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks*. 2013. Berlin: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-20924-6.
- [5] DE, Sadhan a Jim WHITE. *Rubber technologist's handbook*. 2001. Shrewsbury: Rapra Technology Limited, 2001. ISBN 1-85957-262-6.
- [6] CIULLO, Peter a Norman HEWITT. *The Rubber Formulary*. 1999. New York: Noyes Publications/William Andrew Publishing, LLC, 1999. ISBN 0-8155-1434-4.
- [7] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2011. Praha: VŠCHT Praha, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [8] HANHI, Kalle, Minna POIKELISPÄÄ a Hanna-Mari TIRILÄ. *Elastomeric Materials* [online]. 2007. Tampere: Tampere University of Technology, 2007 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://docplayer.net/36571488-Elastomeric-materials.html>
- [9] ERMAN, Burak, James MARK a Michael ROLAND. *The Science and Technology of Rubber: Fourth edition*. 2013. Oxford: Elsevier Inc., 2013. ISBN 978-0-12-394584-6.
- [10] EBWELE, Robert O. *Polymer science and technology*. 2000. New York: CRC Press, 2000. ISBN 0-8493-8939-9.
- [11] IKEDA, Yuko, Atsushi KATO, Shinzo KOHJIYA a Yukio NAKAJIMA. *Rubber Science: A Modern Approach*. 2018. Berlin: Springer, 2018. ISBN 978-9811097447.
- [12] KUMAR, Anil a Rakesh GUPTA. *Fundamentals of Polymers Engineering: Second Edition Revised and Expanded*. 2003. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. ISBN 0-8247-0867-9.

- [13] PAINTER, Paul a Michael COLEMAN. *Essentials of Polymer Science and Engineering*. 2009. Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, Inc., 2009. ISBN 978-1-932078-75-6.
- [14] Fyzika polymerů: studijní texty. In: *Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB* [online]. Zlín [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=fyzika_pol
- [15] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1987. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [16] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Druhé přepracované vydání*. 2019. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [17] BOWER, David I. *An Introduction to Polymer Physics*. 2002. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 978-0-512-63721-3.
- [18] BOWER, Allan F. *Applied Mechanics of Solids*. 2010. New York: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-0247-2.
- [19] SPERLING, L. H. *Introduction to physical polymer science: Fourth edition*. 2006. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN 978-0-471-70606-9.
- [20] Heat build-up characterization under realistic load. In: STOČEK, R., M. STĚNIČKA a R. KIPSCHOLL. *Constitutive Models for Rubber XI*. 2019. London: CRC Press, 2019, s. 157. ISBN 978-0-367-34258-6.
- [21] LUO, R., W. MORTEL a X. WU. Investigation on rubber failure due to heat generation under dynamic loading. *Journal of Materials Design and Applications*. 2015, **2015**(229), 1-4. Dostupné z: doi:10.1177/1464420713500044
- [22] GENT, A. a M. HINDI. Heat Build-Up and Blowout of Rubber Blocks. *Rubber Chemistry and Technology*. 1988, **61**(5), 892–905.
- [23] KERCHMAN, Vladimír a Cheng SHAW. Experimental Study and Finite Element Simulation of Heat Build-Up in Rubber Compounds with Application to Fracture. *Rubber Chemistry and Technology*. 2003, **76**(2), 386–405.
- [24] MACOUR, Milan. *Úvod do analitické mechaniky a mechaniky kontinua*. 2010. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-3944-3.
- [25] BANIC, Milan, Dusan STAMENKOVIC, Vojislav MILTENOVIC, Milos MILOSEVIC, Aleksandar MILTENOVIC, Petar DJEKIC a Milan RACKOV.

- Prediction of heat generation in rubber or rubber-metal springs. *Thermal Science*. 2012, **2012**, 527-529. Dostupné z: doi:10.2298/TSCI120503189B
- [26] LUO, Wenbo, Youjian HUANG, Boyuan YIN, Xia JIANG a Xiaoling HU. Fatigue Life Assessment of Filled Rubber by Hysteresis Inducted Self-Heating Temperature. *Polymers*. 2020, **2020**(12), 1-2.
- [27] HUANG, J., M. PASTOR, C. GARNIER a X. GONG. A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates. *International Journal of Fatigue*. 2019, **2019**(120), 87-95.
- [28] LA ROSA, G. a A. RISITANO. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*. 2000, **2000**(22), 65-73.
- [29] PETER, O., R. STOČEK a O. KRATINA. Experimental and Numerical Description of the Heat Build-Up in Rubber Under Cyclic Loading. In: STOČEK, Radek, Reinhold KIPSCHOLL a Gert HEINRICH. *Degradation of Elastomers in Practice, Experiments and Modeling: Advances in Polymer Science, vol. 289*. 2023. Berlin: Springer, 2023, s. 199-204. ISBN 978-3-031-15163-7.
- [30] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. *Sdílení tepla a proudění*. 2012. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.
- [31] MORAN, Michael, Howard SHAPIRO, Daisie BOETTNER a Margaret BAILEY. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics: Seventh Edition*. 2011. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 13 978-0470-49590-2.
- [32] RAJPUT, R. K. *Engineering Thermodynamics: Third Edition*. 2007. New Delhi: Laxmi Publications Ltd, 2007. ISBN 978-0-7637-8272-6.
- [33] BORGNAKKE, Claus a Richard SONNTAG. *Fundamentals of Thermodynamics: Eighth edition*. 2013. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2013. ISBN 978-1-118-13199-2.
- [34] PAVELEK, Milan, Eva JANOTKOVÁ a Josef ŠTĚTINA. *Vizualizační a optické měřicí metody: Druhé vydání* [online]. 2007. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství - Energetický ústav, 2007 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0000.htm>
- [35] LIBOFF, Richard L. *Kinetic Theory: Classical, Quantum, and Relativistic Descriptions, Third Edition*. 2003. New York: Springer, 2003. ISBN 0-387-95551-8.

