

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálů a strojírenské technologie



Diplomová práce

**Vliv okolního prostředí na rychlost opotřebení pláště
pneumatiky**

Filip Černota

© 2020 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Filip Černota

Zemědělská technika

Název práce

Vliv okolního prostředí na rychlost opotřebení pláště pneumatiky

Název anglicky

Environment influence on speed of tyre tread wear

Cíle práce

Cílem diplomové práce je výzkum opotřebení pláště pneumatiky při různém stupni její degradace. Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice. Vlastní experimentální část bude věnována výzkumu zejména v prostorách laboratoří katedry.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

Degradace, opotřebení, pneumatika, testování, tvrdost Shore

Doporučené zdroje informací

Časopis: Rubber Chemistry and Technology, Comprehensive Composite Material, The Science and Technology, Applied composite materials, Journal of Terramechanics, Strojírenská technologie, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, Plasty a kaučuk.

DASTAÑO, N., et al.: Applied Rubber Technology, Hanser Verlag, 2001

DAVIS, P. A.: Aircraft tire care and maintenance. Technical information. Goodyear, 2002.

DICK, J. S., ANNICELLI, R. A.: Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance. Hanser Verlag, 2001.

DUCHÁČEK, V.: Polymery výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: VŠCHT Kanag – tisk, 2006.

KRMELA, J.: Pláště pneumatik a jejich materiálové charakteristiky pro výpočtové modelování, Tnuni, 2017.

KRMELA, J.: Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I. Brno: Tribun EU, 2008.

MASTINU, G., PLÖCHL, M.: Road and off-road vehicle system dynamics handbook. Boca Raton: CRC Press, 2014.

PACEJKA, H. B.: Tyre and vehicle dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

SMITH, R. H.: Analyzing friction in the design of rubber products and their paired surfaces. Boca Raton: CRC Press, 2008.

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2019

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 04. 10. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv okolního prostředí na rychlost opotřebení pláště pneumatiky" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 6.4.2020

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Müllerovi Ph.D., za odborné připomínky, vstřícný přístup, ochotu a čas, který mi během psaní práce věnoval. Dále bych rád poděkoval panu Milanu Klímovi za ochotu a čas, který mi věnoval během přípravy vzorků a měření v prostorách dílen. Společnosti Linde Material Handling Česká republika s.r.o. děkuji za poskytnutí sady pneumatik pro účely testování. V neposlední řadě děkuji své rodině a přítelkyni za podporu během studia.

Vliv okolního prostředí na rychlost opotřebení pláště pneumatiky

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší problematiku vlivu degradačních procesů okolního prostředí na rychlost opotřebení pláště pneumatiky. V úvodu práce je uvedena historie vývoje pneumatik, používané konstrukce, materiály používané při výrobě, výrobní postupy a degradační vlivy různých prostředí. V závěrečné části jsou zpracovány a zhodnoceny vlastní naměřené hodnoty. Dále jsou v práci popsány základní metody přípravy vzorků, vlastnosti zvolené pneumatiky, charakteristiky degradačních prostředí a základní vlastnosti veškerého použitého zařízení během praktické části.

Klíčová slova:

Degradace, pneumatika, opotřebení, testování, tvrdost Shore

Environment influence on speed of tyre tread wear

Abstract

This thesis solves the issue of environmental degradation processes on the speed of tire wear. At the beginning there is described history of tire development, construction, materials used in production, production processes and degradation effects of different mediums. In the next part of thesis there are presented basic methods of sample preparation, properties of tire, properties of degradation mediums and basic characteristic of all equipment used during practical part. In The final part are processed and evaluated own measured values.

Keywords:

Degradation, tire, wear, testing, hardness Shore

Obsah

1 Úvod	10
2 Konstrukce a mechanické vlastnosti pneumatik	11
2.1 Definice pneumatiky.....	11
2.2 Historie	11
2.3 Požadavky na pneumatiky	12
2.4 Značení pláště	14
2.5 Konstrukce pneumatik	16
2.5.1 Běhoun	17
2.5.2 Polyamidový a ocelový nárazník	18
2.5.3 Vnitřní vrstva pryže.....	19
2.5.4 Patka pneumatiky, jádro patky a patní lanko	19
2.5.5 Bočnice.....	20
2.5.6 Kostra	20
2.6 Výroba pneumatik	20
2.6.1 Materiály použité při výrobě	21
2.6.2 Výrobní proces	25
3 Rozdělení pneumatik	27
3.1 Konstrukční uspořádání kostry pláště a nárazníku	27
3.1.1 Radiální pneumatiky	27
3.1.2 Diagonální pneumatiky	28
3.1.3 Diagonální s nárazníkovým pásem	29
3.2 Vzorek běhounu.....	30
3.2.1 Letní pneumatiky.....	30
3.2.2 Zimní pneumatiky	31
3.2.3 Celoroční pneumatiky	32
4 Degradace pneumatik	33
4.1 Vliv teploty	33
4.2 Vliv ozonu	34
4.3 Vliv slunečního záření	34
4.4 Vliv kyslíku	34
4.5 Vliv vlhkosti	35
4.6 Vliv chemických činidel.....	35
4.7 Vliv mechanického namáhání	36
5 Opotřebení pneumatik	37
6 Cíle práce a metodika	39
6.1 Cíle práce	39

6.2	Metodika.....	39
6.2.1	Testovaný typ pneumatik	39
6.2.2	Příprava vzorků	40
6.3	Degradační prostředí.....	43
6.3.1	Roztok NaCl.....	44
6.3.2	Klimatická komora	44
6.4	Metody měření.....	45
6.4.1	Opotřebení	46
6.4.2	Tvrdost	48
6.5	Statistické vyhodnocení výsledků	51
7	Hodnocení naměřených hodnot.....	52
7.1	Změna tvrdosti povrchové vrstvy	52
7.1.1	Vliv 5% roztoku NaCl.....	52
7.1.2	Vliv degradace klimatickou komorou	61
7.2	Opotřebení	70
7.2.1	Vliv 5% roztoku NaCl.....	70
7.2.2	Vliv degradace klimatickou komorou	72
8	Závěr	76
9	Příloha.....	78
10	Zdroje literatury	80
11	Seznam obrázků.....	84
12	Seznam tabulek.....	85
13	Seznam grafů.....	86

1 Úvod

Pneumatiky jsou jediným komponentem, který spojuje vozidlo s povrchem vozovky. Z tohoto důvodu jsou na ně kladeny vysoké požadavky. Nejdůležitější vlastností pneumatik je schopnost přenášet hnací a brzdňý moment, boční síly působící při průjezdu zatáčkou a zpětnou reakci od vozovky k řidiči. Další nutnou vlastností pneumatiky je schopnost nést hmotnost vozu i s nákladem a pasažéry. Konstrukcí pneumatiky je možné do značné míry ovlivnit i komfort jízdy, protože pneumatika funguje částečně jako tlumič tlumící rázy od vozovky, konstrukcí běhounu je taktéž možné ovlivnit zvukové emise. V současnosti je velice probíraným tématem ekologičnost (vznik gumového odpadu při provozu) a možnost recyklace již vyřazeného pláště.

Rozvoj automobilového průmyslu nutí výrobce pneumatik stále zdokonalovat své výrobky a přizpůsobovat je aktuálním trendům. S vývojem automobilů dochází zejména ke zvyšování dopravních rychlostí, schopnosti vozů převážet hmotnější náklady a zvyšování nároků na komfort pasažéra. Všechny tyto inovace se promítají v konstrukci pneumatik. Však nejdůležitějším faktorem nutícím jednotlivé výrobce k inovacím je konkurenční boj mezi jednotlivými výrobci a snaha zaujmout zákazníky lepším produktem. Největší část nakupujících vybírá pneumatiku dle ceny, ekonomičnosti provozu či udávané kilometrové životnosti. Právě kilometrová životnost je značně závislá na kvalitě provedení pneumatiky a na rychlosti její degradace ze strany okolního prostředí.

Právě touto závislostí se zabývá má diplomová práce, která zkoumá změnu tvrdosti povrchové vrstvy běhounu a rychlost opotřebení v závislosti na stupni degradace okolním prostředím. Rychlost opotřebení neurčuje celkovou kilometrovou životnost, protože ta se může mimo jiné velice lišit v závislosti na stylu jízdy a mnohých jiných aspektech, ale charakterizuje její změnu v porovnání s pneumatikou o původních vlastnostech, které definuje výrobce.

Vzorky pláště byly umístěny do dvou degradačních prostředí, která simulovala podmínky, se kterými se může pneumatika během provozu standardně setkat. Prvním byla zvolena klimatická komora, kde docházelo k periodickému cyklování teplot a vlhkosti. Druhým byl solný roztok simulující provoz na solným posypem upravené vozovce. Vliv působení prostřední je hodnocen hodnotou tvrdosti povrchové vrstvy a úbytkem hmoty během zkoušky na opotřebení v závislosti na době působení. Během zkoušení byl zároveň porovnáván vliv rozdílného stáří dvou totožných pneumatik na rychlost degradace.

2 Konstrukce a mechanické vlastnosti pneumatik

2.1 Definice pneumatiky

Dle normy je pojem pneumatika definován jako souborný název pro plášť, popřípadě duši a ochrannou vložku namontovanou na ráfek kola. Duše, či samotný plášť je při tom naplněn tlakovým médiem.[1]

Pneumatiky je možné definovat z mnoha hledisek. Z geometrického hlediska tvoří pneumatika uzavřený prsteneček (toroid). Z hlediska pevnosti a pružnosti je definována jako tlaková nádoba se stěnami z pružné membrány.[2] Ze strukturálního hlediska můžeme pneumatiku hodnotit jako heterogenní kompozitní těleso anizotropních vlastností.[3] Z chemického hlediska se jedná o soustavu nesítěných a nezesítěných makromolekulárních materiálů a oceli.[4]

2.2 Historie

První kola vznikla velice pravděpodobně 3000 let před naším letopočtem v oblasti osídlené Sumery. Tato kola byla plná, vyrobena z jednoho kusu, nebo z pospojovaných dřevěných desek. Kolem roku 2000 př. n. l. došlo k významnému zdokonalení – vznik paprskových kol. Tato inovace byla prvně objevena na Mezopotámských válečných vozech.[5]

K největšímu vývoji v oblasti kol a pneumatik došlo v 19. století s příchodem prvních automobilů. Během vývoje v oblasti automobilové dopravy se velmi brzy ukázalo, že současná kola brání dalšímu rozvoji, zejména limitováním rychlosti a průjezdnosti. V roce 1839 vynalezl Charles Goodyear metodu vulkanizace kaučuku sírou, tuto metodu si nechal patentovat roku 1844. O rok později získal Robert William Thomson patent na tzv. “vzduchovou hadici“, pro rozšíření vynálezu však nebyla vhodná doba, a tak upadl v zapomnění. V roce 1867 se začínají používat plné pryžové obruče, které umožňují dosáhnout vyšších rychlostí. Roku 1888 si John Boyd Dunlop nechal patentovat vzduchem plněnou pneumatiku, dalším jeho významným patentem byla roku 1894 pneumatika s drátem vyztuženou patkou. O svůj patent vzduchem plněné pneumatiky však později přichází z důvodu patentované “vzduchové hadice“ R. W. Thomsona.[2]

V konstrukci pneumatik historických vozidel nebylo užíváno vyztužných materiálů. Tento typ konstrukce způsoboval komplikace zejména z hlediska životnosti pneumatiky a počtu dopravních nehod způsobených roztržením pneumatiky. Vývoj proto směřoval k pneumatikám

s kostrou tvořenou z kříženého výztužného materiálu. V roce 1892 J. F. Palmer nahradil křížený výztužný materiál za kordovou tkaninu. Pro výrobu kordové tkaniny se zraje užíval irský len, který byl později nahrazen bavlnou a v roce 1923 se začal používat kord z regenerované celulosy. Kord z regenerované celulosy se používal až do roku 1937, kdy byl prvně použit ocelový kord. Roku 1950 byl prvně použit polyamidový kord, v roce 1962 se začal užívat polyesterový kord, o pět let později byl nahrazen kordem na bázi skleněných vláken, který byl po roce 1976 vyměněn za kord na bázi aromatických polyamidů.[3]

Rozvoj pneumatik probíhal nejen v oblasti výztužných materiálů, ale i v oblasti výroby a změn jízdních vlastností. V roce 1904 byl zaveden plochý běhoun, který zlepšoval styk s vozovkou. V roce 1905 byl běhoun opatřen protiskluzovou úpravou (vzorkem) zlepšující přenos sil mezi vozidlem a vozovkou.[3] Pneumatiky byly vyráběny pouze z přírodního kaučuku, to se však změnilo roku 1929, kdy německý chemik Walter Bock vytvořil syntetický kaučuk BUNA S. Tento syntetický kaučuk byl tvořen směsí butadienu a styrenu.[6] Roku 1948 zahájil Michelin vývoj pneumatiky radiální konstrukce. O dva roky později byla vytvořena první bezdušová pneumatika, v roce 1967 vzniká konstrukce s diagonální kostrou opásanou výztužným pásem (nárazníkem) – tzv. bias belted pneumatiky.[3] V roce 1969 je na trh uvedena první pneumatika do deště společnosti Uniroyal, významnější inovací byly však jejich pneumatiky určené pro provoz na sněhu. Stará konstrukce z roku 1938, která byla opatřena hroty, musela být inovována, neboť docházelo k narušování povrchu vozovky. Tyto kovové hroty byly proto prvně nahrazeny systémem drobných drážek. Roku 1978 přišel Michelin s novou řadou pneumatik označených jako TRX – jednalo se o první nízkoprofilové pneumatiky.[2]

2.3 Požadavky na pneumatiky

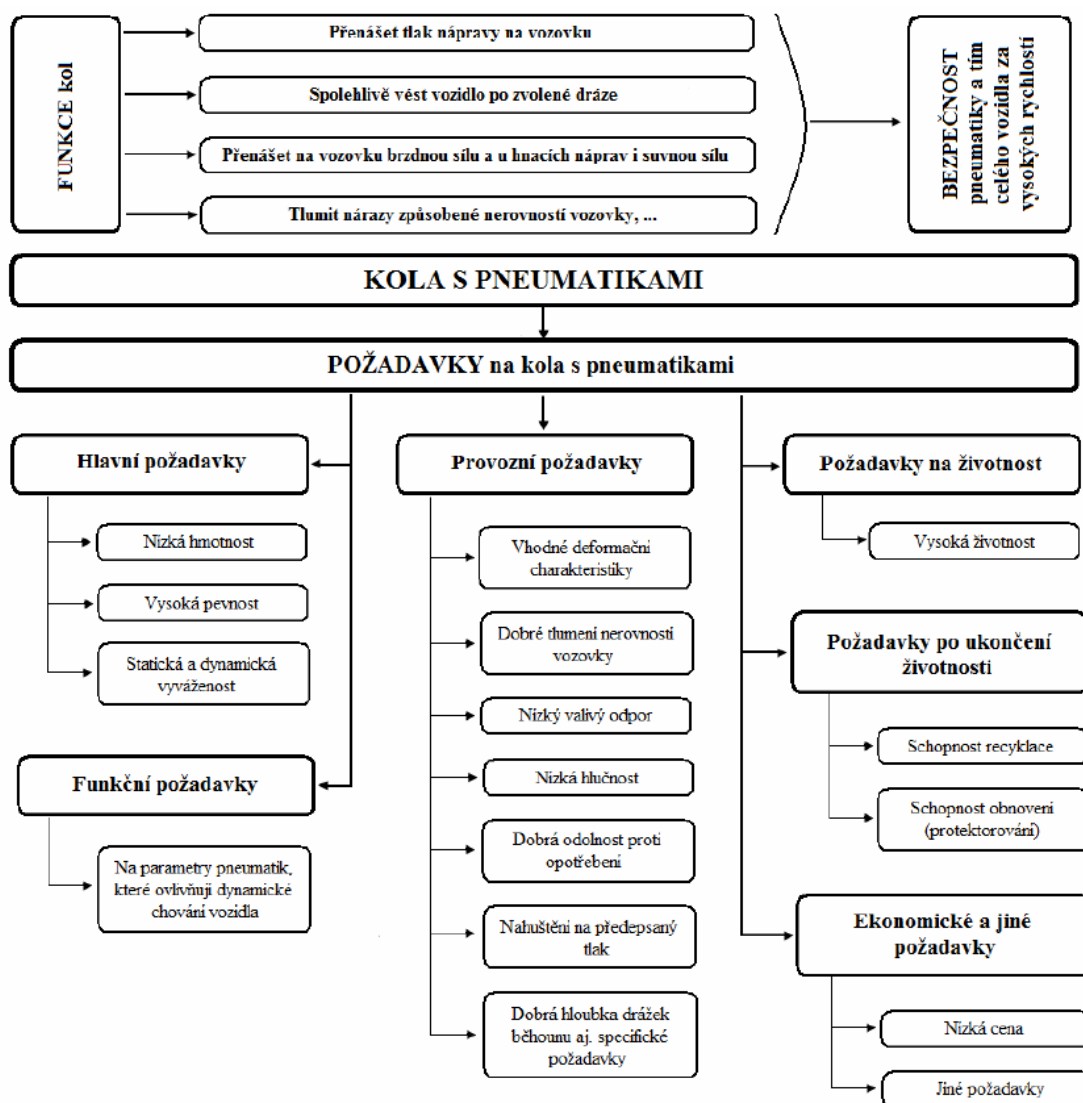
Pro uživatele vozu se jedná o jedinou část, která je v kontaktu s vozovkou, přenáší síly od vozidla na vozovku a zpětnou vazbu od vozovky zpět k řidiči. Během provozu je stavu pneumatik ze strany provozovatelů vozu věnována téměř nulová pozornost. Proto jsou na tuto část vozu ve výrobě kladeny vysoké požadavky.

Jedná se zejména o schopnost nést váhu vozidla i s nákladem. Z tohoto důvodu je na každé pneumatice uváděn index nosnosti. Tlumit a absorbovat rázy, při jízdě po hrbolaté podložce. Vyznačovat se dobrou adhezí za různých podmínek. V současné době se klade důraz zejména na hlukové emise, které nepříjemně ovlivňují jak posádku, tak zejména okolí vozu.

Z tohoto důvodu se každá nově vyrobená pneumatika opatřuje ekologickým štítkem, na kterém se uvádí přilnavost, míra valivého odporu a hlučnost provozu.[4]

Všem těmto vlastnostem je třeba vyhovět alespoň do určité míry a najít mezi nimi kompromis, neboť zlepšení některé vlastnosti může vést ke zhoršení vlastnosti jiné. Příkladem může být případ, kdy je pro konstruktéra žádoucí, aby pneumatiky svou radiální pružností tlumily vibrace od vozovky, ale zároveň radiální poddajnost je příčinou vibrací vlastní kostry.[2] V současnosti těmto požadavkům vyhovuje pouze pneumatika. To je dáno zejména schopností deformovat se a tlumit rázy vznikající od vozovky.[4]

Obr.: 1 Funkce kol s pneumatikami a požadavky na ně kladené



Zdroj: [3]

2.4 Značení pláště

Pro usnadnění orientace a výběru, musí být pneumatiky značeny předepsaným způsobem. V současné době neexistuje sjednocený systém značení. Pro oblast evropského trhu musí být označovány dle směrnic EHS/ES/EU nebo předpisů EHK/OSN. Dle předpisu EHK č. 30 musí mít pneumatiky na bočnici uvedeny tyto údaje: obchodní název nebo obchodní značku, označení rozměru a konstrukce, index rychlosti a únosnosti, datum a místo výroby, další informace, pokud je to nezbytné k označení dané pneumatiky, jako např.: zimní plášť, dojezdové kolo.[7]





























Obr.: 2 Příklad označení pneumatiky



Zdroj: [<https://www.testpneumatik.eu>]

- 1 – „245“ – Označení šířky pneumatiky v milimetrech.
- 2 – „40“ – Označení výšky profilu pneumatiky, udává nám v procentech poměr výšky pneumatiky ku její šířce.
- 3 – „R“ – Značí typ konstrukce pneumatiky, ve většině případů se setkáváme právě s označením „R“, které značí radiální konstrukci. Druhou možností, méně častou, je „D“ pro diagonální pneumatiku.
- 4 – „18“ – Stanovuje průměr ráfku, na který je plášť určen. Hodnota je uvedena v palcích.
- 5 – „93W“ – Jedná se o označení zátěžového a rychlostního indexu, který nám stanovuje maximální přípustné zatížení na kolo a maximální povolenou rychlost. Konkrétní hodnoty, na které odkazují zkratky je možné dohledat v obrázku níže.

Obr.: 3 Tabulka zátěžových a rychlostních indexů

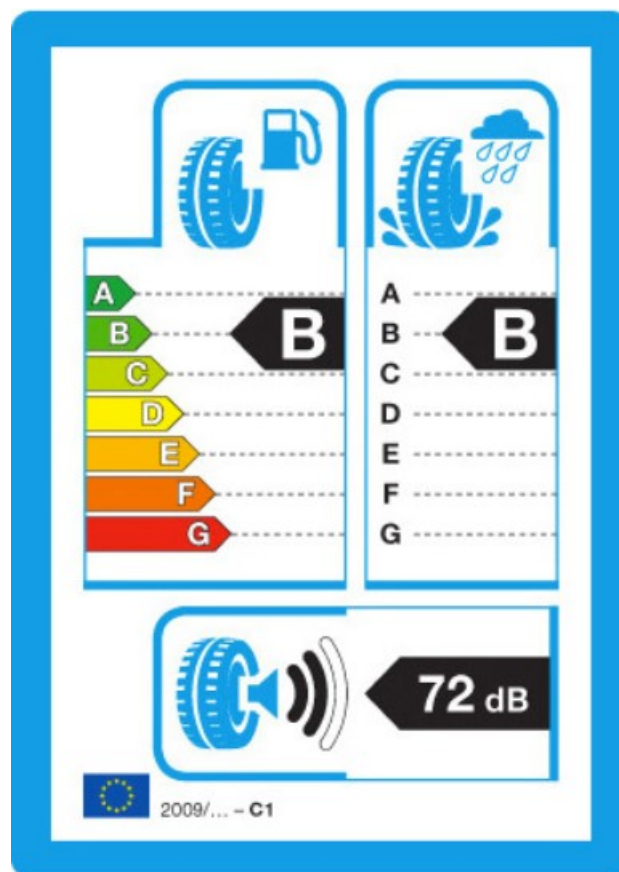
LOAD INDEX	lbs	kg	LOAD INDEX	lbs	kg		MAXIMUM SPEED	TYPE / VEHICLE TYPE
71	761	345	91	1356	615	L	 75 mph 120 km/h	 Off-Road & Light Truck Tires
72	783	355	92	1389	630	M	 81 mph 130 km/h	 Temporary Spare Tire
73	805	365	93	1433	650	N	 87 mph 140km/h	 Temporary Spare Tires
74	827	375	94	1477	670	Q	 99 mph 160 km/h	 Winter 4x4
75	853	387	95	1521	690	R	 106 mph 170 km/h	 Heavy Duty Light Truck
76	882	400	96	1565	710	S	 112 mph 180 km/h	 Family Sedans & Vans
77	908	412	97	1609	730	T	 118 mph 190 km/h	 Family Sedans & Vans
78	937	425	98	1653	750	U	 124 mph 200 km/h	 Sedans & Coupes
79	963	437	99	1709	775	H	 130 mph 210 km/h	 Sport Sedans & Coupes
80	992	450	100	1764	800	V	 149 mph 240 km/h	 Sports Cars
81	1019	462	101	1819	825	Z	 149+ mph 240+ km/h	 Sports Cars
82	1047	475	102	1874	850	W	 168 mph 270 km/h	 Exotic Sports Cars
83	1074	487	103	1929	875	Y	 186 mph 300 km/h	 Exotic Sports Cars
84	1102	500	104	1984	900	(Y)	 186+ mph 300+ km/h	 Exotic Sports Cars
85	1135	515	105	2039	925			
86	1168	530	106	2094	950			
87	1201	545	107	2149	975			
88	1235	560	108	2205	1000			
89	1279	580	109	2271	1030			
90	1323	600	110	2337	1060			

Zdroj: [michelin.ca]

- **6** – „Červená tečka“ – Určuje orientaci ventilku.
- **7** – „Treadwear 200“ – Udává míru opotřebení pneumatiky vůči referenčnímu typu po ujetí 11 600 km. Neudává přesný údaj životnosti v kilometrech, ale v procentech. Podle uvedeného údaje tento typ pneumatiky vydrží 2x déle než pneumatika referenční.[8]
- **8** – „A“ – Značení trakce, tento údaj hodnotí schopnost pneumatiky zastavit na mokru.
- **9** – „A“ – Teplotní index, udává rychlost, kdy je ještě pneumatika schopna vyrovnávat se se vznikajícím teplem
- **10** – „M+S“ – Mud and Snow, tato zkratka nám říká, že pneumatika má vzorek umožňující provoz po kluzkém povrchu.
- **11** – „Sněhová vločka“ – Symbol pro označení zimních pneumatik.
- **12** – „MO“ – Toto označení vypovídá o tom, že pneumatiky byly součástí originální výbavy vozu při koupi. MO označení je používané společností Mercedes.[8]
- **13** – Seznam materiálů použitých při výrobě.
- **14** – „DOT“ – Department of Transportation - Informace o původu pneumatiky. První série znaků udává továrnu, kde byla pneumatika vyrobena. Pro uživatele je však důležité poslední čtyřčíslí: 4807 – to nám říká, týden a rok výroby pneumatiky – 48. týden 2007.

Dle nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č.1222/2009 ze dne 25. listopadu 2009 musí být každá nově prodaná pneumatika vybavena energetickým štítkem. Jedná se o nálepku, na které jsou informace o palivové účinnosti pneumatik, přilnavosti za mokra a vnějším hluku při odvalování.[9] Snahou těchto štítků je donutit kupující k výběru úspornějších a tím více ekologicky přijatelnějších typů pneumatik a zároveň donutit výrobce inovovat své produkty.

Obr.: 4 Energetický štítek



Zdroj: [blackcircles.com]

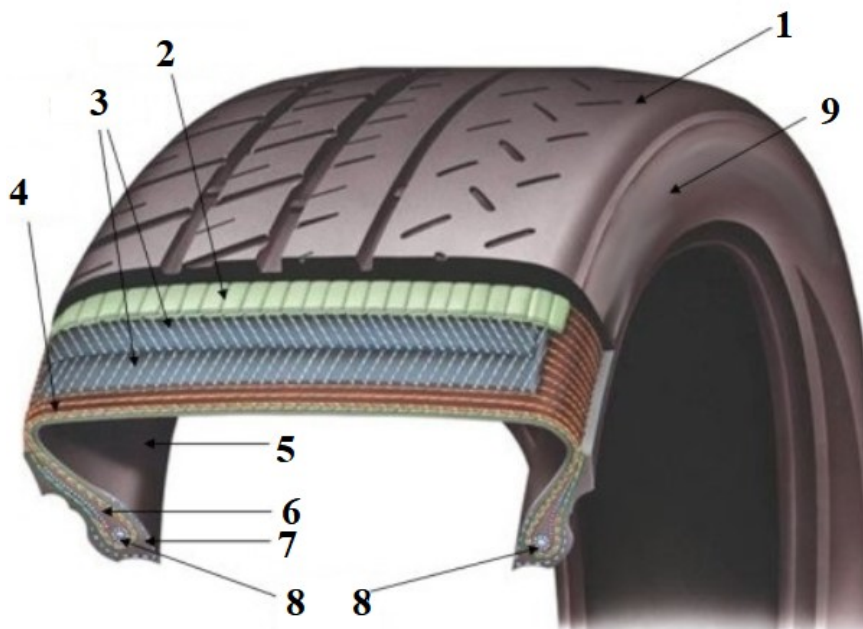
2.5 Konstrukce pneumatik

Konstrukce se významně liší v závislosti na oblasti použití. Jiná konstrukce je používána pro osobní automobily, jiná pro nákladní, terénní a sportovní automobily. Zejména stroje pro zemědělskou techniku a letadla se pak vyznačují složitější konstrukcí pneumatiky.[10] V praktické části diplomové práce byly zkoumány změny vlastností pneumatik pro osobní automobil, proto se budeme věnovat právě tomuto typu.

Jak bylo již dříve zmíněno, jedná se o kompozitní soustavu anizotropních vlastností, která musí plnit velice různorodé, často navzájem protichůdné požadavky. Pneumatika jako taková je standartně tvořena ze tří hlavních částí: pláště, duše a ochranné vložky. U moderních pneumatik však nalezneme již pouze dvě z těchto částí. Nové pneumatiky jsou vyráběny v bezdušovém provedení, kde funkci duše zastává sám plášť. Tyto pláště se skládají ze čtyř hlavních částí: koruny, ramena, boku a patky. Pláště jsou tvořeny soustavou tří komponent: pryž (80 – 85 %), různá vlákna (12 – 15 %) a ocelový kord (2 – 3 %).[11]

Obr.: 5 Konstrukční části pláště pneumatiky

1 - běhoun, 2 – polyamidový nárazník, 3 – ocelový nárazník, 4 – kostra, 5 – vnitřní vrstva pryže, 6 – jádro patky, 7 – patka, 8 – patní lanko, 9 - bočnice



Zdroj: [oponeo.co.uk]

2.5.1 Běhoun

Běhoun je vnější část pláště opatřená dezénem v přímém kontaktu s vozovkou. Jeho hlavním úkolem je přenášet hnací sílu vozidla na vozovku, zlepšovat adhezi k vozovce a snižovat brzdovou dráhu.[1] Konstrukce žebér a drážek má zásadní význam pro dynamiku pneumatik. Aby se předcházelo aquaplaningu, musí být drážky buď podélné nebo šikmé. Pokud jsou postranní drážky příčné, dochází ke zlepšení trakce.[12] Obecně je možné říci, že příčné drážky ovlivňují přenos hnací a brzdící síly, zatím co podélné drážky dodávají pneumatice boční

a směrovou stabilitu.[13] Rozestupem příčných drážek lze také ovlivnit zvukové emise pneumatik během valení.[12]

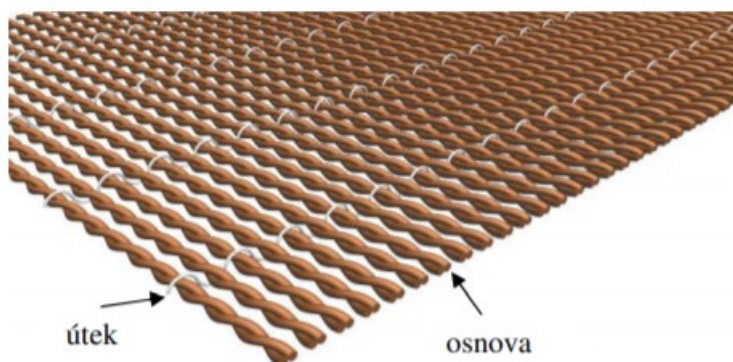
Pneumatiky pro silniční vozy vyžadují kompromis mezi životností a dynamickým výkonem. Je třeba počítat se silně měnícími se teplotními podmínkami, vodou na silnici, případně sněhem a ledem. U letních pneumatik se dosahuje poměru mezi drážkami a pryží 25 – 35 %, u zimních pneumatik je standardně tento poměr vyšší 35 – 45 %. Zvýšením poměru dezénu došlo u zimních pneumatik ke zlepšení záběrových vlastností.[12]

Nejdůležitější při návrhu běhounu je však zvolená směs, protože ta má nejvyšší dopad na životnost pneumatik. Základem této směsi je kaučuk, u osobních automobilů se používá ve významné míře kaučuk syntetický. Důležitou přísadou do kaučukové směsi jsou saze, které zvyšují její odolnost proti odírání. Dále jsou přidávána změkčovadla pro snazší zpracování směsi.[1] Pro kontrolu opotřebení je běhoun vybaven indikačními můstky opotřebení (TWI), tyto můstky jsou vysoké 1,6 mm. Při opotřebení na maximální povolenou míru dojde k souvislému příčnému propojení běhounu.[13]

2.5.2 Polyamidový a ocelový nárazník

Jedná se o část pláště tvořící přechod mezi běhounem a kostrou, obvykle se používá i více vrstev nárazníků tvořených z pogumovaného ocelového, polyamidového, aramidového či textilního kordu.[13] Kord je označení pro speciální tkaninu (ocelovou nebo textilní), která je tvořena osnovou a útkem, kde osnova je tvořena zápletem z vysoce pevné kordové příze. Útek je vyroben z bavlny nebo speciálního vlákna, jeho úkolem je pouze udržet tkaninu v předepsané hustotě před nanesením pryže.[14]

Obr.: 6 Kordová tkanina



Zdroj: [<https://pdfs.semanticscholar.org/df3b/c218b7ff84573fb1f6f437f7f8bbdb3973aa.pdf>]

Jednotlivé vrstvy nárazníků se vůči sobě vzájemně kříží, čímž vznikají výztužné trojúhelníky zlepšující dynamické vlastnosti pneumatiky.[13] Tyto vrstvy plní několik rozličných funkcí. Nutí kordy kostry, aby drželi požadovanou radiální polohu a tím zesilují pevnost celé pneumatiky. Pomáhají odvádět teplo z běhounu, tlumí rázy od vozovky a chrání pneumatiky proti proražení cizím tělesem.[12] U radiálních pneumatik výrazně zlepšují stabilitu běhounu v obvodovém směru omezením nežádoucího pohybu jednotlivých partií běhounu.[1] U diagonálních pneumatik je nárazník vyroben většinou ze stejného materiálu jako kostra (viskóзовé nebo polyamidové kordy) a je použito více vrstev než v případě pneumatik radiálních.[13]

2.5.3 Vnitřní vrstva pryže

Vnitřní vložka se obvykle vyrábí ze sloučeniny na bázi halobutylové pryže, tento polymer vytvrzuje rychleji ve srovnání s butylem a při procesu vulkanizace vyžaduje méně přídavných látek.[12] Hlavními výhodami halobutylové pryže jsou vynikající nepropustnost a dobré ohebné vlastnosti, které jsou důsledkem nízké úrovně nenasycení mezi dlouhými polyisobutylenovými segmenty.[15] Z vlastností této vrstvy pryže je zřejmé, že jejím primárním úkolem je zabránit úniku plynů do vrstev kostry nebo do nárazníků.[12]

2.5.4 Patka pneumatiky, jádro patky a patní lanko

Patka pneumatiky je zesílená část pláště dosedající do drážky v ráfku, k pevnému spojení dochází silou vyvozenou od tlakového vzduchu v pneumatice a pomocí tření patky o ráfek.[13] Je vytvořena ohnutím kordových vložek okolo patních lanek.[1] Patka musí přenášet veškeré síly působící mezi ráfkem a pláštěm pneumatiky. V případě bezdušového provedení pneumatik je nutné, aby patka mimo jiné zajišťovala i těsnost pláště a ráfku.[16]

Jádro patky je vyrobeno z nejtěžší směsi syntetického kaučuku. Úkolem této části patky je zajišťovat postupný přechod z oblasti patky do elastické oblasti bočnice. Zabezpečuje boční tuhost a přenos příčných sil. Aby nedocházelo k sesmýknutí pneumatiky z disku, je jádro vybaveno textilní nebo kordovou výztuží pro zvýšení ohybové tuhosti.[17]

Patní lanko je vyrobeno z vysoce kvalitní nerezové oceli nebo z kevlaru. Lanko je schopné nést až 1800 kg bez rizika přetržení.[16] U osobních automobilů je standardně použito jednoho lanka po každé straně. V případě speciálních pneumatik (nákladní, závodní) je užito dvou lanek, případně vícenásobného splétaného lanka.[13]

2.5.5 Bočnice

Bočnice je oblast pneumatiky tvořící přechod mezi běhounem a patkou. Pro její výrobu je nejčastěji užit přírodní kaučuk případně kaučuk polybutadienový. Jelikož tato část pneumatiky plní funkci ochrany kostry, musí dobře odolávat abrazi a povětrnostním vlivům. Z tohoto důvodu bývá směs obohacována o antioxidanty a antiozonanty.[12] Díky tomu nepodléhá tak snadno stárnutí a vydrží mnohonásobný ohyb.[17]

2.5.6 Kostra

Je to základní nosná část pneumatiky a určuje její budoucí vlastnosti. Tvoří ji vložky z pogumované kordové tkaniny. Pro výrobu kordových tkanin se standardně užívá rayon, polyester, skleněná, ocelová nebo aramidová vlákna.[13] Tyto kordová vlákna jsou uložena rovnoběžně vedle sebe a zalita do nevulkanizované pryže.[16] Každá pneumatika může mít i několik vrstev kostry. Jednotlivé vrstvy jsou poté ukotveny k patním lanům.[13]

Podle směru, jak jsou vlákna kostry vedena se jedná buď o pneumatiky radiální nebo diagonální konstrukce. V případě radiálních pneumatik jsou kordy vedeny od patky k patce pod úhlem 90° k obvodové středové ose pláště. K zajištění stability této konstrukce se používá vícevrstvý nárazníkový pás.[13] Kordové nitě nárazníků svírají s nitěmi kostry téměř pravý úhel.[1] Toto řešení má za následek oproti pneumatikám diagonálním zlepšení jízdních vlastností, lepší zachytávání bočních sil, lepší hodnoty adheze a menší opotřebení.[16] U pneumatik diagonálních jsou kordová lana vedena od patky k patce pod úhlem $30 - 40^\circ$ k obvodové středové ose. V konstrukci dochází ke křížení jednotlivých vložek.[13] Používá se sudý počet vrstev kordové tkaniny.[1]

2.6 Výroba pneumatik

Když se řekne pneumatika většina společnosti si představí výrobní proces, při kterém dochází k tvarování "černé hmoty". Ve skutečnosti se jedná o high tech kompozitní produkt, který se skládá z přibližně 15 komponentů. Výroba pneumatiky je proto složitý proces, začínající návrhem struktury a konstrukcí. Po této fázi musí projít pneumatika sérií zkoušek ve zkušebnách (zkoušky soudržnosti, plynupropustnosti, kilometrového výkonu) a v terénu (exploatační zkoušky). Teprve až po splnění všech těchto testů, může začít sériová výroba.[18]

2.6.1 Materiály použité při výrobě

Jak bylo řečeno již v předchozích kapitolách, k výrobě kostry a nárazníků se užívá syntetických materiálů nebo ocelových vláken. Běhoun a bok pláště je vyroben ze směsi přírodní a více než třiceti druhů syntetické pryže.[16] Poměry syntetické a přírodní pryže značně záleží na předpokládaném použití pneumatiky. U letních pneumatik se používá větší podíl pryže syntetické, která se vyznačuje větší hysterezí (schopnost tlumit deformační účinky).[1]

2.6.1.1 Kaučuková směs

Hlavní složkou kaučukové směsi je kaučuk syntetický i přírodní. Kaučuk lze definovat jako makromolekulární termoplastickou látku, která za působení vulkanizačních činidel (proces vulkanizace) přechází ze stavu plastického na stav elastický.[1] Kaučuk jako surovina je charakterizována mimořádně velkou tažností a vysokou elasticitou při nepatrné tvrdosti.[19] Aby finální směs dosáhla požadovaných vlastností je třeba do směsi přimíchávat i další přísady.[20]

- Přírodní kaučuk

Jedná se o produkt kaučukodárných stromů a keřů rostoucích v tropickém pásmu. Kaučuk je získáván nařezáváním kůry stromu (čepování) v podobě bílé tekutiny – latexu. Nejvhodnější pro výrobu kaučuku je Kaučukovník Brazílský.[1] Složení přírodního latexu není stálé, záleží na stáří stromu, počasí, ročním období a dalších podmínkách čepování. Průměrně se pohybuje kolem těchto hodnot: 35 % kaučukového uhlovodíku, 60 % vody, 2 % bílkovin, 2 % pryskyřice, 0,7 % anorganické látky, 0,3 % cukry.[21]

Během několika hodin stání přírodní latex samovolně koaguluje, proto je nutné jej konzervovat, nejčastěji se k tomuto účelu používá amoniak. Kvůli této vlastnosti se většina latexu zpracovává již na plantáži na běžné druhy kaučuku. To má mnoho pozitivních dopadů na vlastnosti produktů. Mnohé zpracovatelské postupy jsou levnější, odolnost výrobků vůči stárnutí je vyšší než v případě výroby z roztoků.[21]

Suchý kaučuk je možné z latexu získat vysrážením, vymrazením nebo odpařením vody. Na plantážích se suchý kaučuk vyrábí výhradně srážením kyselinou mravenčí nebo octovou. Vysrážené bloky se poté propírají vodou a dále zpracovávají na různé druhy přírodního kaučuku, z nichž nejvýznamnější jsou uzený kaučuk, světlá krepa a standardní kaučuk.[21]

- Syntetický kaučuk

Je již dnes nepostradatelná surovina v gumárenském průmyslu, hlavním důvodem je zejména omezená produkce přírodního kaučuku a to, že některé vlastnosti kaučuku syntetického převyšují vlastnosti kaučuku přírodního.[21] Syntetický kaučuk umožňuje klidnější a tišší jízdu. To je způsobeno vyšší hysterezí, což je schopnost tlumit deformace uvnitř své struktury.[16] Základní surovinou pro výrobu syntetických kaučuků je ropa. Nejpoužívanější typy syntetických kaučuků jsou:

- butadienstyrenový kaučuk – používaný zejména pro výrobu běhounové směsi
- butadienový kaučuk - zlepšuje fyzikálně-mechanické vlastnosti směsi
- izoprenový kaučuk - používá se ve všech částech pláště v kombinaci s přírodním kaučukem
- butylkaučuk - využívá se při výrobě membrán pro lisování pláštíů
- halobutylkaučuk – vyznačuje se vysokou odolností proti průniku vzduchu [20]

Na území České republiky se vyrábí syntetický kaučuk pod obchodním názvem Kralex, jedná se o butadienstyrenový kaučuk. Poměr kaučuků používaný u osobních vozů je 55 % syntetického kaučuku a 45 % kaučuku přírodního, u závodních pneumatik je tento poměr 65 % syntetické pryže a 35 % pryže přírodní.

- Přísady kaučukových směsí

- Vulkanizační činidla

Jsou to látky, které chemickou reakcí vytváří mezi řetězci kaučukového uhlovodíku příčné vazby. Nejvyužívanějším vulkanizačním činidlem je elementární síra. V gumárenském průmyslu se nejčastěji využívá přírodní mletá krystalická síra, jejíž molekuly jsou tvořeny osmičlennými kruhy S₈. Jako vulkanizační činidlo se současně se sírou používá selen nebo telur pro zlepšení odolnosti pryže proti zvýšené teplotě.[21]

- Urychlovače

Urychlovače jsou látky zvyšující rychlost sířování a účinnost vázání síry na makromolekuly kaučuku v podobě příčných vazeb. Přidáním urychlovače snížíme čas potřebný na vulkanizaci, potřebnou teplotu a obsah síry v kaučukové směsi.[22] Na trhu je v současnosti přes 100 druhů urychlovačů, podle rychlosti vulkanizace je můžeme klasifikovat do 4 skupin: pomalé (guanidiny), rychlé (thiazoly, sulfonamidy), velmi rychlé (thiuramsulfidy) a ultrarychlé (dithiokarbamáty, xantháty).[21]

- Retardéry

Zpomalují rychlost síťování v hlavní fázi vulkanizace a tím chrání směs před předčasným navulkanizováním při míchání nebo delším zpracování. Využívají se zejména u směsí obsahující vysoce aktivní vulkanizační přísady nebo urychlovače vulkanizace, jsou-li zpracovávány při vysokých teplotách.[22] Jedná se o látky kyselé, jako např. kyselina salicylová nebo anhydrid kyseliny ftalové.[4]

- Změkčovadla

Jedná se v porovnání s polymery o nízkomolekulární látky, většinou olejovité produkty rafinace ropy a některé vedlejší produkty ze zpracování uhelných dehtů. Tyto přísady musí mít schopnost pronikat mezi makromolekulární řetězce a oddělovat je od sebe. Z toho vyplývá že dané změkčovadlo se musí být pro daný polymer rozpouštědlem. Jejich úkolem je zlepšovat zpracovatelnost kaučukové směsi. Snižují tvrdost vulkanizátu a také teplotu skelného přechodu. Zároveň zlevňují výrobek, neboť se jedná o nejlevnější surovinu směsi.[21]

- Antioxidanty

Kaučuk, jako každý polymer podléhá oxidačnímu stárnutí. Za běžných teplot se toto stárnutí projeví až po velmi dlouhé době, za zvýšených teplot se však značně zrychluje. Látky zpomalující tepelně-oxidační stárnutí polymerů, dělíme do dvou skupin. Jsou to buď látky, které přerušují řetězovou autooxidační reakci a nebo látky, které zabraňují vzniku řetězové reakce.[21]

- Antiozonanty

Chrání pryž před degradačními účinky ozonu, který snadno reaguje s dvojnými vazbami makromolekulárního řetězce kaučukové sítě. Touto reakcí dochází na povrchu pryže ke vzniku velmi křehkého ozonidu, který při namáhání praskne a odhalí novou ještě nezdegradovanou pryž. Tento proces vyústí v neustále se zvětšující prasklinu. Antiozonanty reagují s ozonem ochotněji než řetězce kaučukové sítě, jsou schopny difundovat na povrch pryže a tím jej chránit.[21]

- Plniva

Většinou se jedná o tuhé látky v podobě prášku, krátkých vláken nebo v podobě granulátu. V gumárenském průmyslu je můžeme dělit na saze a světlá plniva. Plniva jsou

důležitou přísadou, kterou můžeme ovlivnit konečné vlastnosti výrobku. Správnou volbou kvality a množství plniva zlepšujeme mechanické vlastnosti (pevnost, odolnost vůči oděru, houževnatost, tuhost), odolnost vůči teplotě, korozi, stárnutí, vzhled. Výběr plniva nám také ovlivní cenu finálního produktu.[21]

2.6.1.2 Výztužné materiály

Ve výrobě pneumatik se běžně užívá výztužných vláken, která plní výztužnou a ochrannou funkci kostry, nárazníku a patky pláště pneumatiky. Mají významný dopad na funkční vlastnosti pneumatiky, zejména na bezpečnost, životnost pneumatiky a pohodlnost jízdy.[4] Výztužné materiály je možné dělit podle materiálu použitého při výrobě na dva základní druhy: textilní materiály a ocelové materiály. Mezi textilní materiály jsou řazeny kordové tkaniny a hybridní materiály, mezi ocelové patří ocelové kordy a dráty pro patní lana.[20]

Vlastnosti výsledného materiálu nejsou závislé pouze na vlastnostech jednotlivých složek. Významnou roli hraje způsob spojení kordů a pryže, které jsou už na první pohled značně různorodé látky. Výsledný kompozit je kombinací tuhosti a pevnosti vláken výztužných materiálů a pružnosti matrice, kterou je v případě pneumatik pryž.[17] V případě, že adheze mezi jednotlivými komponenty není dostatečná, dojde k tření mezi komponenty, které budou generovat teplo až do té meze, kdy dojde k destrukci pneumatiky.[3] Aby byla zajištěna správná soudržnost kordů s matricí, dochází k impregnaci kordových tkanin speciálními látkami, které zvyšují třecí koeficient mezi povrchy. V případě ocelových kordů se tyto látky přidávají přímo do směsi pryže.[17]

- Ocelový výztužný materiál

Nejčastěji je obsažen v patce a náraznicích radiálních pláštů. Pokud se ocelový kord nachází i v kostře, poté je pneumatika označována jako All Steel. Na ocelové výztužné materiály jsou kladeny požadavky zejména v podobě vysoké pevnosti a rozměrové stability, odolnosti vůči korozi, rozložení mezer mezi dráty, ohybové tuhosti a dobré adheze ke gumové směsi. Přímá vazba gumové směsi k většině kovů je slabá, proto se hojně upravují povrchy kordů pomosazením, pozinkováním nebo poměděním. V případě patních lanek jsou použity k výrobě dráty o průměru 0,89 mm jejichž povrch je ze stejného důvodu upraven pobronzováním nebo pomosazením. Minimální pevnost patních lanek v tahu dosahuje hodnoty 1900 MPa.[3]