- [36] JENČÍK, J. a J. VOLF. *Technická měření*. 2003. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02138-6.
- [37] KREIDL, M. *Měření teploty: Senzory a měřicí obvody*. 2005. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [38] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 2005. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0180-2.
- [39] SARAWADE, A. a N. CHARNIYA. Infrared Thermography and its Applications: A Review. In: *3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. 2018. Coimbatore, India, 2018, s. 280-285. Dostupné z: doi:10.1109/CESYS.2018.8723875
- [40] VAVILOV, Vladimir a Douglas BURLEIGH. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. 2020. Berlin: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-48002-8.
- [41] HELEBRANT, František, Vlastimil MONI a Jan BLATA. *Termografie*. 2010. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010. Studijní podklady. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [42] STOČEK, Radek. *Some Revisions of Fatigue Crack Growth Characteristics of Rubber*. In: . ISBN 978-3-030-68920-9.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	pohltivost [-]
a	součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
a_1	koeficient regresní funkce [-]
a_2	koeficient regresní funkce [-]
b	koeficient regresní funkce [-]
b	Wienova konstanta [$\text{m} \cdot \text{K}$]
c	rychlost světla ve vakuu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
d	derivace
∂	parciální derivace
E	energie [J]
E	intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
E^*	komplexní modul pružnosti v tahu [Pa]
E'	reálná složka modulu pružnosti v tahu [Pa]
E''	imaginární složka modulu pružnosti v tahu [Pa]
E_0	intenzita vyzařování černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
$E_{0,\lambda}$	spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]
E_λ	spektrální intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]
F	síla [N]
F	celková síla potřebná ke změně konformace [N]
f	frekvence [Hz]
G''	imaginární složka modulu pružnosti ve smyku [Pa]
h	Planckova konstanta [$\text{J} \cdot \text{s}$]
H_d	rychlost disipace energie při konstantní amplitudě deformace [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
k	Boltzmannova konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$]
k_1	koeficient tuhosti [-]

k_2	koeficient viskózního odporu [-]
l	délka [m]
M_C	molekulová hmotnost mezi uzly sítě [kg·mol ⁻¹]
N	tisíce cyklů [-]
P	zářivý tok [W]
P_{atm}	zářivý tok atmosféry [W]
P_{obj}	zářivý tok od měřeného objektu [W]
P_{odr}	zářivý tok odrážející se od měřeného objektu [W]
Q	teplo [J]
\dot{Q}	tepelný tok [W]
Q_e	energie záření [J]
r	vzdálenost konců řetězce [m]
S	entropie [J·K ⁻¹]
S	plocha [m ²]
t	čas [s]
T	teplota [K]
T	teplotní pole [°C]
T_g	teplota skelného přechodu [°C]
ΔT	teplotní přírůstek [°C]
ΔT	teplotní rozdíl [K]
T_{atm}	termodynamická teplota atmosféry [K]
T_{obj}	termodynamická teplota měřeného objektu [K]
T_{okolf}	termodynamická teplota okolí objektu [K]
U	celková vnitřní energie systému [J]
V	objem [m ³]