- Textilní výztužný materiál

Podobně jako ocelové kordy dodávají plášti pevnost a rozměrovou stabilitu. Kordy z textilních materiálů jsou v porovnání s těmi ocelovými lehčí a deformovatelné ohybovým zatížením.[3] Nejčastěji využívané kordové tkaniny pro pneumatiky osobních automobilů jsou vyrobené z polyesterových, polyamidových a aramidových vláken. V případě speciálních, zejména závodních pneumatik se využívá karbonových kordů. U hybridních materiálů nalzáme kompromis vlastností ocelových a textilních kordů. Tyto kordy jsou tvořeny dvěma materiálově odlišnými nitěmi, které jsou spleteny v jeden celek. Hybridní materiály vznikly z požadavku na minimální protažitelnost a vysokou pevnost, ale zároveň zachování protažení textilních materiálů během výroby. Příkladem může být kombinace nylonových a aramidových vláken, kde nylon dodává schopnost protažení a aramid zajišťuje pevnost.[20]

2.6.2 Výrobní proces

Prvním krokem ve výrobě pneumatik je proces rafinace, který zahrnuje přidávání a míchání surového kaučuku s ostatními příměsemi podle požadovaných vlastností a předpokládaného použití pneumatiky.[23] Proces míchání bývá obvykle vícestupňový a používají se k němu speciální hnětací přístroje.[1]

Jakmile jsou získány požadované vlastnosti směsi pro daný polotvar během rafinace, následuje proces vytlačování.[23] Tento proces standardně probíhá ve dvou fázích. Během první fáze se směs ohřívá a homogenizuje ve šnekovém tubusu. Poté následuje vytlačení vytlačovací hlavou a šablonou, tím se získá pás pravidelné šířky a tloušťky. Po vychladnutí je nakonec tento pás rozsekán na díly požadované délky dle rozměru pláště. Tímto procesem se získávají polotovary pro výrobu bočnic a běhounu.[1]

Další krokem ve výrobě je proces válcování. Jedná se o proces, při kterém dochází k nanášení vrstvy pryže na povrch kordů. Kaučuk je nanášen a vyhlazován pomocí kontinuálně otáčejících se válců, mezi nimiž prochází pás kordů společně s pásy vzniklé směsi, tloušťka vrstvy je nastavena mezerou mezi válci.[23]

Oblast patky vzniká opakovaným nanášením vrstvy pryže určité tloušťky na ocelové lanka patky, tento proces se nazývá zpracování patek.[23]

Proces lisování (nebo také konfekce) je proces kompletovací, veškeré nezbytné komponenty jsou upevněny na konfekčním bubnu. Radiální pneumatiky musí projít procesem lisování ve dvou fázích, v prvním dochází k nalisování kostry, patky a bočnice. V sekundárním

tvarovacím lisu poté dojde k dokončení pneumatiky nalisováním běhounu s nárazníky. Výsledkem tohoto procesu je surový, nevulkanizovaný plášť.[23]

Následuje proces vulkanizace, před samotným zahájením je třeba surový plášť opatřit ochranou vrstvou vnějších a vnitřních roztoků (tzv. emulgace). Účelem těchto roztoků je separovat plášť od formy a membrány a zamezit povrchovým vadám.[18] Surový plášť je poté umístěn do formy, kde přívodem tepla a tlaku za přítomnosti vulkanizačního činidla dochází k transformaci kaučuku v pryž a tím pneumatika získává výsledný tvar a vlastnosti.[23] Proces vulkanizace je chemický děj, při němž vzniká struktura, v které jsou elastomerní řetězce pospojovány přes můstky tvořené atomy síry.[18]

Veškeré pláště jsou před výstupem z výroby podrobeny testu uniformity. Jedná se o vizuální výstupní kontrolu o několika krocích. Dále jsou pak vybírány náhodné kusy ze série, které jsou podrobeny důkladnějšímu testování. V první fázi se plášť nahustí na 0,4 MPa a provádí se kontrola boulí a propadlin. V druhé fázi se tlak sníží na 0,2 MPa a pneumatiky se přitlačí na pružně uložený válec vybavený snímači. Během rotace pneumatiky dochází k snímání síly, kterou pneumatika působí proti válci. Tato síla v průběhu měření kolísá, neboť plášť není ve všech svých částech stejně tuhý. Dále během této zkoušky dochází k hodnocení kolísání boční síly, ta je signalizací nesprávně umístěného nárazníku. Při podrobnějším testování vybraných vzorků dochází k rentgenovým zkouškám ocelových nárazníků a provádí se podrobnější vizuální kontrola. Důležitá je zejména vizuální kontrola řezu pláště, kdy se kontroluje správné uložení jednotlivých částí.[17]

3 Rozdělení pneumatik

Pneumatiky je možné dělit dle několika hledisek – podle typu vozidla, dle potřeby použití duše nebo podle typu pláště. Z hlediska pláště můžeme pneumatiky dělit do několika kategorií, kde nejdůležitější jsou:

- Konstrukční uspořádání kostry pláště a nárazníku
- Vzorek běhounu
- Použitý materiál kostry[3]

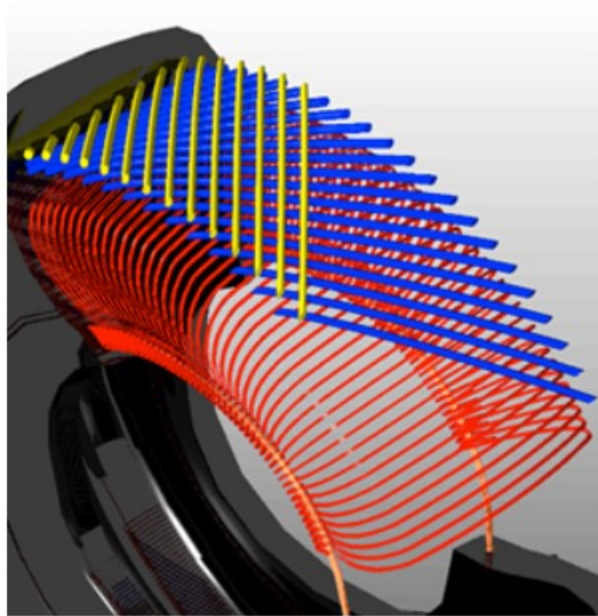
3.1 Konstrukční uspořádání kostry pláště a nárazníku

Dle konstrukčního uspořádání kostry a pláště nárazníku je možné rozdělit pneumatiky na tři základní typy:

3.1.1 Radiální pneumatiky

Plášť těchto pneumatik je tvořen kastrou, jejíž kordové vložky nejsou zkřížené, ale vedou od patky k patce co nejkratší cestou (svírají úhel 90° k obvodové středové ose pláště).[1] Tyto kordové vložky jsou pevně uchyceny k patce pláště.[1] Tato část kostry přenáší obvodové a radiální síly, její schopnost přenášet síly obvodové je však malá. Proto je tento typ doplněn o neroztažitelný pás, neboli nárazník. Nárazník je tvořen vlákny kříženými pod úhlem $15 - 25^\circ$. Boční stěny jsou měkčí, obvodový pás je v bočním směru ohybově tuhý. Oproti diagonálním pneumatikám mají menší odpor proti valení. Valivý odpor je způsobován podélným ohybem kordových vláken a pryže s nimi spojené v obvodovém pásu.[3] I v případě, že pneumatika není zatížena, dotýká se vozovky celou plochou. Při zatěžování roste styčná plocha pouze podélně. Bloky běhounu jsou přitisknuty k vozovce celou plochou, proto poskytuje tato pneumatiky lepší přilnavost.[24] Radiální pneumatiky vyžadují vyšší tlak vzduchu z důvodu slabších bočnic oproti diagonálním pneumatikám.[25]

Obr.: 7 Konstrukce radiální pneumatiky

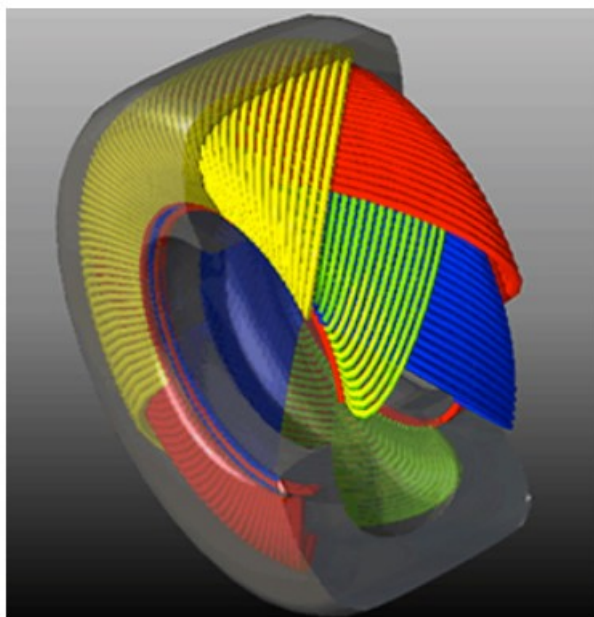


Zdroj: [<http://www.allardregister.org>]

3.1.2 Diagonální pneumatiky

Kordové nitě jednotlivých vložek se navzájem kříží a svírají úhel $30 - 40^\circ$ k obvodové středové ose. Používá se sudý počet vložek, vložky jsou přehnuty kolem patního lanka. Tím se dosáhne pevné kostry pneumatiky, jejíž vlákna přenáší obvodové i příčné síly přímo do patky pláště. Nad kordovou vrstvou jsou nárazníky tvořící přechodovou vrstvu mezi běhounem a kostrou, obvykle ze stejného materiálu, jakým je tvořena kostra.[1] Při zatížení pneumatiky se její deformací vlákna neprodlužují, ale posunují a namáhají pryž na stříh. Tímto jevem dochází ke vzniku energetických ztrát.[3] Při kontaktu s vozovkou v nezatíženém stavu se tento typ pneumatik vyznačuje elipsovitou dotykovou plochou. Při postupném zatěžování dochází k zakulacování dotykové plochy. Čím je zatížení vyšší, tím více jsou přitlačovány k vozovce krajní oblasti běhounu, zatímco střed běhounu je od vozovky oddalován. Tento jev má za následek ztrátu celkové přilnavosti při větších zatíženích vozidla. Vlivem bočních sil nesedí pneumatika s diagonální konstrukcí kvůli nepružnosti bočnic na zemi celou plochou. Jeden okraj běhounu je zmáčkнутý a druhý má tendenci se odlepit od země. Výsledkem je značná ztráta původního směru.[24]

Obr.: 8 Konstrukce diagonální pneumatiky

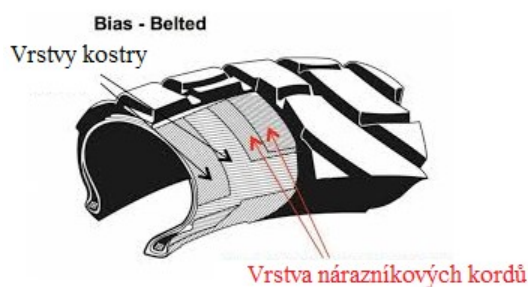


Zdroj: [<http://www.allardregister.org>]

3.1.3 Diagonální s nárazníkovým pásem

Neboli tzv. “bias belted“ jsou pneumatiky obdobné konstrukce jako pneumatiky diagonální. Kostra těchto pneumatik je tvořena vlákny vedoucími od patky k patce pod úhlem 30 - 40 ° k obvodové středové ose. Odlišnost od pneumatik diagonálních najdeme nad vrstvou kostry, kde se nachází dvě nebo více vrstev nárazníkových kordů uložených pod střídavým úhlem menším než 25 °. Tyto pneumatiky poskytují plynulejší jízdu a nižší valivý odpor v porovnání s pneumatikami diagonálními. Díky těmto vlastnostem se jedná o přechod k radiálním pneumatikám. V současné době se tyto pneumatiky využívají mezi sběrateli klasických automobilů, u pickupů a SUV.[26]

Obr.: 9 Diagonální pneumatiky s nárazníkovými pásy



Zdroj: [cyclenews.com]

3.2 Vzorek běhounu

Dle vzorku běhounu je možné pneumatiky rozdělit na 3 základní typy, a to na pneumatiky letní, zimní a případně celoroční. To, zda je pneumatika letní či zimní neovlivňuje pouze tvar a hloubka dezénu, ale také velice významný rozdíl ve složení směsi.[3] Jak tomu bylo i u jiných vlastností pneumatik, tak i při návrhu dezénu je třeba dělat kompromisy, zejména mezi hlučností, valivým odporem a ovladatelností.

3.2.1 Letní pneumatiky

Jsou standardně opatřeny mělkým žlábkováním nebo lamelováním. Tyto pneumatiky jsou vyráběny v blokovém nebo páskovém provedení dezénu, případně jejich kombinací. Blokovaný dezén zlepšuje odvod vody, zatímco páskový zajišťuje dobré vedení pneumatiky.[3] Letní pneumatiky poskytují lepší všestranný výkon během teplejších měsíců. To je způsobeno směsí, která je všeobecně tvrdší u letních pneumatik, než je tomu u pneumatik zimních. V teplejším období dochází vlivem teplot k měknutí směsi, které je kompenzováno právě původně tvrdou směsí. Při teplotách pod + 7 °C však dochází k rychlému tvrdnutí a zkřehnutí směsi letních pneumatik, při těchto teplotách začínají také ztrácet své původní vlastnosti. Díky této tvrdší směsi se letní pneumatiky vyznačují nižším třením a v důsledku toho nižší spotřebou paliva.[27]

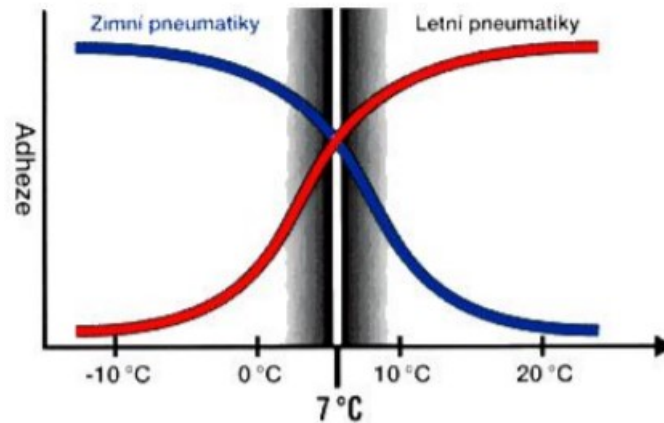
Obr.: 10 Páskový a blokovaný typ dezénu

1 - Continental SportContact 2; 2 – Dynapro AT2 RF11



Zdroj:1- [continental.com]; 2 - [m.hankooktire.com]

Obr.: 11 Vliv teploty na adhezi pneumatik



Zdroj: [http://www.autosklopm.cz/tr_rady_o_pneu.php]

3.2.2 Zimní pneumatiky

Během zimního provozu často není možné zabezpečit styk pneumatiky s vozovkou, proto jsou všechny zimní pneumatiky vybaveny speciálním jednosměrným dezénem s hlubokým profilem drážek.[16] Při aplikaci hlubokých drážek vznikají skuliny, kam může pronikat sníh, to má za následek zvýšení záběrové plochy běhounu. V případě uježděného sněhu je dále cílem těchto drážek sníh nabrat a udržet, ten pak přilne ke sněhu na vozovce viz. Obr.: 12. Kontakt sněhu se sněhem vytváří větší trakci než kontakt gumy a sněhu. Tato vlastnost má za úkol zajistit dobré brzdné a záběrové vlastnosti.[27] Směs zimních pneumatik oproti pneumatikám letním obsahuje vyšší podíl přírodního kaučuku a křemičitanových plniv, které udržují elastické vlastnosti gumové směsi i pod bodem mrazu.[3]

Obr.: 12 Zimní typ dezénu Bridgestone Blizzak DM-V2



Zdroj: [bridgestone.com]

3.2.3 Celoroční pneumatiky

Jedná se o kompromis obou předchozích typů, proto tento typ pneumatik zpravidla nedosahuje špičkových vlastností ani jednoho z nich. Hlavní nevýhodou je složení směsi běhounu, které se více podobá složení pneumatiky letní vybavené o hlubší drážkování.[16] V současné době se od používání tohoto typu pneumatik upouští, jedinou jejich zjevnou výhodou byla úspora nákladů a času na přezutí sezónních pneumatik. Tato výhoda je kompenzována řadou nevýhod jako je kratší kilometrová životnost, zvýšená spotřeba paliva během letního provozu a zhoršené jízdní vlastnosti.

4 Degradace pneumatik

V průběhu provozu pneumatiky dochází ke kombinovanému mechanicko - tepelnému zatížení. U kompozitních materiálů, jimiž jsou i pneumatiky, je třeba zohlednit heterogenitu struktury. Heterogenita struktury má významný vliv na rozvoj porušení pneumatiky v podobě zpomalování až zastavování šíření trhlin na hranici rozdílných materiálů. Specifická vlastnost degradace pneumatik je také rozdílná degradace mikrolokalit jednoho nebo více materiálů (pryž, kov, textilie), případně makrolokalit (oblast běhounu, ramene, bočnice a patky).[3]

Vzhledem k zaměření práce, která zkoumá změny vlastností vrstvy běhounu, je pro nás důležité pochopení degradačních vlivů daných prostředí právě na tuto vrstvu. Během provozu pneumatik dochází k tzv. korozi polymerů, jimiž je směs běhounu pneumatiky tvořena. Tuto korozi polymerů můžeme definovat jako nežádoucí změnu jejich chemického složení, odrážející se ve změně vlastností pneumatiky.[21]

4.1 Vliv teploty

Odolnost pneumatik proti tepelnému stárnutí je závislá na typu použitého kaučuku, složení směsi a stupni vulkanizace. Bez přístupu kyslíku snáší většina pryží teploty do 250 °C. Při působení vzdušného kyslíku dochází k degradaci již za mnohem nižších teplot. Z počátku termooxidace může docházet ke zlepšení některých původních vlastností (dodatečný vznik příčných vazeb). Poté však začne docházet k procesu křehnutí a ztrátě kaučukovitého charakteru pryže.[28]

Obr.: 13 Tabulka mezních teplot dlouhodobé použitelnosti nejpoužívanějších pryží při výrobě pneumatik

Pryže z přírodního kaučuku	70 °C
Pryže z <u>butadienstyrenového</u> kaučuku	80 °C
Pryže z butadienového kaučuku	80 °C
Pryže z butylkaučuku	100 °C až 140 °C

Zdroj: [21]

4.2 Vliv ozonu

Ozon se nachází v zemské atmosféře, proto je mu vystavena každá pneumatika během celého svého života. Vzniká v horních vrstvách atmosféry rozkladem kyslíku zářením o vlnové délce 110 nm až 290 nm. V přízemních vrstvách se obsah ozonu pohybuje od jedné do deseti miliontin procenta. Degradací působení ozonu spočívá v adování se na dvojně vazby makromolekulárních řetězců. Výsledkem této reakce je vznik křehkého ozonidu na povrchu pláště, který ochotně praská. Prasknutím dochází k odhalení nové plochy, kde může degradační proces pokračovat. Tento proces se poté opakuje až dojde k mechanickému rozrušení výrobku.[21]

4.3 Vliv slunečního záření

Degradaci polymerů způsobuje sluneční záření o vlnové délce 300 nm až 400 nm. Záření v tomto rozsahu je označováno jako ultrafialové a tvoří asi 5 % z veškerého slunečního záření dopadající na zemský povrch. Absorpcí energie ze slunečního záření dochází k aktivaci molekul. Takto aktivovaná molekula zahajuje fotochemickou reakci.[21] Nejjednodušší je štěpení polymerních řetězců, kdy působením ultrafialového záření dochází k porušení vazeb mezi dvěma atomy uhlíku. Tak vznikají z makromolekul makroradikály, které snáze reagují se vzdušným kyslíkem.[29] Jsou-li vzniklé makroradikály náchylné k disproportionaci nebo terminaci vzdušným kyslíkem, dochází k štěpné reakci. Jsou-li náchylnější k přenosu a terminaci rekombinací, převládají síťovací reakce v podobě příčného spojování řetězců polymeru.[21] Běžně polymery obsahují dvojně vazby v makromolekule, které se ne zcela spotřebovaly během procesu vulkanizace, proto je nutné chránit výrobky proti tomuto záření. Jako ochrana se využívá přísady, které nepropouští ultrafialové záření.[29]

4.4 Vliv kyslíku

Vzdušný kyslík, který oxiduje některé organické nízkomolekulární sloučeniny je schopen za vyšších teplot oxidovat i polymery podobného chemického složení. Na změnu fyzikálních vlastností polymerů má však mnohem vyšší nepříznivý účinek, jedná se zejména o nenasycené kaučuky. Mimo chemického složení hraje významnou roli v procesu degradace vliv difúze a rozpustnost kyslíku v polymeru.[21]

Přívodem energie (teplem, zářením) dochází k porušení vazeb mezi atomy uhlíků za vzniku makroradikálů. Jsou-li tyto makroradikály náchylnější k přenosu a terminaci, dojde

k reakci s kyslíkem za vzniku hydroperoxidu a k iniciaci autooxidační řetězové reakce.[21] V zoxidované oblasti se vytváří vrstvička s horší propustností kyslíku, která brání další oxidaci. Tato vrstvička, která vzniká reakcí plniv s kyslíkem, je tvrdší a křehčí než původní pryž. Při ohybu dojde k rozrušení vrstvy odlupováním v podobě šupinek a odhalení zatím nezoxidované části, kde může oxidační proces začít nanovo.[30]

4.5 Vliv vlhkosti

Vlhkost vyjma nabobtnávání nemá téměř žádný jiný vliv na změnu vlastností. V procesu degradace hraje roli nepřímo, kdy za provozu napomáhá odstraňování zoxidovaných šupinek z povrchu pláště a tím odhaluje části pneumatiky, kde může dále probíhat oxidace.[30]

4.6 Vliv chemických činidel

Polymery se vyznačují velkou molekulární hmotností a velkými molekulami, proto je jejich odolnost vůči degradačnímu prostředí vyšší. Díky nepolárnímu charakteru kaučuků, z kterých je pneumatika vyráběna dochází k relativně snadnému rozpouštění v alifatických a aromatických uhlovodících (benzin, toluen). Působení chemického činidla probíhá běžně v pěti fázích: sorpce média na povrchu polymeru, difúze média do polymeru, interakce mezi polymerem a pronikajícím médiem (bobtnání, chemická interakce), difúze reakčních produktů z vnitřku polymeru na jeho povrch a difúze reakčních produktů z povrchu polymeru do okolí. Tyto kroky však v praxi mohou probíhat i současně. Dochází-li pouze k difuzi, pak nastávají pouze zanedbatelné změny ve vzhledu a fyzikálních vlastnostech. Jestliže dochází k bobtnání, zvětšuje se objem a nastává s tím spojená změna fyzikálních vlastností polymeru. V případě chemické reakce mezi povrchem pneumatiky a degradantem dochází ke změně fyzikálních vlastností, vzhledu a rozměrů povrchu i změně chemického složení degradantu. Během procesu degradace může dojít k vymývání některých součástí polymerního materiálu (např. změkčovadel, stabilizátorů), změkčovadla zlepšují zpracovatelnost během výroby a jejich vymytím dochází k tvrdnutí směsi. Zvyšování teploty značně urychluje proces degradace, rychlost degradace roste exponenciálně s teplotou.[19]

Pneumatiky se skládají z kombinace přírodních a syntetických kaučuků, sazí a dalších chemikálií, kde každá složka může reagovat s daným kontaminantem jiným způsobem. V heterogenitě složení spočívá hlavní nevýhoda. V případě, že dojde k narušení spojení jednotlivých vrstev může dojít k separaci jednotlivých vrstev během jejich namáhání za provozu. Protože je pneumatika složena z heterogenních částí, působí na ni nežádoucím vlivem

mnohem větší spektrum chemických činidel. Mezi nejčastější, se kterými přijde pneumatika do styku můžou patřit různé ropné produkty, nemrznoucí směs nebo i vodný roztok soli. Alespoň jednomu z těchto činidel je pneumatiky vystavena téměř pokaždé během svého provozu na pozemních komunikacích. Během provozu dochází k nasátí chemických činidel pomocí kapilárních sil do vzorku pneumatiky. Z povrchu běhounu dojde k relativně snadnému odpaření činidla, zatímco v lamelách se odpařuje pomaleji a pneumatika tak zůstává vystavena jeho vlivu po delší dobu.[31]

4.7 Vliv mechanického namáhání

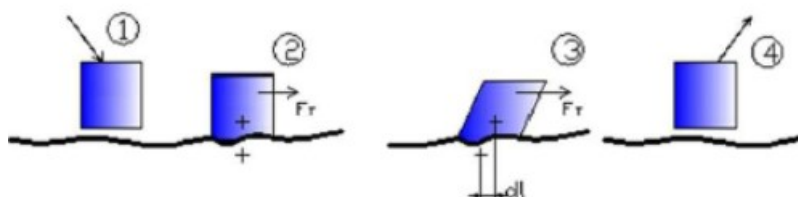
Je-li pneumatika současně vystavena mechanickému namáhání a chemickému činidlu či atmosféře, je korozní účinek vyšší. Při napětí klesá hodnota aktivační energie reakce, proto oxidace a ozonizace probíhá daleko snadněji a účinněji. Během namáhání dochází také ke vzniku mikrotrhlinek, které postupně rostou a zvyšují tak plochu vystavenou působení ostatních vlivů.[21]

5 Opotřebení pneumatik

Opotřebení pláště pneumatiky je proces, kterému bohužel není možné zcela zamezit, lze jej pouze do určité míry omezit vlastnostmi směsi a konstrukcí pneumatiky. Hlavním mechanismem opotřebení je mechanický oděr, který je možné ovlivňovat mechanickou pevností běhounové směsi. Běhoun je však vystaven okolnímu prostředí, které má za následek postupné zhoršování vlastností vedoucí ke zvýšenému opotřebení. Opotřebení plášťů způsobuje ročně značné ztráty pryže a patří mezi hlavní problémy gumárenského průmyslu.

Oděr při valivém pohybu pneumatiky vzniká zejména, když je obvodová rychlost kola vyšší než rychlost dopředná. Při kontaktu bloku běhounu s vozovkou (viz. obr.: 14 stav 2) dochází ke stavu, kdy vzniká soudržnost vlivem třecí síly.[32] Třecí síla je v tomto stavu vyšší než tečná napětí působící na daný pryžový element. Při další rotaci kola dochází k deformaci elementu pneumatiky. Část této deformační energie se ztratí vlivem hystereze pryže, větší část se však přemění na kombinaci bočních a podélných tangenciálních sil (FT) (viz. obr. 25 stav 3).[33] Adheze pryžového bloku k vozovce za tohoto stavu již nemůže existovat a dochází k vlečnému pohybu po povrchu vozovky. Právě tento pohyb je příčinou oděru při odvalování kola po vozovce.[32] Působením tangenciálních sil dochází ke generování třecí práce dle vztahu $FE = \int FT * dl$. [32] Z toho vyplývá, že směs s větší hysterezí by měla podléhat menšímu opotřebení.[33]

Obr.: 14 Průběh kontaktu části pneumatiky s vozovkou



Zdroj: [32]

Vzhledem k velkému množství proměnných, které ovlivňují opotřebení pneumatik dochází k značnému nesouladu hodnot získaných laboratorním měřením a měřením v reálném provozu. Za normálních podmínek na hladkých površích dochází především k únavovému opotřebení běhounu, zatímco se zvyšující se drsností vozovky nebo působením boční síly dochází ke zvýšení míry abrazivního opotřebení a řezného opotřebení. Únavové opotřebení

roste s klesající teplotou skelného přechodu a klesající koncentrací plniv. Ačkoliv by se mohlo zdát, že míra opotřebení bude vyšší v zimním období z důvodu vyšší drsnosti způsobenou vrstvou posypu, opak je pravdou. Míra opotřebení roste zejména se zvýšenou teplotou okolí, proto dochází k vyššímu opotřebení v letním období. Toto zvýšení opotřebení vlivem okolní teploty je tím vyšší, čím je nižší teplota skelného přechodu dané směsi. Odolnost směsi proti opotřebení záleží značně na druhu kaučuku a přísadách. V případě směsi z přírodního kaučuku se dosahuje vysoké odolnosti přidávkem sazí, u syntetických kaučuků se využívá sazí retortových. Do směsi je nutné přidávat změkčovadla pro zlepšení zpracovatelnosti, ty však snižují odolnost proti opotřebení, proto je nutné používat pouze nezbytně nutné množství.[34]

6 Cíle práce a metodika

6.1 Cíle práce

Cílem diplomové práce je v teoretické části shromáždit literární podklady o problematice týkající se konstrukce a materiálového složení pneumatik, včetně vlivu jednotlivých degračních procesů na povrchové vrstvy pneumatik při použití v praxi. Cílem praktické části je vyhodnocení vlastního výzkumu změny tvrdosti povrchové vrstvy běhounu a opotřebení pneumatik vlivem působení solného roztoku a tepelnou degradací v závislosti na čase působení. Cílem je zhodnotit současný stav materiálového řešení a schopnost pneumatik odolávat nepříznivým podmínkám.

6.2 Metodika

V této části práce jsou podrobně popsány vlastnosti zvoleného typu pneumatik, který byl testován, dále jsou zde popsány veškeré postupy a zařízení použité při zpracování pneumatik na jednotlivé vzorky. Je zde také detailně popsáno veškeré měřicí a testovací zařízení, které bylo během experimentu použito. Jsou zde charakterizována prostředí, ve kterých docházelo v průběhu experimentu k degradaci vzorků. Poslední část je zaměřena na použité statistické metody, pomocí kterých jsou interpretovány výsledky.

6.2.1 Testovaný typ pneumatik

Pro zpracování této diplomové práce byly zvoleny dvě shodné silniční automobilové pneumatiky společnosti Dunlop rozdílného stáří (DOT 0118 a 2315). Z každé z nich byly zhotoveny 4 vzorky pro měření tvrdosti a 36 vzorků pro zkoušku opotřebení.

Pneumatika Dunlop Sport Bluresponse 205/55 R16 94V

Jedná se o sportovní letní pneumatiky pro osobní automobil šířky 205 cm, radiální konstrukce, která umožňuje maximální rychlost 240 km/h a její nosnost činí 615 kg.[35] Pneumatika je vyrobena z nízkoteplotní polymerové směsi pro zlepšení přilnavosti a ovladatelnosti za mokra, současně dochází ke snížení valivého odporu. Pro zlepšení jízdních vlastností je dále u této pneumatiky využito multiprofilového běhounu, který má za efekt lepší rozložení tlaku na kontaktní ploše vozovky. U pneumatiky je využito schopnosti uzavřené

ramenní drážky potlačovat emise hluku. Tato ramenní oblast je tvořena extrémně tuhými bloky, které zvyšují brzdny účinek. [36]

Obr.: 15 Dunlop Sport Bluresponse



Zdroj: [<http://ityre.com>]

6.2.2 Příprava vzorků

Pro potřeby diplomové práce byly použity dvě shodné pneumatiky s rozdílným datem výroby. Vzorky pro testování změny tvrdosti byly označeny jako A, B – DOT 2315, tzn. vyrobené ve 23. týdnu roku 2015 a vzorky C, D – DOT 0118 vyrobené v 1. týdnu roku 2018. Nejprve pomocí ruční úhlové brusky a řezného kotouče byly pneumatiky rozřezány na menší části (16 x 16 cm), aby bylo možné použít vodní paprsek, kam nebylo možné pneumatiku standardních rozměrů umístit. Použitím úhlové brusky však dochází k výraznému tepelnému ovlivnění oblasti okolo řezu, proto byla pneumatika řezána co nejšetrněji postupnými řezy s přestávkami, aby co nejvíce prochladla před provedením dalšího řezu. Nicméně i přes tato opatření dojde k teplotní degradaci oblasti řezu, proto je nutné zmíněnou oblast vynechat z měření. Na nůžkách pro stříhání plechu byly poté odštířeny bočnice, tento způsob oddělení byl zvolen tak, aby nedošlo k dalšímu teplotnímu ovlivnění krajových částic běhounu (tzv. ramen). Takto připravený vzorek byl finálním produktem pro měření tvrdosti.

Pro zkoušku opotřebení běhounu, tak aby odpovídala normě, bylo třeba vyříznout válcové vzorky o průměru 16 mm a minimální výšky 6 mm.[37] Výchozím materiálem pro výrobu těchto válečků byly již vyřezané části 16 x 16 cm s oddělenými bočnicemi. Stejně jako v případě přípravy vzorků pro měření tvrdosti je třeba při vytváření vzorků vynechat tepelně ovlivněné okrajové oblasti. K vyřezání vzorků na opotřebení bylo užito vodního paprsku, neboť nárazníková vrstva pneumatiky obsahovala mimo textilních kordů i kordy ocelové, které by nebylo možné překonat bez poškození dřívě zamýšlených razníků. Ukázalo se jako vhodné opatřit nádrž vodního paprsku sítí, tak aby zachytávala vzorky, které propadnou, neboť je není možné vylovit magnetem. Vypouštění a opětovné napouštění nádrže po každé sérii vzorků se jevilo jako časově neefektivní.

Vytvořené vzorky bylo třeba upravit nástavcem tak, aby je bylo možné uchytit do držáku přístroje na opotřebení pryžových materiálů. V našem případě byl zvolen nástavec v podobě válečků odlitých z epoxidové pryskyřice. Po vyjmutí epoxidových válečků z forem je nutné očistit povrch po obvodu tak, aby nedocházelo k zadrhávání v držáku a bylo umožněno snadné vyjmutí vzorků bez poškození. Pro připevnění vzorku k nástavci bylo zvoleno gelové vteřinové lepidlo PowerFlex společnosti Loctite. Před samotným lepením byly stykové plochy nástavce a vzorku zdrsňeny brusným papírem a následně očištěny stlačeným vzduchem a technickým benzinem. Povrch takto nastavených vzorků byl dále upraven na přístroji pro opotřebení gumy. Pokud by k tomu nedošlo docházelo by ze začátku pouze k bodovému styku plochy vzorku a válce zařízení (styk rovinné plochy s válcovou), touto úpravou se plocha vzorku přizpůsobí válci s brusným papírem a při zkoušce opotřebení již bude docházet ke styku na celé ploše vzorku. Tímto řešením jsme předešli zkreslení výsledků.

Použité zařízení:

- Úhlová bruska

Obr.: 16 Proces vytváření dílů 16x16 cm



Zdroj: Vlastní

- Nůžky na stříhání plechu

Obr.: 17 Odstříhávání bočnic



Zdroj: Vlastní

- Vodní paprsek

Toto řezací zařízení disponuje pracovní plochou o rozměrech 800 x 600 mm a umožňuje maximální řeznou rychlost až $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pod mřížkou pracovní plochy se nachází nádrž s vodou sloužící jako lapač zbytkové energie řezného paprsku a odpadního abraziva. Systém vodního paprsku je poháněn vodním čerpadlem AccuStream A-6030 o příkonu 22 kW a pracovním tlakem 500 – 3800 bar. Zařízení je vybaveno jednou řezací hlavicí A2, která umožňuje jak řezání pouze vodním paprskem, tak i s přidavkem abraziva. Účinnost řezné síly vodního paprsku lze korigovat vzdáleností od povrchy řezaného materiálu posunem řezné hlavy. Jako abrazivo byl použit Granát MESH 80, který je dávkován z násypky tlakovým vzduchem. Toto abrazivo je možné dávkovat až do hmotnosti $500 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$. Tlakový vzduch je produkován šroubovým kompresorem KAESER Aircenter SM9. Celé zařízení je ovládáno kontrolním systémem AW-CT 1515 TKX.[38]

Obr.: 18 CNC řezací stroj AWAC AW CT 0806



Zdroj: Vlastní

6.3 Degradáční prostředí

Pro výzkum zmn y tvrdosti a opotřebení běhounu pneumatiky byly zvoleny dvě degradační prostředí:

- 5% vodn  roztok NaCl
- Klimatick  komora

Tato prostředí by měla simulovat re ln  podmínky se kterými se během provozu můžeme setkat. Klimatick  komora napodobovala st rdání teplot během ro n ch období - v létě rozehr t  povrch vozovky mnohdy k teplotám až $70 \text{ }^\circ\text{C}$ a v zimě namrzlou vozovku s okolními teplotami pohybujícími se okolo $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Roztok NaCl se sna i simulovat pou it  roztoku

solanky na silnici během zimního provozu, který dosahuje běžně koncentrace 20 – 30 % NaCl, tento roztok se pak dále zředí rozpouštěním námrazy na silnici.

6.3.1 Roztok NaCl

Prvním degradačním prostředím byl zvolen 5% vodný roztok chloridu sodného (NaCl). Jedná se o prostředí, se kterým se pneumatiky setkávají každoročně během provozu v zimním období. Během údržby silnic se používá v pevném stavu nebo jako solankový roztok (20 – 30 % NaCl). Chlorid sodný je endotermická látka, proto potřebuje vždy určitou externí teplotu, aby mohl začít komplexně účinkovat. Tato energie je standardně dodávána běžným silničním provozem nebo slunečním zářením.[39] Při aplikaci těchto posypů hrozí vážné riziko průniku látek do podzemních vod, kterému však v praxi nelze zabránit. Tato kamenitá sůl je v praxi nejpoužívanější z důvodu její nízké ceny, v porovnání s alternativami. Je však výrazně limitována teplotou použitelnosti do $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$.[40]

Mezi alternativy chloridu sodného patří chlorid vápenatý (CaCl_2) a chlorid hořečnatý (MgCl_2). Chlorid vápenatý je narozdíl od chloridu sodného účinný až do teploty $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, taktéž je exotermický, tzn. že tepelnou energii vydává a tím urychluje tavicí proces. V některých zemích se využívá této vlastnosti a při poklesu teplot pod $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k posypu kombinací NaCl a CaCl_2 . Cena chloridu vápenatého však dosahuje až šestinásobku ceny chloridu sodného. Z tohoto důvodu se používá spíše výjimečně.[39] Jednou z dalších nezanedbatelných nevýhod je korozivní vliv chloridu vápenatého na betonové konstrukce.[41] Chlorid hořečnatý lze použít při likvidačním posypu (prvotní rozpuštění vrstvy námrazy), při preventivním posypu se jeho použití nedoporučuje, neboť může snížit přilnavost pneumatik k vozovce.[39]

Pro potřeby diplomové práce byl připraven zkušební roztok o hmotnostní koncentraci 5 % rozpouštěním 158 g NaCl ve 3000 ml pitné vody.

6.3.2 Klimatická komora

Použité zařízení:

- Klimatická komora Binder MKF 240

K degradaci vzorků byla užita klimatická komora Binder MKF 240. Tato klimatická komora splňuje podmínky pro teplotní a klimatické zkušební normy vycházející z norem DIN a IEC. Požadovaných teplot a hodnot vlhkosti lze rychle dosáhnout a udržovat jejich konstantní hodnotu.[42] Komora umožňuje pohyb teplot v rozmezí od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti od 10 % do 98 %. Součástí komory je integrovaná nádrž zásobní vody na 20 l a

vyhříváné okno v předních dveřích, které umožňuje vizuální kontrolu vzorků. Komora je vybavena LCD displejem na předních dveřích, na kterém jsou zobrazovány aktuální hodnoty teploty, vlhkosti a času měření.

Hlavní předností je možnost vytvořit si vlastní program, který bude splňovat požadavky výzkumu. Je možné nahrát až 25 různých programů do paměti, ty je poté možné spouštět daným tlačítkem na LCD displeji. Hodnoty celého průběhu měření je možné načíst pomocí USB rozhraní. Komora vyžaduje napájení třífázovým zdrojem (400 V).[43]

Pro náš výzkum byl zvolen program, kde byly vzorky vystaveny po dobu 16 hodin teplotě $70 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ při relativní vlhkosti 90 %. Po uplynutí této doby došlo k procesu postupného ochlazování až na teplotu $-40 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, na této teplotě vzorky setrvaly po 3 hodiny.[44] Během celého procesu degradace docházelo k pravidelnému střídání teplot dle předchozího schématu.

Obr.: 19 Binder MKF 240



Zdroj: Vlastní

6.4 Metody měření

Měření probíhalo v dílnách technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze v pravidelných intervalech, vždy po 3 týdnech od předchozího měření. Během výzkumu bylo celkem provedeno 5 cyklů měření, to odpovídá 105 dnům vystavení vzorků degradačnímu

prostředí. V průběhu měření byly dodržovány konstantní podmínky, měření probíhalo při teplotách okolního prostředí 20 – 22 °C. Cílem výzkumu bylo stanovit změnu tvrdosti a opotřebení povrchové vrstvy běhounu v závislosti na době působení degradačního prostředí. Opotřebení vzorků bylo měřeno jejich vážením před zkouškou opotřebení a po zkoušce, tvrdost vzorků byla měřena dle metody Shore A.

6.4.1 Opotřebení

Nejdříve je třeba vyjmout vzorky z degradačního média, důkladně vysušit a očistit od případných zbytků. V případě vzorků z klimatické komory nechat aklimatizovat na teplotu okolí, tento proces trvá několik hodin v závislosti na velikosti vzorku a způsobu jeho aklimatizování. U vzorků z klimatické komory došlo k výrazně vyššímu stupni degradace lepeného spoje, než bylo předpokládáno. Veškeré tyto vzorky bylo nutné opětovně přilepit k epoxidovým nástavcům.

Před zahájením opotřebovacího procesu je nutné veškeré vzorky zvážit a tím stanovit výchozí hmotnost. Vážení každého vzorku bylo provedeno třikrát, aby se předcházelo chybám způsobenými měřeními. Samotné opotřebení se provádělo na přístroji pro opotřebení gumy – jedná se o hliníkový válec přes řemen poháněný elektromotorem, na hliníkový válec je pomocí oboustranné lepicí pásky nalepen brusný papír. Pro naše měření byl zvolen brusný papír Globus rekord 869 o hrubosti 220. Při lepení brusného papíru je nutné dodržet směr pohybu vzorku vůči brusnému papíru, tak jak je určeno na zadní straně plátna. Zkoušený vzorek je unášen v držáku, který koná vůči rotujícímu válci posuvný pohyb. Pro každý vzorek je nutné nalepit na válec nové plátno, s každým jeho dalším použitím dochází ke ztrátě původních vlastností a ovlivnění výsledků.[37]

Před finálním vážením je nutné očistit vzorek od zbytků, které ulpívají na povrchu a ovlivňovaly by konečnou hmotnost. Pro očištění od zbytků obroušené gumy byl zvolen stlačený vzduch. Každý ze vzorků byl znovu třikrát zvážen a naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulek. Konečná hodnota opotřebení je rovna původní hmotnosti zmenšené o hmotnost po obroušení vzorku.

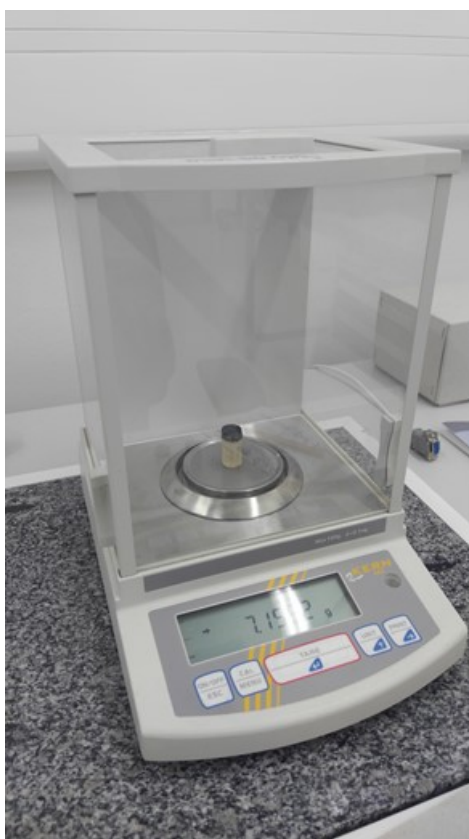
Zkouškou na opotřebení dojde k znehodnocení původního vzorku, není jej možné použít pro opětovné měření. S touto skutečností je třeba počítat zejména při výrobě vzorků a vytvořit několik kusů navíc, které mohou být použity v případě poškození vzorku při manipulaci nebo během procesu opotřebovávání.

Použité zařízení:

- Analytická váha Kern ABS 120

Pro vážení vzorků byla zvolena analytická váha s jednočlánkovým vážicím systémem. Ten zaručuje zejména stabilní chování při změnách teploty a krátkou dobu stabilizace. Váha umožňuje měření v rozsahu teplot od +10 °C do +30 °C. Maximální váživost váhy je 120 g, umožňuje přesné měření na 4 desetinná místa. Váha je vybavena LCD displejem a pracovním ochranným krytem, aby se zabránilo vstupu nečistot z okolí. Napájena je ze sítě a umožňuje výstup dat přes PC.[45]

Obr.: 20 Analytická váha Kern ABS 120



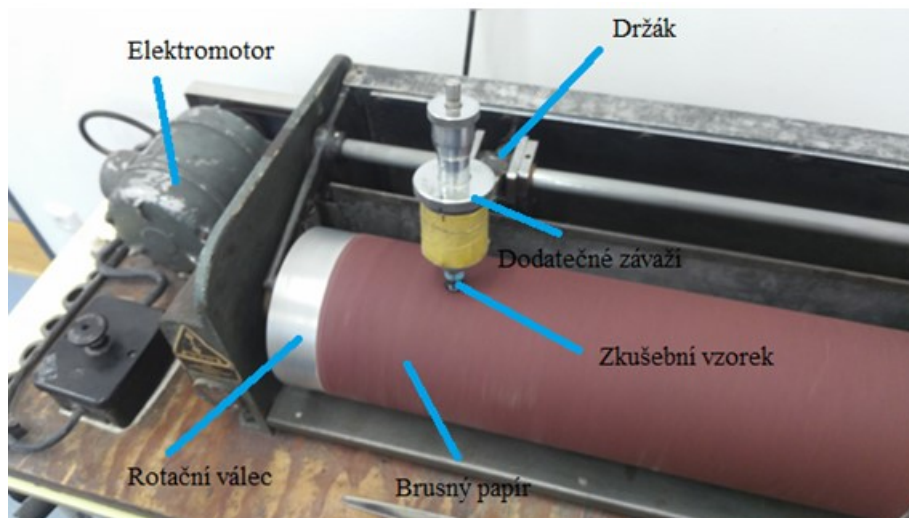
Zdroj: [Vlastní]

- Přístroj pro oděr gumy

Pro opotřebení vzorku bylo užito přístroje na oděr gumy podle normy ČSN 62 1466 s názvem „Pryž. Stanovení odolnosti proti odírání na přístroji s otáčivým bubnem.“ Zkušební zařízení se skládá z příčně pohyblivého držáku vzorku a otáčejícího bubnu průměru 150 mm na kterém je upevněn odírací prostředek. Délka bubnu má být 500 mm a otáčky 40 min⁻¹. Příčný posuv držáku má odpovídat 4,2 mm za jednu otáčku bubnu. Střední osa držáku musí mít ke kolmici ve směru rotace úhel 3 ° a má být přímo nad podélnou osou rotace bubnu. Zkušební

těleso má být přitlačováno silou 10 N, která bude vyvozena dodatečným závažím.[37] Během zkoušení urazí vzorek vzdálenost odpovídající odírací dráze délky 60 m. Během každé otáčky bubnu dojde k nadzvednutí držáku se vzorkem, který poté narazí na povrch válce s nalepeným brusným papírem. Použitá metoda odpovídá metodě abraze dvou těles s rázem, kde při rázu dochází k penetraci povrchu měkčího materiálu tvrdšími částicemi brusného papíru. Tyto tvrdší částice poté opotřebovávají vzorek u kterého dochází k úbytku hmoty.[46]

Obr.: 21 Příklad přístroje pro oděr gummy

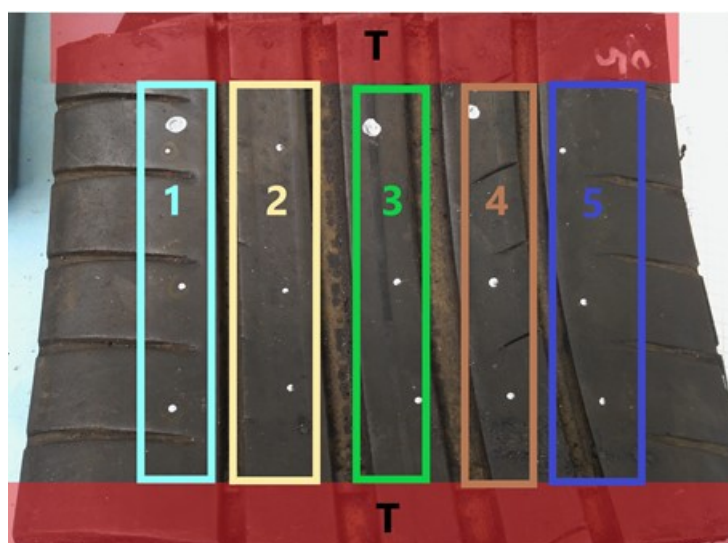


Zdroj: [Vlastní]

6.4.2 Tvrdost

Na základě známosti přibližné hodnoty tvrdosti měřeného materiálu a normy ČSN ISO 48-4:2019 s názvem „Přez, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tvrdosti - Část 4: Tvrdost metodou vlačování hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)“, byla pro měření tvrdosti zvolena metoda Shore A. Před zahájením samotného měření bylo třeba vzorky řádně připravit. Zejména vysušením a očištěním povrchu, aby nedošlo ke zkreslení vlivem nečistot na povrchu, nebo poškození přístrojů. V případě vzorků vyjmutých z klimatické komory bylo nutné před měřením vyčkat alespoň 4 hodiny, než došlo k ochlazení vzorků na teplotu okolního prostředí. Tím byly zajištěny stálé stejné podmínky měření. Měření probíhalo ve všech pěti sekcích běhounu, pro každou sekci byly měřeny hodnoty třikrát, tak aby došlo k vyloučení chyb měření.