W	práce [J]
x	prostorová proměnná [m]
y	prostorová proměnná [m]
z	prostorová proměnná [m]
α	součinitel pohlcení [-]
α	součinitel přestupu tepla konvekcí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
γ_0	poměrné smykové posunutí na počátku děje [-]
δ	fázový posun [-]
ε	emisivita [-]
ε	poměrná deformace [-]
ε_0	poměrná deformace na počátku děje [-]
η	činitel vnitřního tlumení [-]
λ	součinitel teplotní vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ	vlnová délka [m]
λ_{max}	vlnová délka s maximální spektrální intenzitou vyzařování [m]
ν	koncentrace řetězců sítě [$mol \cdot m^{-3}$]
π	Ludolfovo číslo [-]
ρ	hustota sítě [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ	součinitel odrazu [-]
σ	napětí [Pa]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]
σ_0	napětí na počátku děje [Pa]
τ	součinitel prostupu [-],
ω	kruhová frekvence [Hz],
∇	nabla operátor [-]
∇^2	Laplaceův operátor [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Chemické vzorec vybraných kaučuků [6].....	13
Obrázek 2 Tvorba sítě [9]	19
Obrázek 3 Teplotní pole a izotermy [30]	33
Obrázek 4 Rozsah oblasti tepelného záření v elektromagnetickém poli [34]	35
Obrázek 5 Radiační vlastnosti [30].....	36
Obrázek 6 Měřicí řetězec [41]	43
Obrázek 7 Jednotlivé typy kaučuků připravené pro míchání gumárenských směsí.....	47
Obrázek 8 Vnitřní hnětič.....	48
Obrázek 9 Dvouválcový kalandr	48
Obrázek 10 Připravené gumárenské směsi	49
Obrázek 11 Laboratorní vysekávací lis a oscilační reometr	50
Obrázek 12 Rozměry vyráběných testovacích těles	50
Obrázek 13 Materiál připravený pro vložení do formy	51
Obrázek 14 Použitá forma s trny	51
Obrázek 15 Laboratorní lis	52
Obrázek 16 Hotový vulkanizát s neodstraněnými přetoky.....	52
Obrázek 17 Schéma zařízení HBU Analyser [20].....	54
Obrázek 18 Schéma principu měření [20]	54
Obrázek 19 Vzorek připravený k měření v zařízení HBU Analyser	55
Obrázek 20 Vzorek připravený k měření termokamerou	56
Obrázek 21 Princip vyhodnocení pomocí proložení Bézierovou křivkou.....	67
Obrázek 22 Teplotní rozdíl v oblasti technologického otřepu (směs EPDM).....	71
Obrázek 23 Teplotní rozdíl v okolí technologického otřepu (směs EPDM)	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Standardní složení gumárenských směsí [1].....	11
Tabulka 2 Zkratky a relativní spotřeba nejběžněji používaných kaučuků [7].....	14
Tabulka 3 Složení gumárenských směsí	46
Tabulka 4 Postup míchání gumárenských směsí	47
Tabulka 5 Vulkanizační charakteristiky	49
Tabulka 6 Základní parametry zařízení HBU Analyser	54
Tabulka 7 Podmínky měření pyrometrem a kontaktním snímačem.....	55
Tabulka 8 Podmínky měření termokamerou	56
Tabulka 9 Výsledky tahových zkoušek	57
Tabulka 10 Výsledky měření tvrdost.....	57
Tabulka 11 Hodnoty komplexních dynamických modulů ve smyku	58
Tabulka 12 Přehled koeficientů a_1	64
Tabulka 13 Přehled koeficientů a_2 a b	65

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Typické průběhy vulkanizačních křivek [9].....	20
Graf 2 Vlastnosti vulkanizátu jako funkce rozsahu vulkanizace [9]	20
Graf 3 Tahová křivky neplněné pryže [14].....	21
Graf 4 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání ideálně elastického materiálu [14].....	24
Graf 5 Závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání ideálně elastického materiálu [14].....	25
Graf 6 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání ideálně viskózního materiálu [14]	25
Graf 7 Závislost napětí a poměrné deformací při harmonickém namáhání ideálně viskózního materiálu [14].....	26
Graf 8 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání viskoelastického materiálu [14]	26
Graf 9 Závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání viskoelastického materiálu [14].....	27
Graf 10 Typický vývoj teplot v průběhu únavové zkoušky [27].....	32
Graf 11 Grafické znázornění Stefan-Boltzmannova zákona [34].....	37
Graf 12 Grafické znázornění Planckova a Wienova zákona [34].....	38
Graf 13 Graf vztahu hodnoty ztrátového dynamického modulu ve smyku a frekvence	59
Graf 14 Průběhy růstu teploty při frekvenci zatěžování 10 Hz	61
Graf 15 Průběhy růstu teploty při frekvenci zatěžování 20 Hz	61
Graf 16 Komparace maximálních teplotních přírůstků při frekvenci zatěžování 10 Hz a 20 Hz.....	62
Grafy 17, 18 Fáze 1 růstu teploty při frekvenci zatěžování 10 Hz a 20 Hz.....	62
Graf 19 Znázornění regrese výsledků měření.....	63
Grafy 20, 21 Grafická komparace koeficientů a_1 a a_2	64

Grafy 22-31 Vzájemný vztah hodnot koeficientů a_1 , a_2 , a hodnot ztrátového dynamického modulu ve smyku.....	66
Graf 32 Průběhy růstu teploty – směs NR	68
Graf 33 Průběhy růstu teploty – směs BR	68
Graf 34 Průběhy růstu teploty – směs SBR	69
Graf 35 Průběhy růstu teploty – směs NBR	69
Graf 36 Průběhy růstu teploty – směs EPDM.....	70