Obr.: 22 Měřené oblasti běhounu



Zdroj: [Vlastní]

Při měření tvrdosti je nutné se vyvarovat teplotně degradované oblasti, která vznikla během příprav vzorků. Tato oblast byla po diskusi stanovena na šíři cca 2 cm, v obrázku výše (Obr.: 22 Měřené oblasti běhounu) je znázorněna červeným polem s písmenem T. Čísla 1-5 znázorňují jednotlivé měřené sekce a jejich značení.

U vzorků z klimatické komory došlo vlivem teplot k výrazné tvarové deformaci (zkroucení) dříve rovinných vzorků. To značně znesnadnilo měření tvrdosti přístrojem Bareiss HPE, který vyžaduje rovnou plochu a konstantní přítlak po dobu 3 vteřin.

Po naměření veškerých hodnot, byly hodnoty zaznamenány a vzorky vráceny do degradačních médií, ze kterých byly vyjmuty.

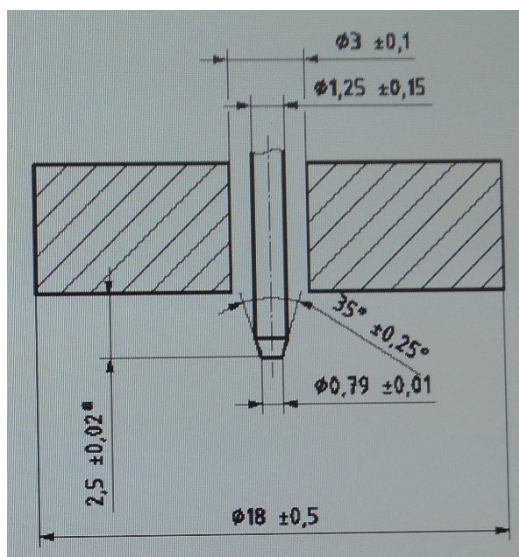
Použité zařízení:

- Tvrdoměr Bareiss HPE

Měřicí přístroj se řídí normou ČSN ISO 48-4:2019, která stanovuje určité parametry pro měřicí přístroje. Opěrná patka měřicího zařízení musí být průměru minimálně 18 mm. Indentor (zkušební hrot) musí být zhotoven z tyčinky kalené oceli o průměru 1,25 mm, která se na svém konci zužuje na průměr 0,79 mm pod úhlem 35 °. Musí být vybaven kalibrovanou pružinou, která vyvozuje sílu F na indentor dle rovnice: $F=550+75 \cdot H_A$ [mN], kde H_A je tvrdost odečtená z tvrdoměru typu A.[47]

Obr.: 23 Indentor tvrdoměru Shore A

Zobrazené vysunutí indentoru (2,5 mm) je platné pro tvrdost 0



Zdroj:[47]

Jedná se o ruční digitální tvrdoměr s jednořádkovým displejem použitelný k měření tvrdosti gum, elastomerů a plastů v rozmezí Shore A, B, 0, 00, D, C, D0. Lze použít pro měření rovinných ploch o minimálním průměru 35 mm tak, aby došlo k opření opěrné patky, a minimální šířce vzorku 6 mm. Tvrdost je měřena na stupnici 0 – 100 Shore, kde 0 odpovídá maximálnímu vysunutí indentoru 2,5 mm, hodnoty 100 je naopak dosaženo při nulovém vysunutí indentoru. Tvrdost lze měřit ve vodorovné i svislé poloze, pro vyšší přesnost měření lze přístroj vybavit stojánkem.[48]

Měření probíhá přitlačením tvrdoměru ke vzorku po dobu tří vteřin, po uplynutí této doby se ozve zvukový signál a naměřená hodnota zůstane uložena na displeji. K jejímu vynulování dojde zahájením dalšího měření. Při měření je nutné zabezpečit konstantní kontakt s měřenou podložkou, v opačném případě dojde k naměření nesprávných hodnot tvrdosti, zpravidla nižších.[48]

Obr.: 24 Tvrdoměr Bareiss HPE



Zdroj: [<https://www.techrentals.com.au>]

6.5 Statistické vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty byly hodnoceny s využitím programu Statistica, pomocí funkce Anova F-testu. V případě platnosti nulové hypotézy H_0 ($p > 0,05$) není mezi testovanými soubory dat statisticky významný rozdíl. Hypotéza H_1 ($p < 0,05$) zamítá nulovou hypotézu a říká, že mezi testovanými soubory dat existuje významný rozdíl, nebo závislost mezi proměnnými.[49]

7 Hodnocení naměřených hodnot

V této kapitole jsou shrnuty veškeré naměřené hodnoty získané vlastním výzkumem opotřebení a změny tvrdosti jednotlivých vzorků. Hodnoty opotřebení jsou udávány v hmotnostním úbytku [g] opotřebované hmoty, tvrdost je uváděna v jednotkách tvrdosti Shore dle metody Shore A. Výsledné hodnoty jsou interpretovány pomocí tabulek a grafů. Pro statistické zpracování hodnot bylo využito programu Excel a Statistica. Druhy zvolených degradační prostředí byly blíže popsány v kapitole 2.3, typ testované pneumatiky je popsán v kapitole 2.2.1. Hodnoty jsou v tabulkách uvedeny aritmetickým průměrem se směrodatnou odchylkou.

Použité vzorce:

- Aritmetický průměr: $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$

Kde: $x_1 + x_2 + \dots + x_n$ odpovídá hodnotám měření

n je počet měření

- Směrodatná odchylka: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$

Kde: x_i odpovídá hodnotám měření

\bar{x} je aritmetický průměr

n je počet měření

7.1 Změna tvrdosti povrchové vrstvy

V této kapitole jsou pomocí grafů a tabulek zaznamenány veškeré naměřené hodnoty tvrdosti. Vzorky byly vždy umístěny v degradačním médiu po dobu 3 týdnů. Po uplynutí tohoto intervalu došlo k vyjmutí vzorků a naměření hodnot. Vzorky byly poté navráceny zpět do původního média, kde byly ponechány do doby dalšího měření.

7.1.1 Vliv 5% roztoku NaCl

V následující tabulce 1 jsou aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou shrnuty změny hodnot tvrdosti měřené metodou shore A pro vzorky A a B (r. v. 2015) uložené v 5% roztoku NaCl. Tyto naměřené hodnoty jsou poté zobrazeny v grafech 1 až 6. Graf 1 a 4 je vytvořen pomocí programu Microsoft excel a slouží pro lepší zobrazení průběhu vývoje tvrdosti vzorku v závislosti na počtu proběhlých cyklů. Graf 2 a 5 je obdobou předchozích grafů vytvořených v excelu. Jedná se však již o boxplot grafy vytvořené pomocí programu Statistica,

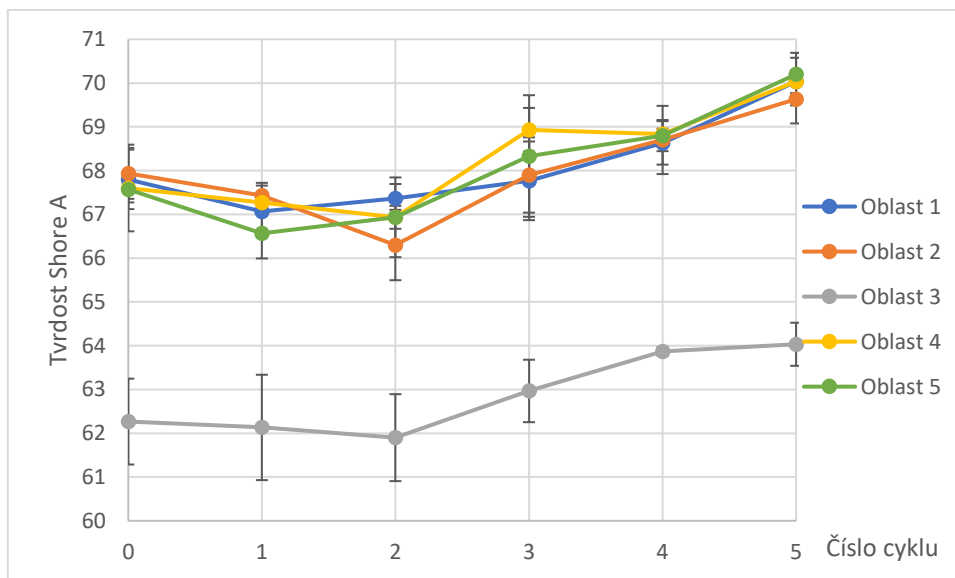
zobrazující průměr, medián a směrodatnou odchylku naměřeného souboru hodnot. Dále je pomocí Anova F-testu statisticky hodnocena závislost mezi proměnnými. Grafy 3 a 6 jsou boxplot grafy vytvořeny v programu Statistica, u nichž je hodnocena závislost tvrdosti na měřené oblasti běhounu.

Tab.: 1 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků A a B (5% roztok NaCl)

	Cyklus	0	1	2	3	4	5
Vz. A	Oblast 1	68,6±0,68	66,4±0,59	67,2±0,33	68,5±0,90	69,1±0,50	70,2±0,26
	Oblast 2	67,9±0,66	67,4±0,29	66,3±0,80	67,9±0,86	68,7±0,78	69,6±0,56
	Oblast 3	62,3±0,98	62,1±1,20	61,9±0,99	63,0±0,71	63,9±0,09	64,0±0,49
	Oblast 4	67,6±0,24	67,3±0,21	66,9±0,26	68,9±0,50	68,8±0,12	70,0±0,54
	Oblast 5	67,6±0,95	66,6±0,57	66,9±0,91	68,3±1,39	68,8±0,36	70,2±0,49
Vz. B	Oblast 1	67,8±0,43	67,1±0,74	67,4±0,45	67,8±0,12	68,6±0,17	70,0±0,40
	Oblast 2	67,8±0,86	67,6±1,02	66,9±0,61	69,6±0,65	68,7±0,38	69,5±0,37
	Oblast 3	63,1±0,68	62,6±0,21	61,9±0,36	63,2±1,56	65,1±0,21	66,1±0,12
	Oblast 4	68,3±0,38	67,0±0,46	66,5±0,66	68,4±0,31	69,0±0,21	69,3±0,05
	Oblast 5	67,9±0,24	67,1±0,82	68,0±0,82	67,5±0,25	68,7±0,51	70,1±0,51

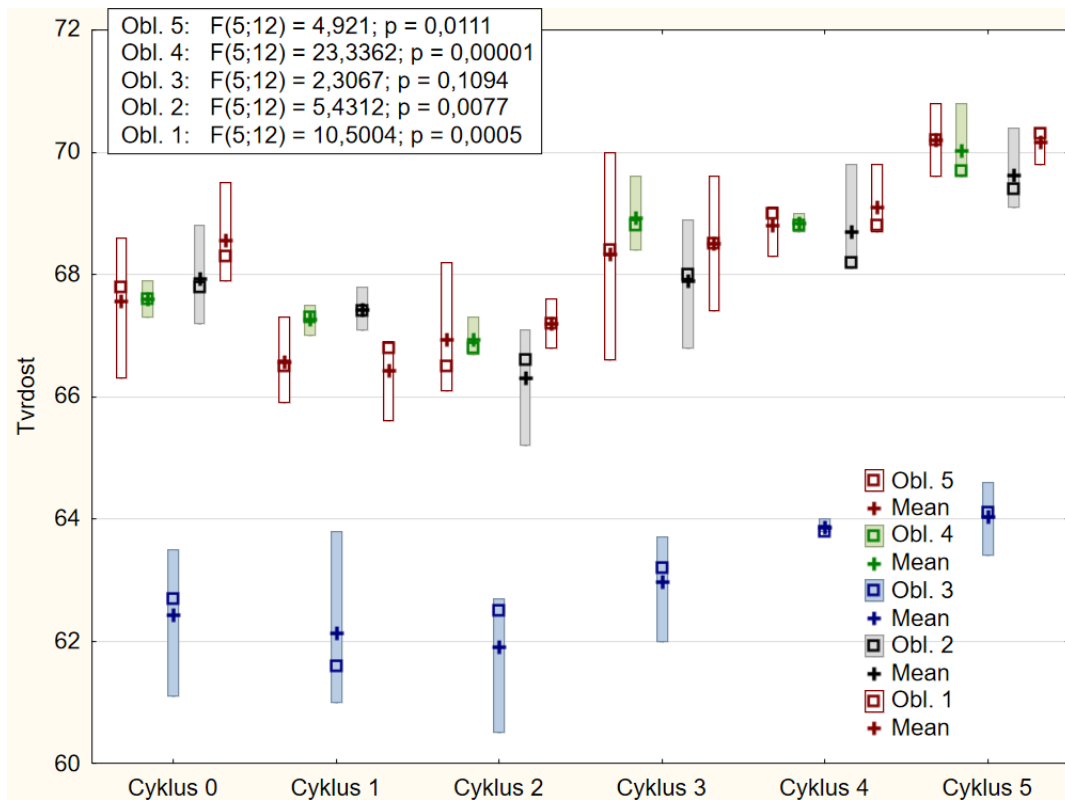
Zdroj: Vlastní

Graf: 1 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku A (5% roztok NaCl)



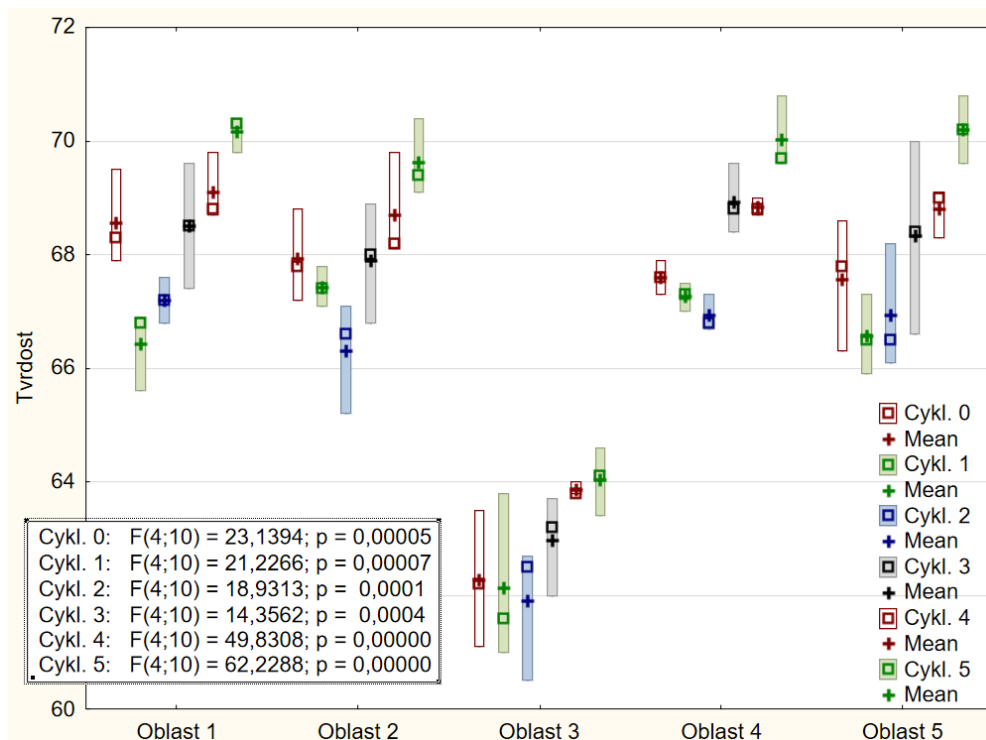
Zdroj: Vlastní

Graf: 2 Boxplot graf tvrdosti vz. A (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů



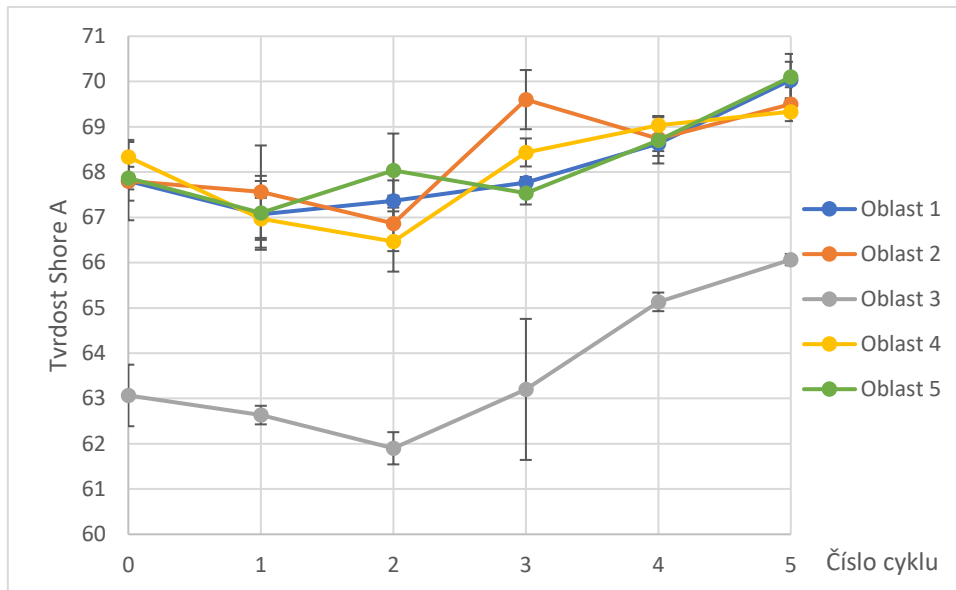
Zdroj: Vlastní

Graf: 3 Boxplot graf tvrdosti vz. A (5% roztok NaCl) v závislosti na oblasti měření



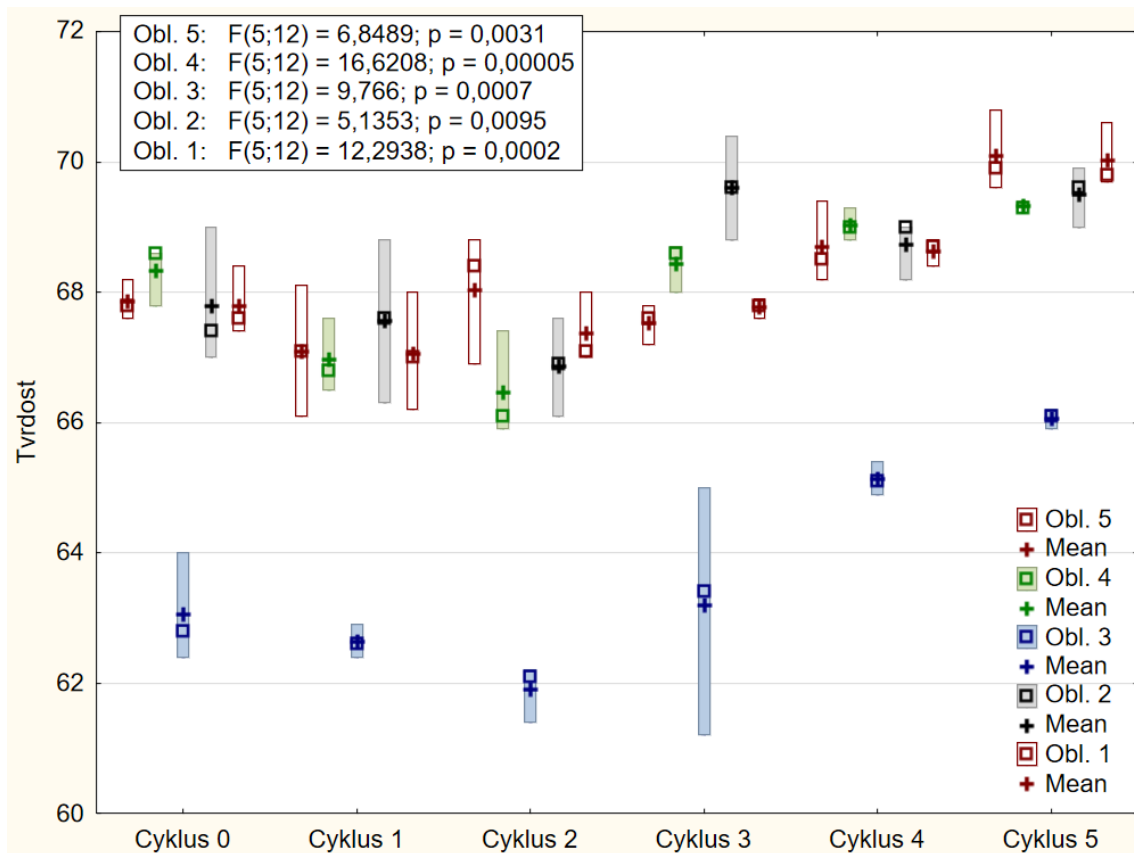
Zdroj: Vlastní

Graf: 4 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku B (5% roztok NaCl)



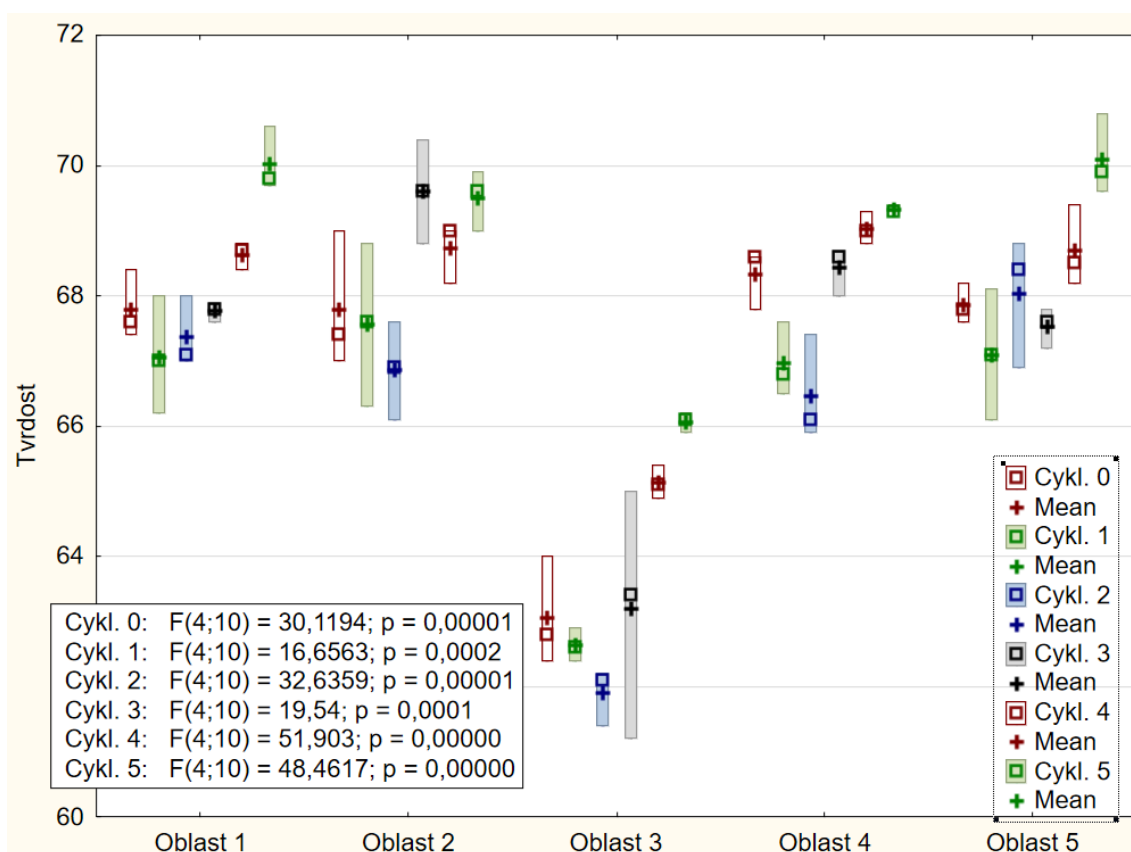
Zdroj: Vlastní

Graf: 5 Boxplot graf tvrdosti vz. B (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: Vlastní

Graf: 6 Boxplot graf tvrdosti vz. B (5% roztok NaCl) v závislosti na měřené oblasti



Zdroj: Vlastní

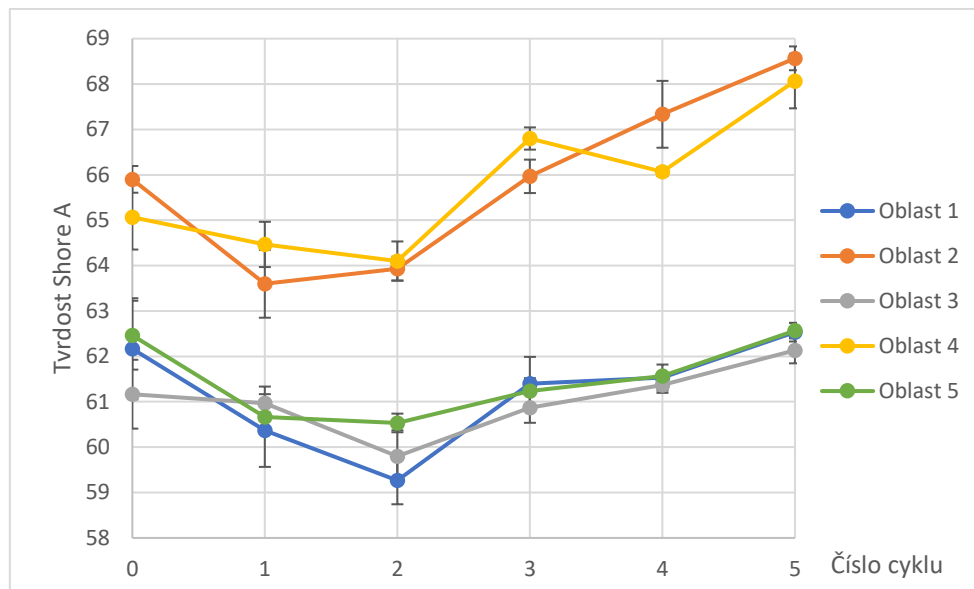
V tabulce 2 jsou obdobně jako v předchozí tabulce zaznamenány aritmetické průměry se směrodatnou odchylkou naměřených hodnot vzorků C a D (r. v. 2018) uložené v 5% roztoku NaCl. Naměřené hodnoty jsou poté zobrazeny v grafech 7, 8, 10 a 11. Grafy 9 a 12 zobrazují hodnoty v závislosti na měřené oblasti vzorku.

Tab.: 2 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků C a D (5% roztok NaCl)

	Cyklus	0	1	2	3	4	5
Vz. C	Oblast 1	62,2±1,11	60,4±0,80	59,3±0,52	61,4±0,59	61,5±0,29	62,5±0,21
	Oblast 2	65,9±0,29	63,6±0,75	63,9±0,26	66,0±0,37	67,3±0,74	68,6±0,26
	Oblast 3	61,2±0,76	61,0±0,37	59,8±0,57	60,9±0,33	61,4±0,17	62,1±0,29
	Oblast 4	65,1±0,71	64,5±0,50	64,1±0,43	66,8±0,24	66,1±0,09	68,1±0,60
	Oblast 5	62,5±0,76	60,7±0,09	60,5±0,21	61,2±0,29	61,6±0,05	62,6±0,17
Vz. D	Oblast 1	60,5±0,86	58,9±0,38	57,6±0,65	61,1±0,26	61,6±0,33	62,4±0,16
	Oblast 2	65,0±0,57	64,6±0,36	63,6±1,23	64,8±0,12	66,9±0,54	68,4±0,17
	Oblast 3	60,5±0,98	61,0±0,83	60,8±0,61	61,1±0,52	61,4±0,12	62,2±0,29
	Oblast 4	64,2±1,02	63,7±0,31	63,2±0,21	65,7±0,91	66,2±0,25	67,9±0,12
	Oblast 5	60,2±0,12	59,0±0,31	57,7±0,65	60,9±0,58	61,5±0,43	62,4±0,19

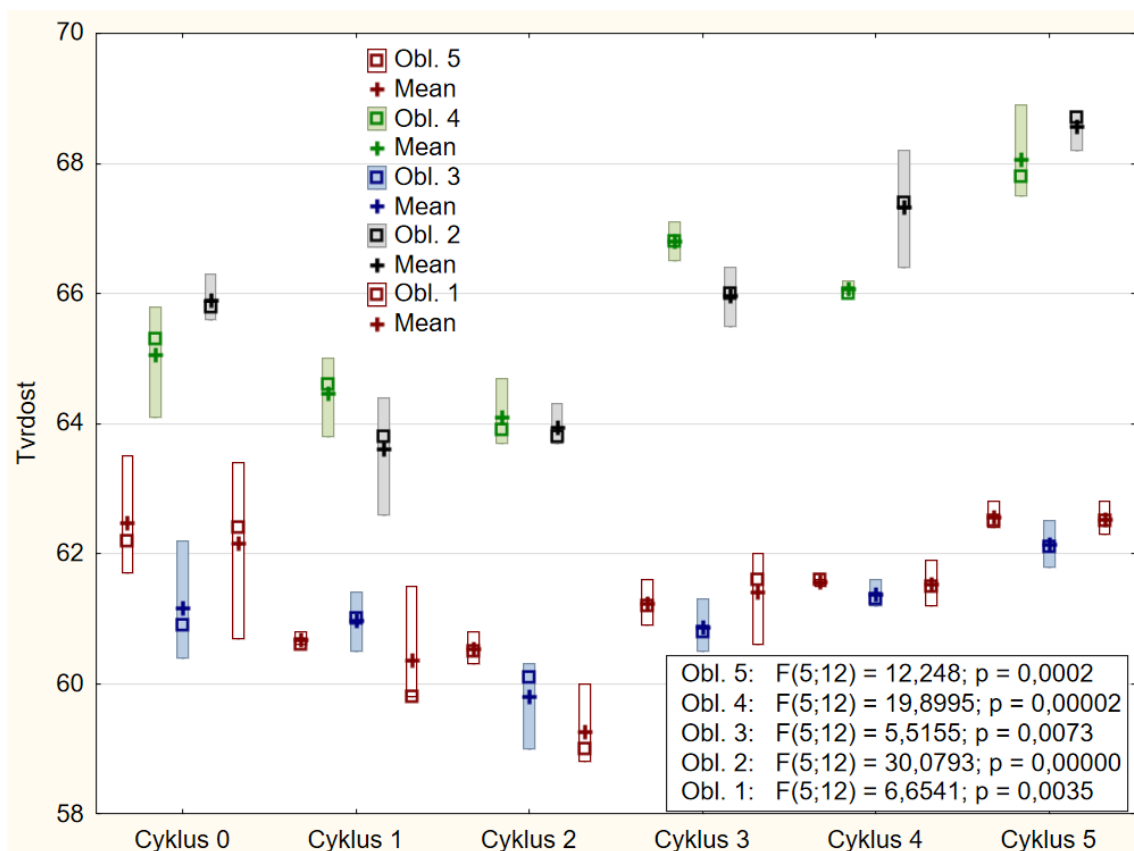
Zdroj: Vlastní

Graf: 7 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku C (5% roztok NaCl)



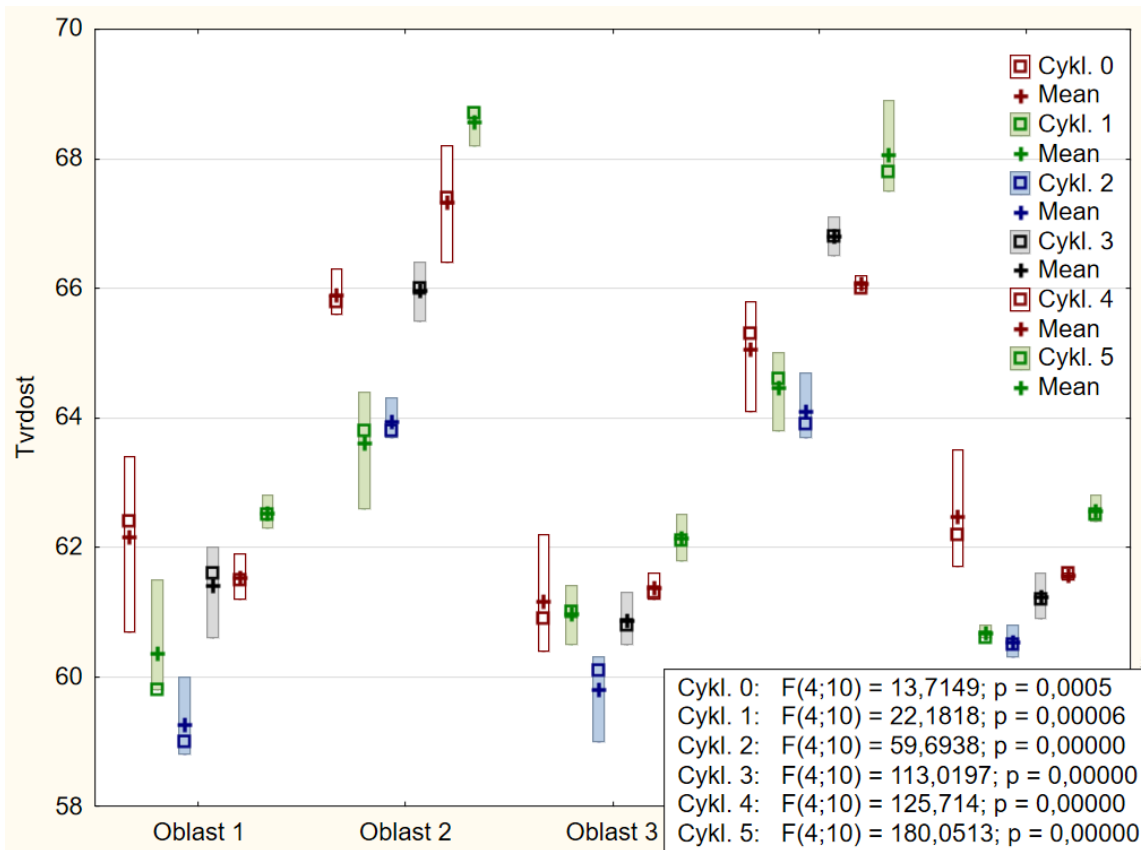
Zdroj: Vlastní

Graf: 8 Boxplot graf tvrdosti vz. C (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů



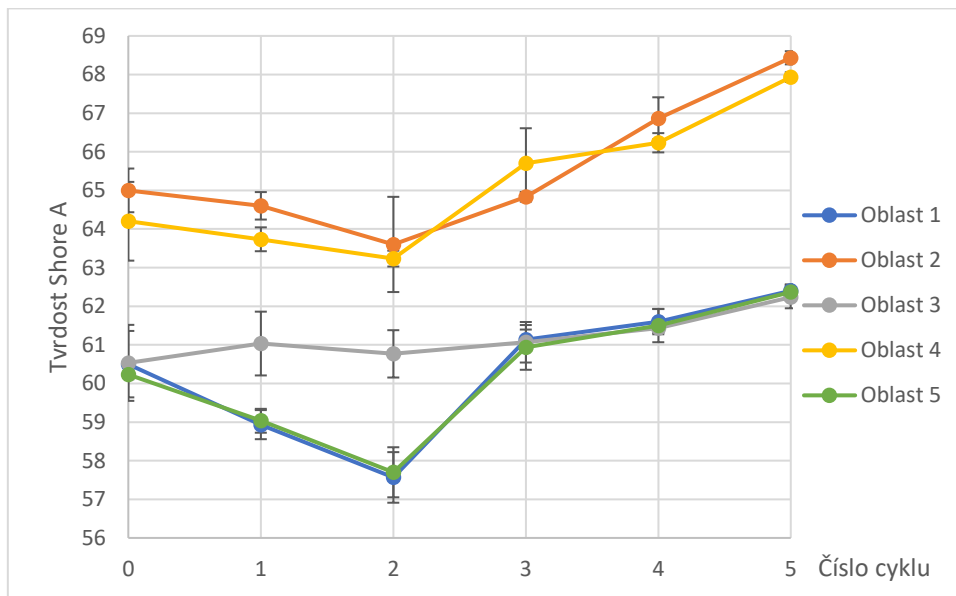
Zdroj: Vlastní

Graf: 9 Boxplot graf tvrdosti vz. C (5% roztok NaCl) v závislosti na oblasti měření



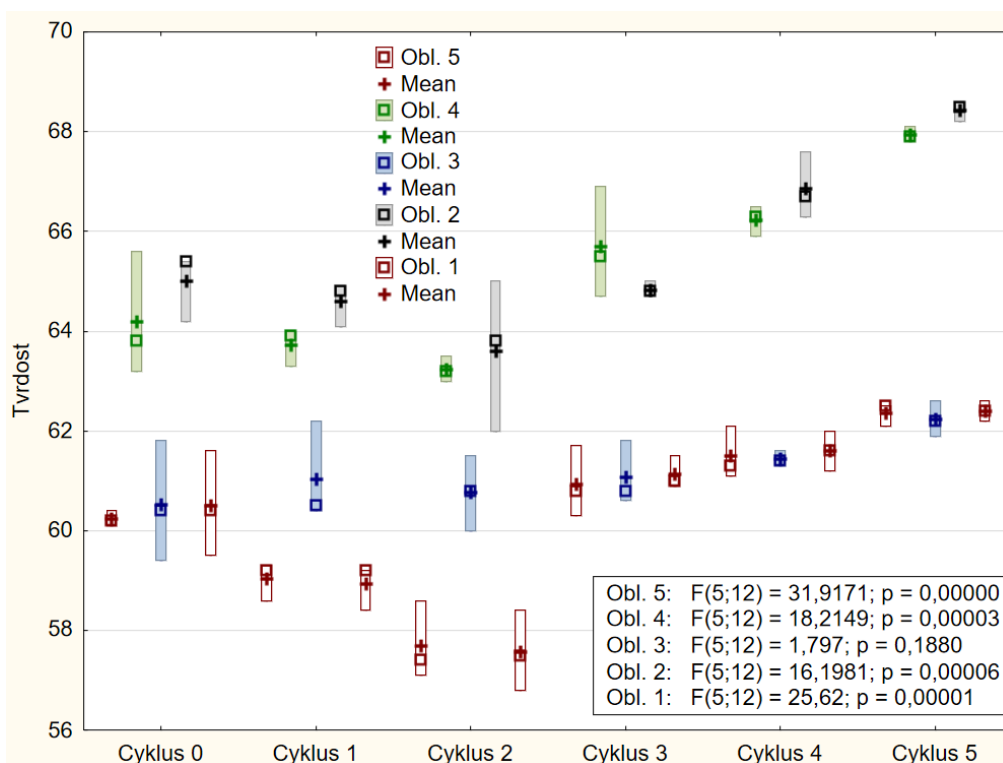
Zdroj: Vlastní

Graf: 10 (Excel) vývoje tvrdosti vzorku D (5% roztok NaCl)



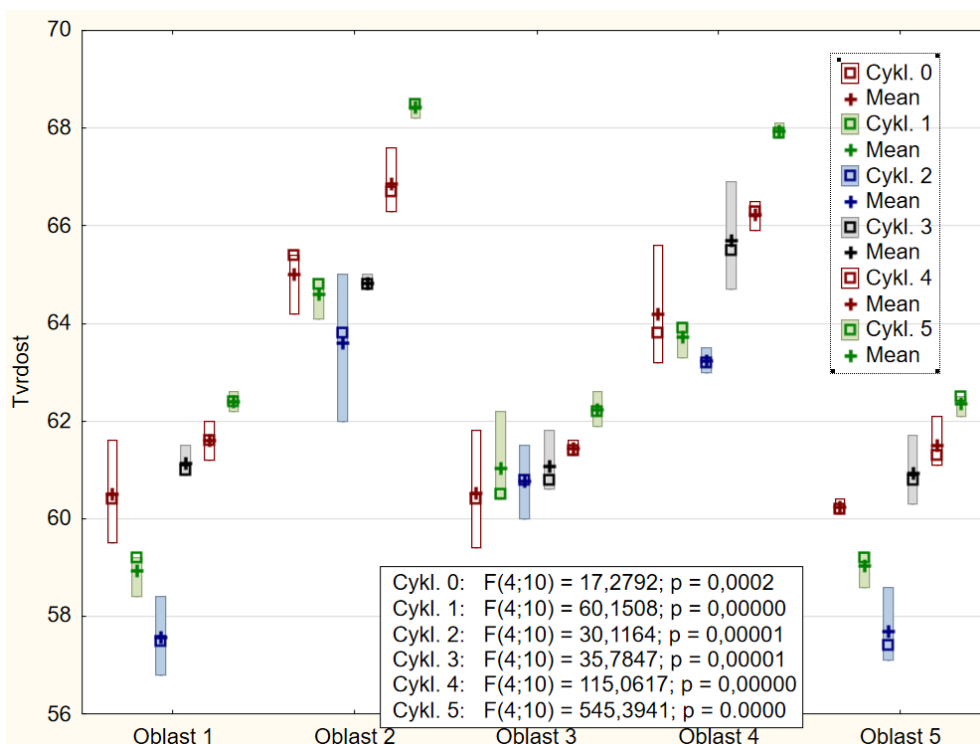
Zdroj: Vlastní

Graf: 11 Boxplot graf tvrdosti vz. D (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: Vlastní

Graf: 12 Boxplot graf tvrdosti vz. D (5% roztok NaCl) v závislosti na oblasti měření



Zdroj: Vlastní

U veškerých zkoušených vzorků byl patrný rozdíl mezi tvrdostí jednotlivých oblastí. Zejména střední část běhounu (oblast 3) se vyznačovala nižší tvrdostí oproti ostatním částem. Během prvních dvou cyklů došlo u všech vzorků ponořených v 5% roztoku NaCl k poklesu tvrdosti. Tento pokles tvrdosti dosahoval v průměru hodnoty 1,32 % původní tvrdosti vzorku pro vzorky A a B, pro vzorky C a D tento pokles tvrdosti byl vyšší a to 2,68 % původní tvrdosti. Tento pokles by mohl být částečně způsoben mírným nabobtnáním vzorku. S narůstající dobou setrvání vzorků v solném roztoku došlo k vymývání změkčovadel, které mělo za následek následné zvyšování tvrdosti vzorků.

Po uplynutí těchto dvou cyklů začala tvrdost vzorků lineárně narůstat. V případě vzorků A a B po uplynutí všech cyklů došlo k průměrnému navýšení tvrdosti o 3,05 %, v případě vzorku C byl průměrný nárůst tvrdosti 2,2 %, u vzorku D došlo k nejvyššímu zvýšení tvrdosti a to o 4,12 %. Tento pokles by mohl být částečně způsoben mírným nabobtnáním vzorku. S narůstající dobou v solném roztoku došlo k vymývání změkčovadel, které mělo za následek následné zvyšování tvrdosti vzorků.

Tab.: 3 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na počtu cyklů

p-parametr	Oblast	Vz. A	Vz. B	Vz. C	Vz. D
NaCl	1	0,01110	0,00310	0,00020	0,00000
	2	0,00001	0,00005	0,00002	0,00003
	3	0,10940	0,00070	0,00730	0,18800
	4	0,00770	0,00950	0,00000	0,00006
	5	0,00050	0,00020	0,00350	0,00001

Zdroj: Vlastní

Statistické testování naměřených hodnot v závislosti na počtu proběhlých cyklů degradace prokázalo statisticky významný rozdíl tvrdosti měřených vzorků. Jedinou výjimkou byly hodnoty střední oblasti vzorku (oblast 3) A a D, kde došlo k přijetí hypotézy H_0 ($p > 0,05$) - mezi daty není statisticky významný rozdíl a proto závislost na množství cyklů v tomto případě nebyla prokázána.

Tab.: 4 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na oblasti měření

p-parametr	Cyklus	Vz. A	Vz. B	Vz. C	Vz. D
NaCl	0	0,00005	0,00001	0,00050	0,00200
	1	0,00007	0,00020	0,00006	0,00000
	2	0,00010	0,00001	0,00000	0,00001
	3	0,00040	0,00010	0,00000	0,00001
	4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	5	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Zdroj: Vlastní

Při statistickém testu naměřených hodnot v závislosti na měřené oblasti, byl potvrzen velice významný ($p > 0,01$) rozdíl získaných hodnot u všech typů vzorků.

7.1.2 Vliv degradace klimatickou komorou

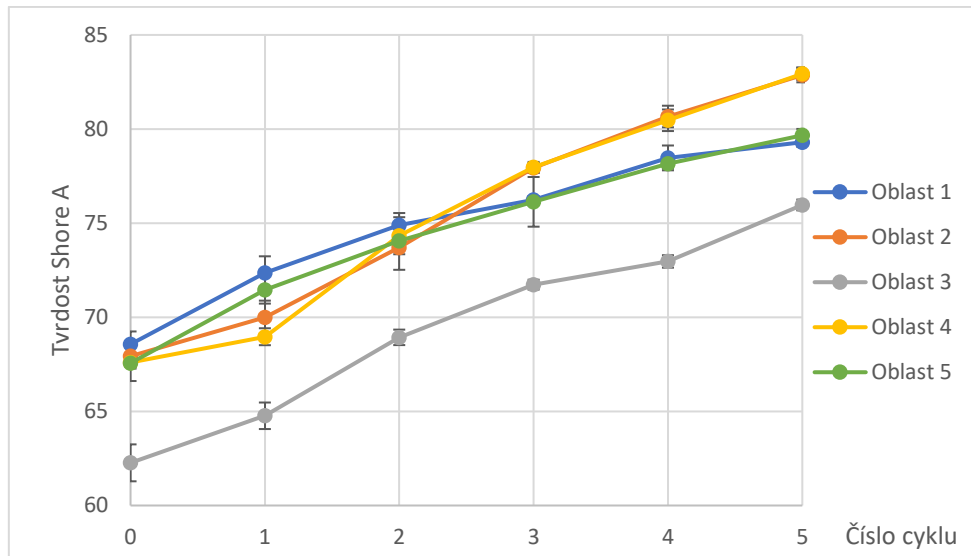
V následující tabulce 5 jsou aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou zaznamenány změny tvrdosti měřené metodou Shore A pro vzorky A a B (r. v. 2015) umístěné v klimatické komoře. Naměřené hodnoty jsou poté zobrazeny obdobně jako v předchozí kapitole v grafech 13 až 18.

Tab.: 5 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků A a B (klimatická komora)

	Cyklus	0	1	2	3	4	5
Vz. A	Oblast 1	68,6±0,68	72,4±0,87	74,9±0,64	76,2±0,21	78,5±0,66	79,3±0,24
	Oblast 2	67,9±0,66	70,0±0,88	73,7±1,18	77,9±0,26	80,7±0,57	82,9±0,39
	Oblast 3	62,3±0,98	64,8±0,70	68,9±0,41	71,7±0,26	73,0±0,33	76,0±0,29
	Oblast 4	67,6±0,24	69,0±0,45	74,3±0,98	78±0,29	80,5±0,57	82,9±0,34
	Oblast 5	67,6±0,95	71,5±0,74	74,1±0,19	76,1±1,32	78,2±0,26	79,7±0,34
Vz. B	Oblast 1	67,8±0,43	71,8±0,97	74,7±0,40	76,9±1,54	77,9±0,12	79,4±0,43
	Oblast 2	67,8±0,86	69,7±0,96	74,2±1,55	78,1±0,95	79,3±0,39	82,2±0,37
	Oblast 3	63,1±0,68	65,3±0,76	69,2±0,41	72,3±0,88	73,3±0,36	76,6±0,60
	Oblast 4	68,3±0,38	70,6±0,40	74,4±1,19	78,6±0,78	79,3±0,08	82,2±0,88
	Oblast 5	67,9±0,25	72,8±0,79	74,6±0,80	77,0±1,23	78,9±1,10	79,7±0,17

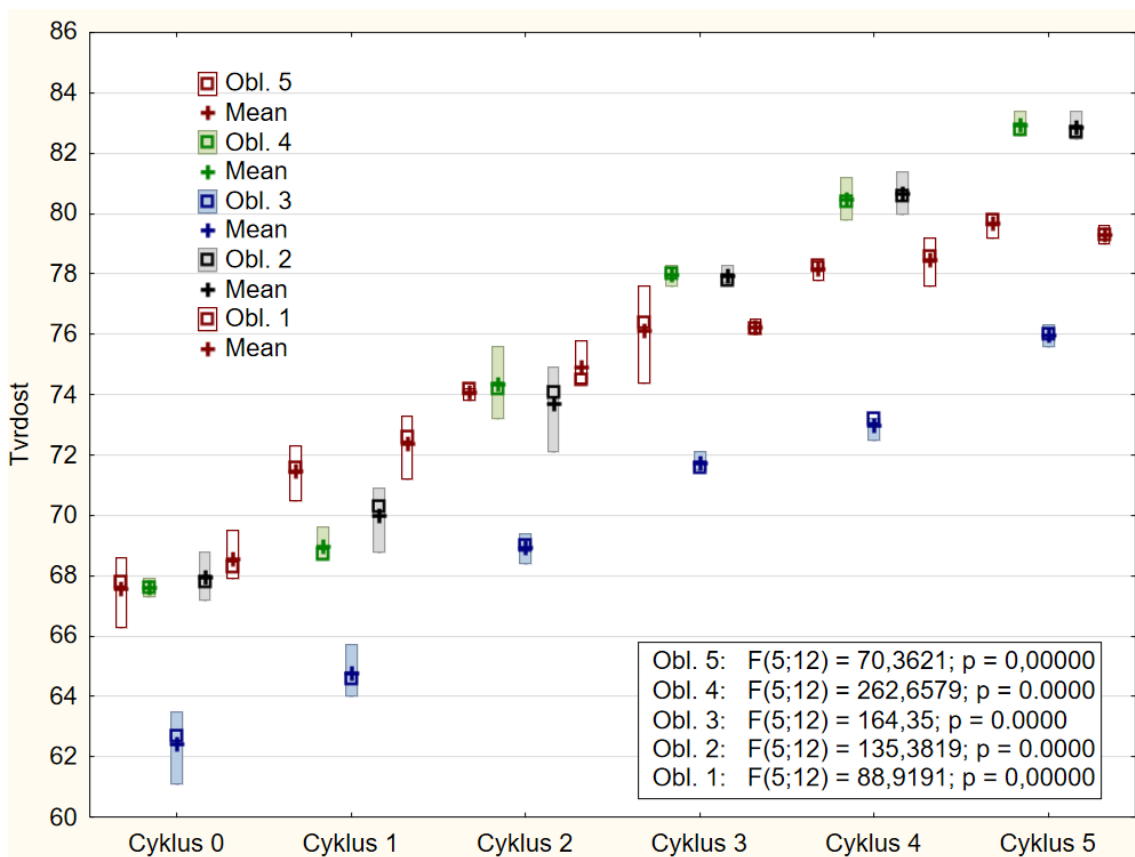
Zdroj: Vlastní

Graf: 13 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku A (klimatická komora)



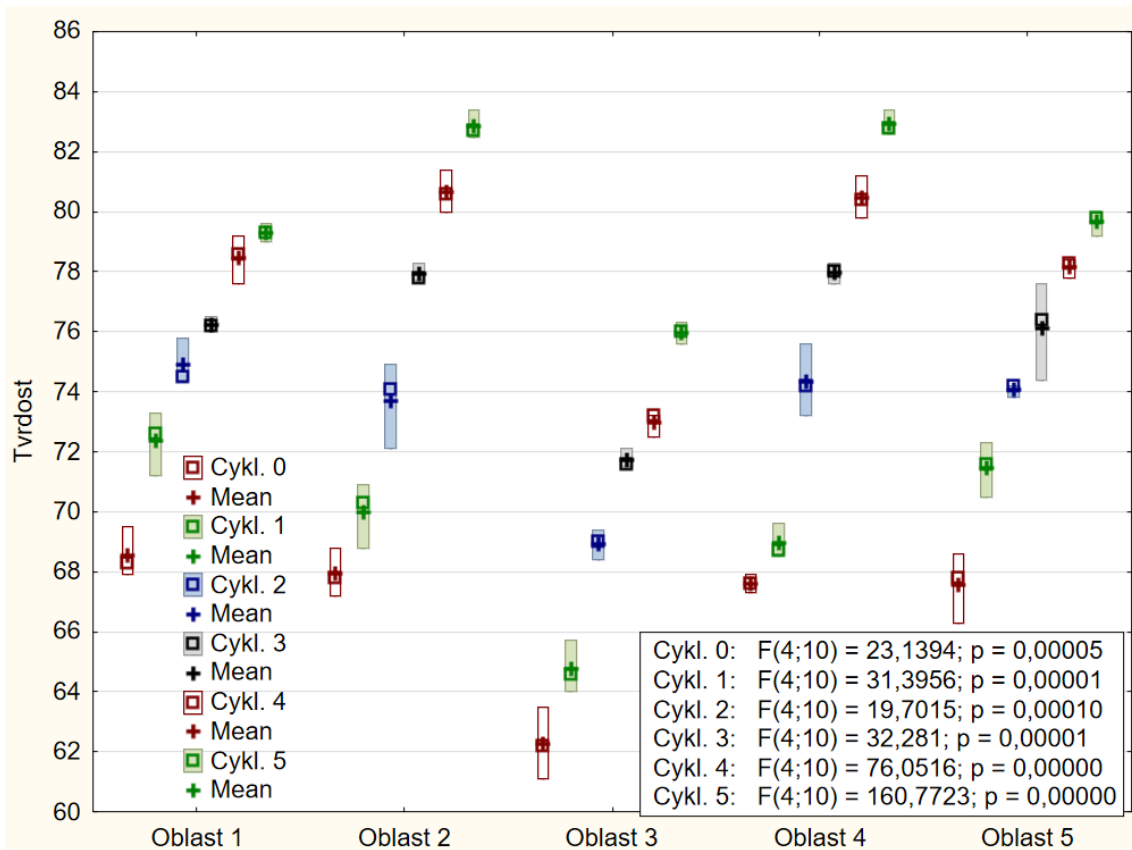
Zdroj: Vlastní

Graf: 14 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů



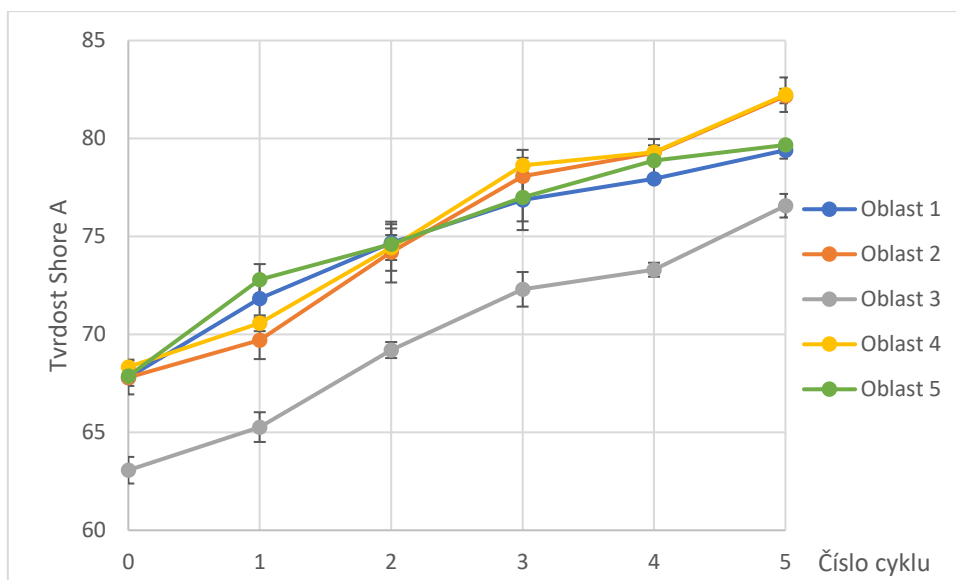
Zdroj: Vlastní

Graf: 15 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření



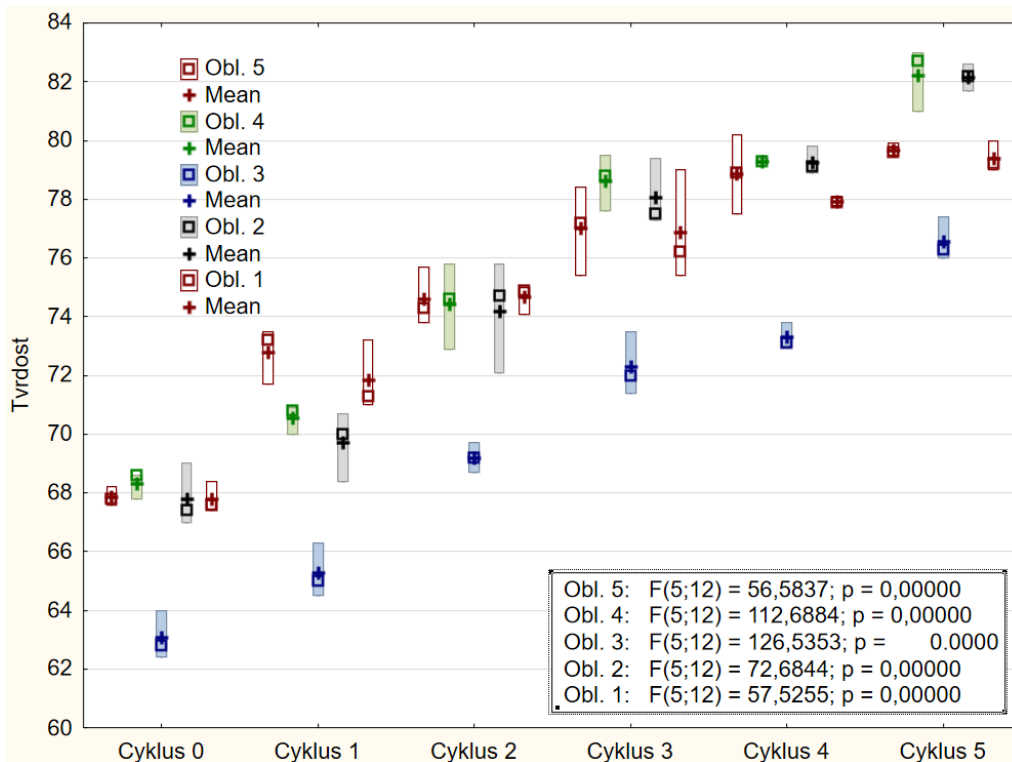
Zdroj: Vlastní

Graf: 16 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku B (klimatická komora)



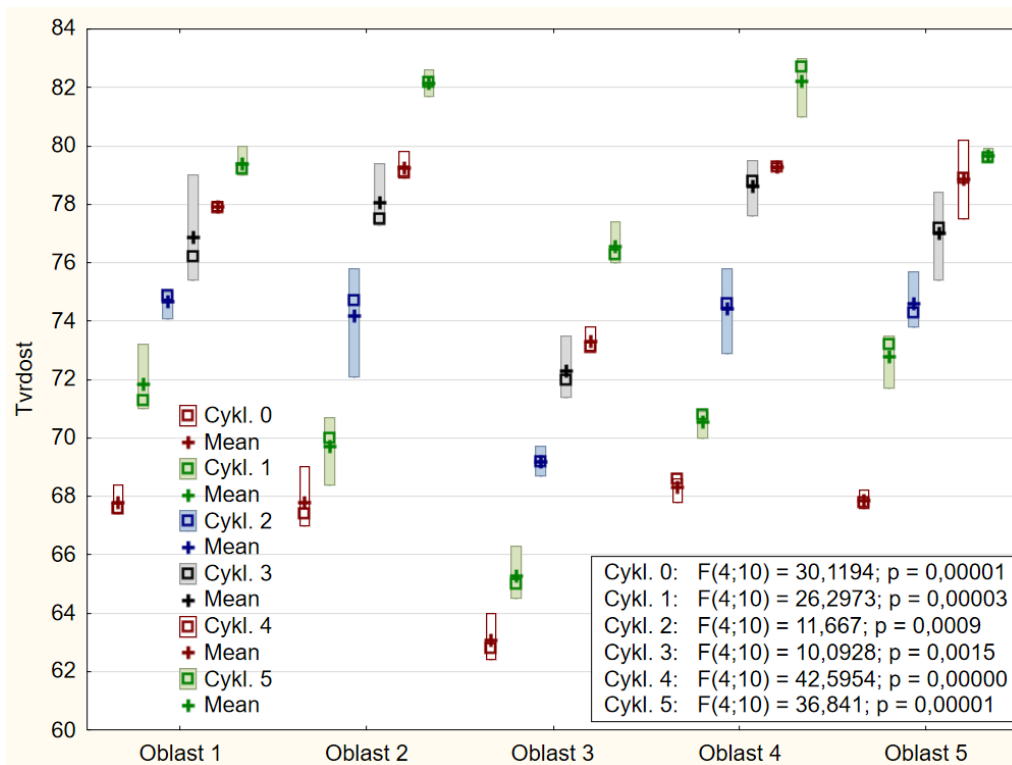
Zdroj: Vlastní

Graf: 17 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: Vlastní

Graf: 18 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření



Zdroj: Vlastní

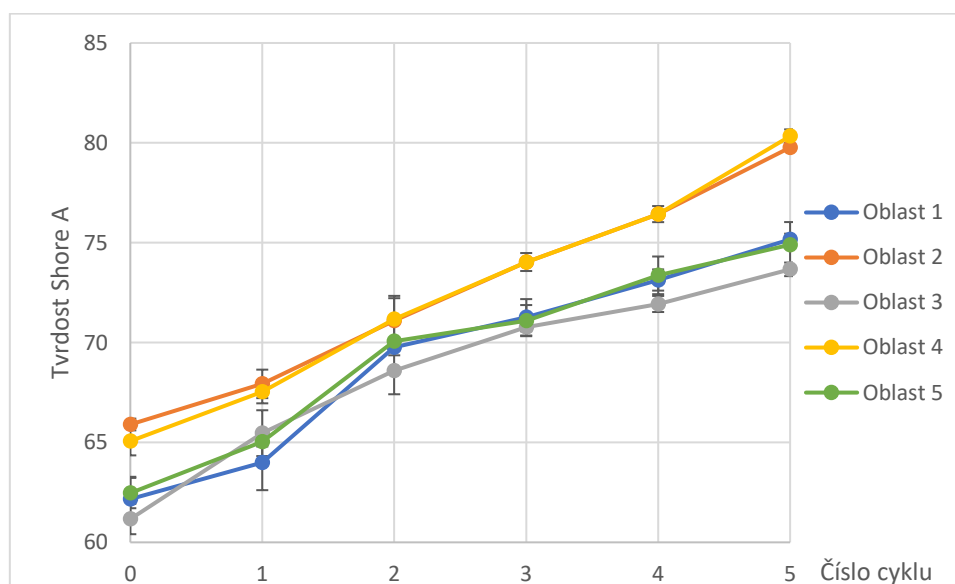
V další tabulce jsou pomocí aritmetického průměru a směrodatné odchylky zaznamenány hodnoty tvrdosti měřené pomocí metody Shore A vzorků C a D (r. v. 2018) degradovaných v klimatické komoře. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v grafech na obr. 36 a 37.

Tab.: 6 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků C a D (5% roztok NaCl)

	Cyklus	0	1	2	3	4	5
Vz. C	Oblast 1	62,2±1,11	64,0±1,39	69,8±0,40	71,3±0,91	73,1±0,53	75,2±0,29
	Oblast 2	65,9±0,29	67,9±0,71	71,1±1,12	74,0±0,09	76,4±0,40	79,8±0,12
	Oblast 3	61,2±0,76	65,5±1,15	68,6±1,19	70,8±0,21	71,9±0,40	73,7±0,34
	Oblast 4	65,1±0,71	67,5±0,57	71,2±1,17	74,0±0,45	76,4±0,19	80,3±0,34
	Oblast 5	62,5±0,76	65,0±0,24	70,1±0,09	71,1±0,78	73,4±0,94	74,9±1,13
Vz. D	Oblast 1	60,5±0,86	64,5±0,98	69,7±0,40	70,9±1,01	73,5±0,34	74,9±0,21
	Oblast 2	65,0±0,57	67,8±0,82	70,6±1,38	74,6±0,45	76,3±0,34	79,9±0,42
	Oblast 3	60,5±0,98	63,5±0,41	67,8±1,24	69,3±0,41	71,6±0,54	73,2±0,31
	Oblast 4	64,2±1,02	67,4±0,68	70,7±1,07	74,4±0,50	76,9±0,61	79,4±0,85
	Oblast 5	60,2±0,12	65,1±0,41	68,6±0,65	70,0±0,52	73,3±0,29	75,0±0,24

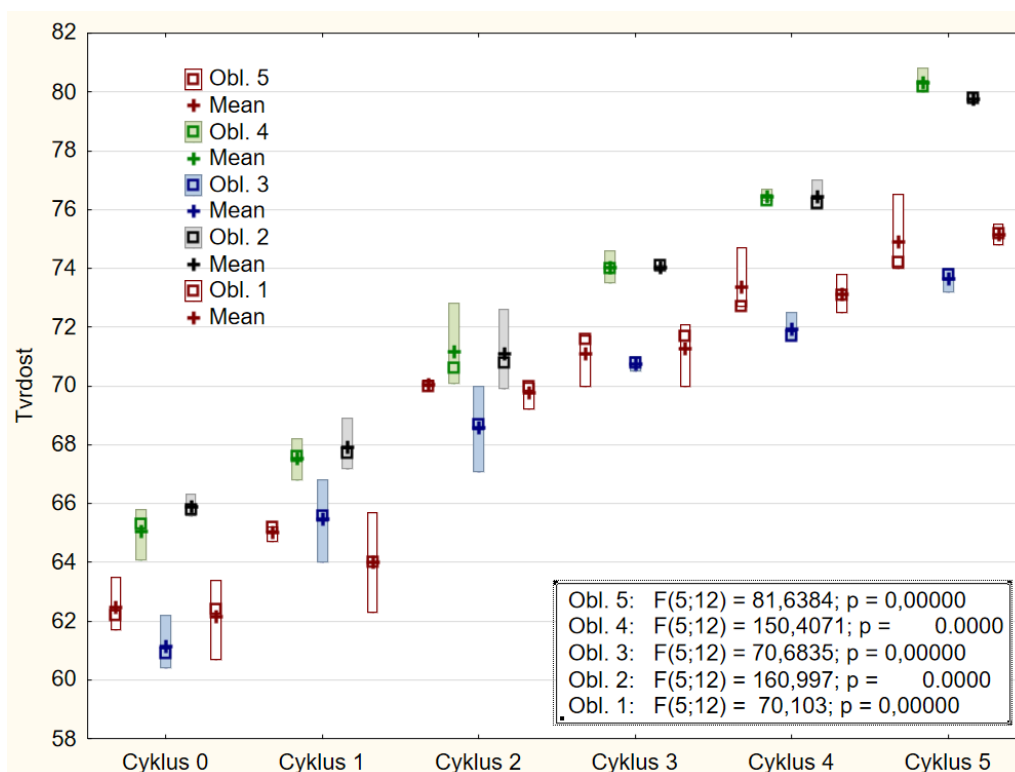
Zdroj: Vlastní

Graf: 19 Vývoj tvrdosti vzorku C (klimatická komora)



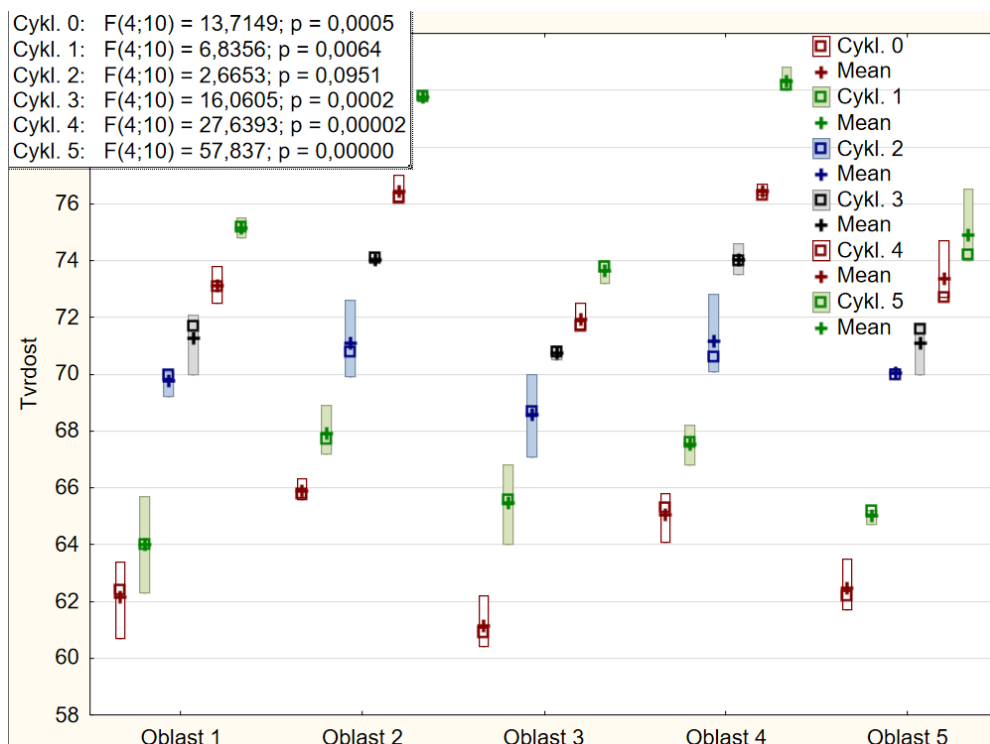
Zdroj: Vlastní

Graf: 20 Boxplot graf tvrdosti vz. C (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů



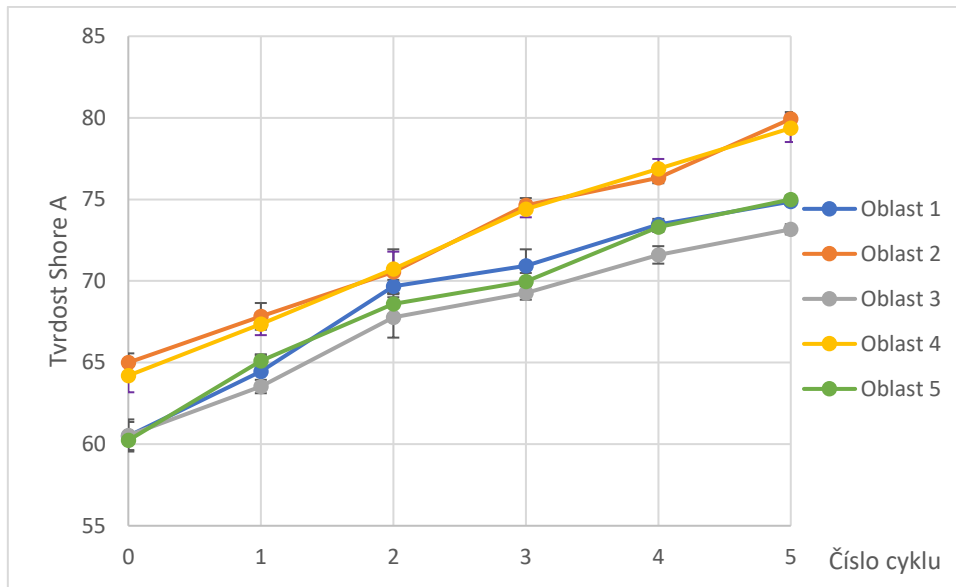
Zdroj: Vlastní

Graf: 21 Boxplot graf tvrdosti vz. C (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření



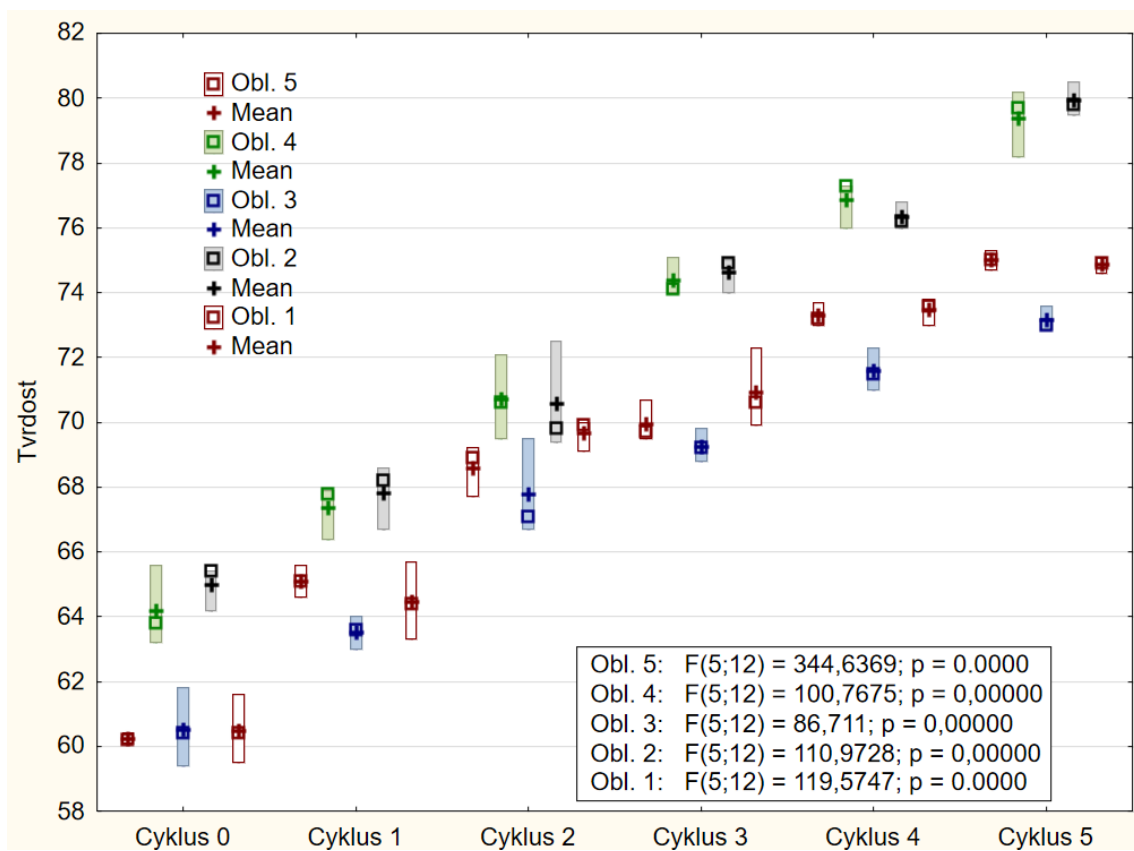
Zdroj: Vlastní

Graf: 22 Vývoj tvrdosti vzorku D (klimatická komora)



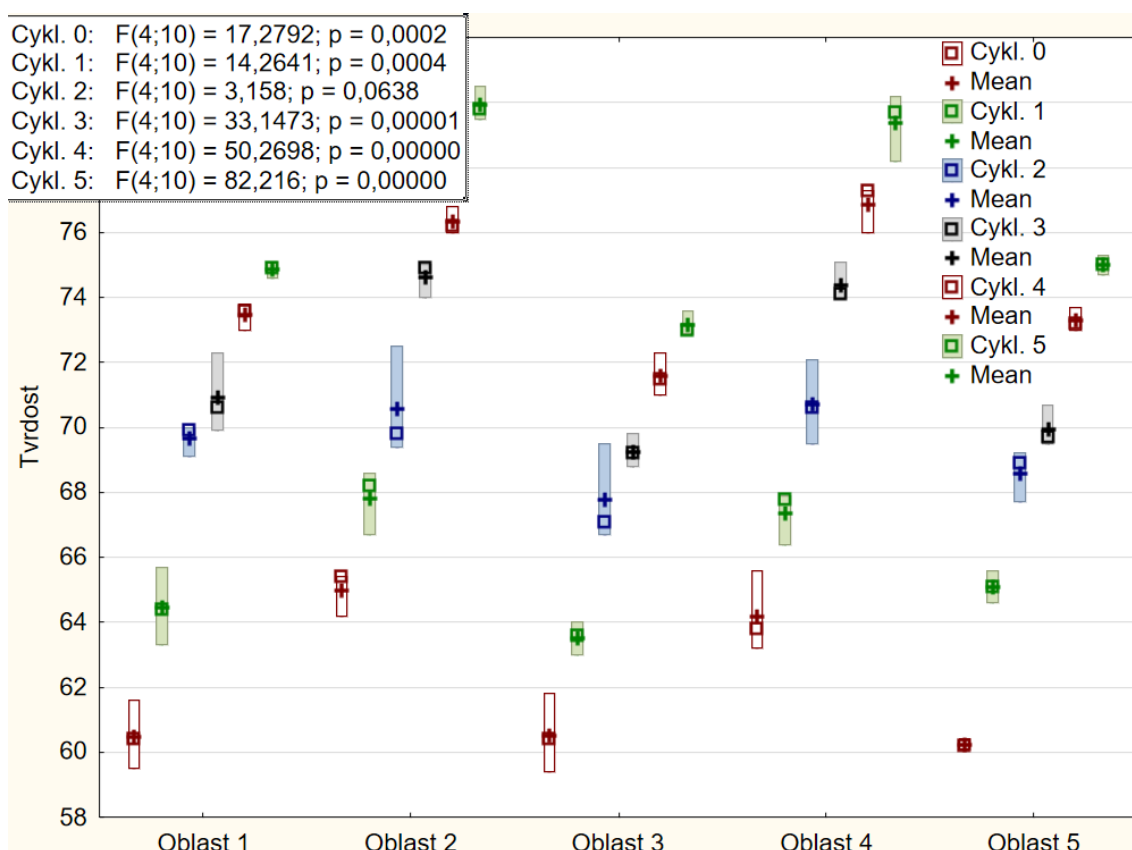
Zdroj: Vlastní

Graf: 23 Boxplot graf tvrdosti vz. D (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: Vlastní

Graf: 24 Boxplot graf tvrdosti vz. D (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření



Zdroj: Vlastní

Během měření tvrdosti vzorků degradovaných v klimatické komoře, byl vývoj tvrdosti logaritmicky rostoucí bez žádného nečekaného poklesu hodnot. Obdobně jako v případě vzorků v solném roztoku je patrný rozdíl mezi jednotlivými oblastmi běhounu. V případě vzorků r. v. 2015 (A a B) dosahuje střední oblast (3) nižší tvrdosti, u vzorků r. v. 2018 (C a D) se touto nižší tvrdostí vyznačuje i oblast ramen (1 a 5).

Zvýšenými teplotami uvnitř klimatické komory dochází k dodatečnému síťování polymerů, které se projevilo růstem tvrdosti a křehnutím vzorku. Nárůst tvrdosti vzorků je logaritmického charakteru. U vzorků A a B došlo k průměrnému navýšení výchozí tvrdosti o 19,77 % výchozí tvrdosti. V případě novějších vzorků C a D byla tato změna vyšší a to 22,14 %. Tento fakt je pravděpodobně způsoben částečným zesíťováním u vzorků A a B, které mohlo proběhnout během pětiletého okna, kdy nebyly vzorky sledovány. Druhým možným vysvětlením je rozdíl v roce výroby a továrně, kde byly vyráběny (údaj DOT na boku pláště). Ačkoliv se jedná o stejný typ pneumatiky, mohlo dojít mezi roky 2015 a 2018 k inovaci výrobní linky, inovaci používané směsi případně byly vyráběny za mírně odlišných podmínek.

Tab.: 7 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na počtu cyklů

p-parametr	Oblast	Vz. A	Vz. B	Vz. C	Vz. D
Klim. Kom.	1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	3	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	5	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Zdroj: Vlastní

Při testování hodnot tvrdosti získaných po degradaci v klimatické komoře byla prokázán velice významný statistický rozdíl hodnot ($p > 0,01$). Obecně bylo potvrzeno, že pryžové výrobky nejsou schopny dlouhodobě odolávat zvýšeným teplotám za působení vzdušného kyslíku.[28] Vystavení pneumatiky daným podmínkám má velice nepříznivý vliv na vlastnosti povrchových vrstev, zejména tvrdnutí, a křehnutí.

Tab.: 8 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na oblasti měření

p-parametr	Cyklus	Vz. A	Vz. B	Vz. C	Vz. D
Klim. Kom.	0	0,00005	0,00001	0,00005	0,00020
	1	0,00001	0,00003	0,00640	0,00040
	2	0,00010	0,00090	0,95100	0,06380
	3	0,00001	0,00150	0,00020	0,00001
	4	0,00000	0,00000	0,00002	0,00000
	5	0,00000	0,00001	0,00000	0,00000

Zdroj: Vlastní

Při testování statistické závislosti tvrdosti na počtu cyklů v klimatické komoře, byl prokázán velice významný statistický rozdíl hodnot. Výjimku tvoří hodnoty získané během druhého cyklu u mladšího typu pneumatik, kde došlo k přijetí hypotézy H_0 o nevýznamném rozdílu hodnot a tím v daném cyklu nebyla potvrzena závislost na oblasti měření.

7.2 Opotřebení

V následující kapitole jsou naměřené hodnoty zpracovány do tabulek ve formě aritmetických průměrů se směrodatnými odchylkami. Tyto hodnoty byly dále vyneseny v příslušných grafech. Zkoušené vzorky byly vždy uloženy po dobu tří týdnů v degradačním médiu, poté byly vyjmuty a proběhla zkouška. Vzorky pro zkoušku opotřebení na rozdíl od vzorků pro měření tvrdosti již nebyly z důvodu jejich znehodnocení vráceny zpět do původního média.

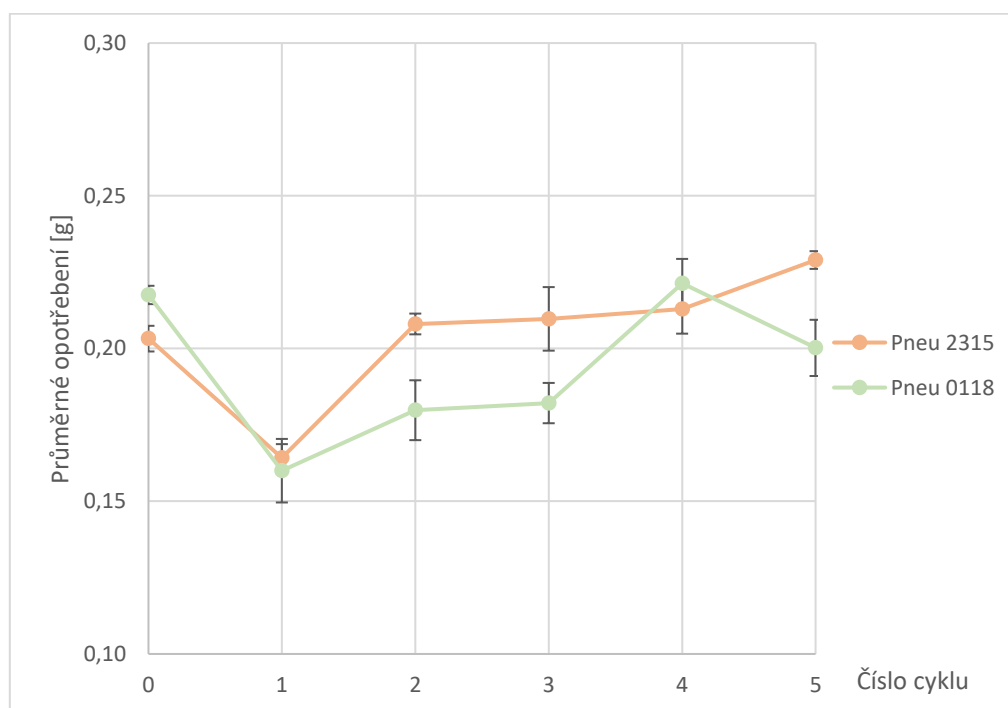
7.2.1 Vliv 5% roztoku NaCl

Tab.: 9 Naměřených hodnot opotřebení [g] (5% roztok NaCl)

Cyklus	0	1	2	3	4	5
Pneu 2315	0,2030±0,0042	0,1642±0,0045	0,2080±0,0034	0,2097±0,0104	0,2130±0,0081	0,2290±0,0029
Pneu 0118	0,2175±0,0030	0,1600±0,0104	0,1798±0,0098	0,1821±0,0066	0,2213±0,0080	0,2002±0,0092

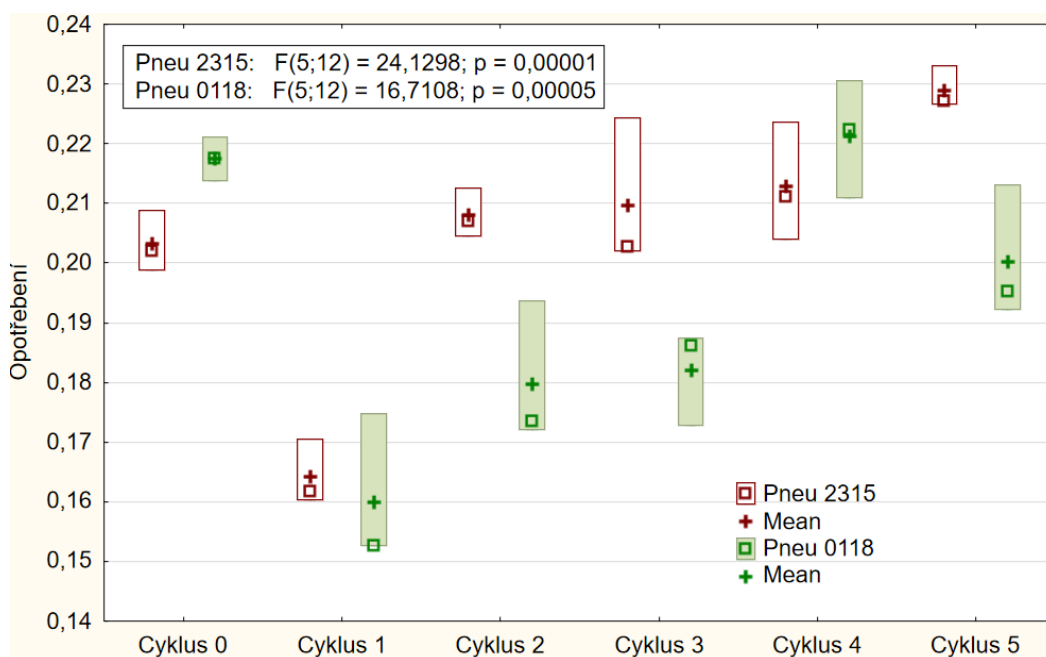
Zdroj: Vlastní

Graf: 25 Vývoj opotřebení (5% roztok NaCl)



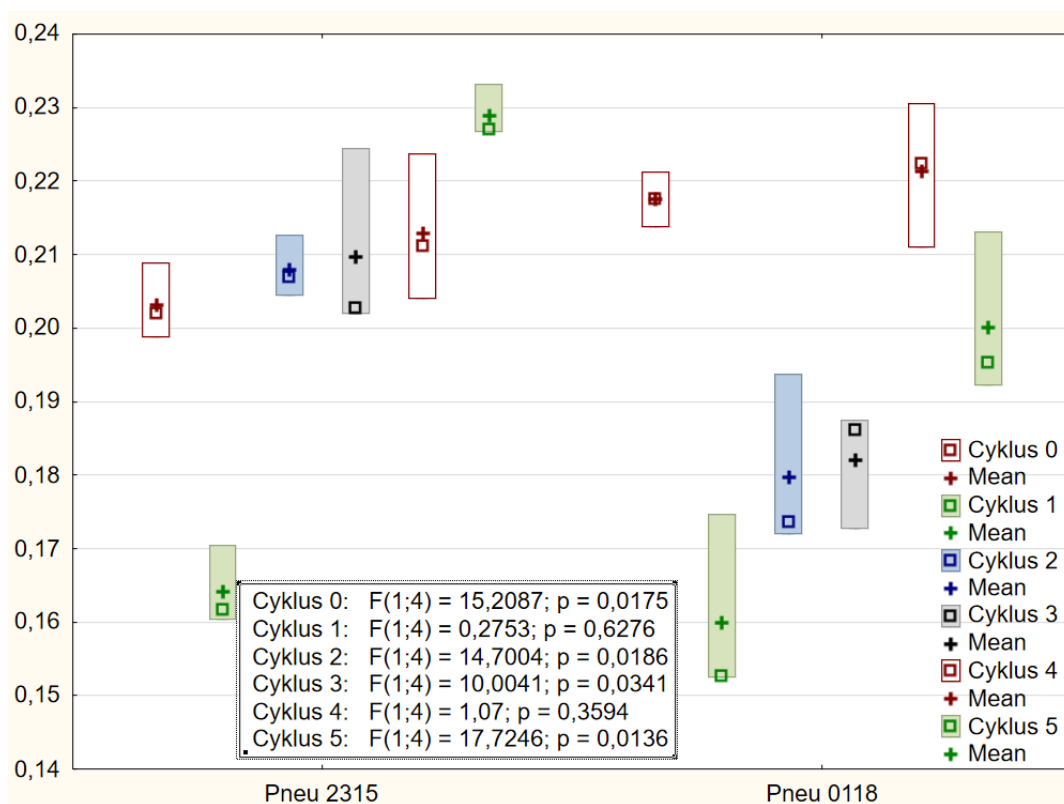
Zdroj: Vlastní

Graf: 26 Boxplot graf opotřebení (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: Vlastní

Graf: 27 Boxplot graf opotřebení (Klimatická komora) v závislosti na typu pneumatiky



Zdroj: Vlastní

V prvotní fázi došlo k poklesu hodnot opotřebení na hodnoty nižší, než byly původní hodnoty pneumatiky. Tento pokles byl nejspíše způsoben nabobtnáním vzorku, které mělo za následek změknutí vzorku. Toto nabobtnání mělo za následek snížení opotřebení o 19,21% pro pneumatiky r. v. 2015 a 26,45 % pro pneumatiku r. v. 2018. Poté, co došlo k ustálení procesu nabobtnávání, došlo k narůstání hodnot opotřebení. Tento nárůst byl 39,44 % nejvyšší hodnoty (cyklus 1) u pneumatiky r. v. 2015 a 25,13 % u pneumatiky r. v. 2018.

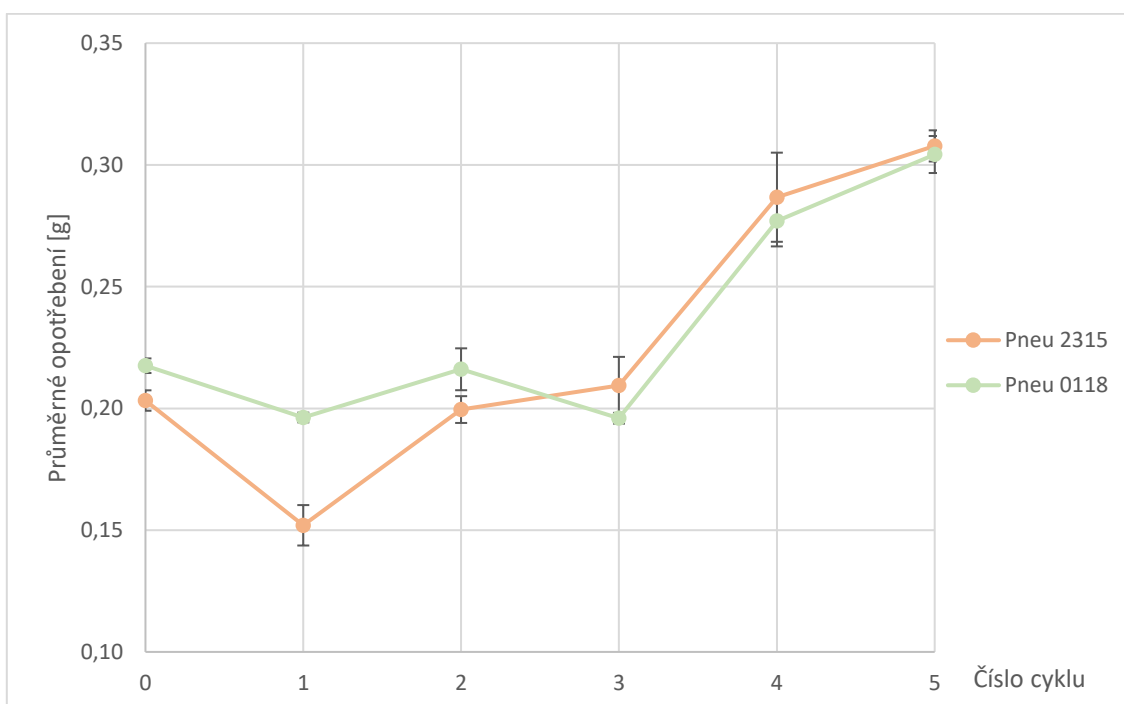
7.2.2 Vliv degradace klimatickou komorou

Tab.: 10 Naměřených hodnot opotřebení [g] (klimatická komora)

Cyklus	0	1	2	3	4	5
Pneu 2315	0,2032±0,0042	0,1520±0,0083	0,1995±0,0055	0,2094±0,0118	0,2867±0,0183	0,3078±0,0064
Pneu 0118	0,2175±0,0030	0,1963±0,0020	0,2161±0,0086	0,1960±0,0022	0,2770±0,0105	0,3043±0,0076

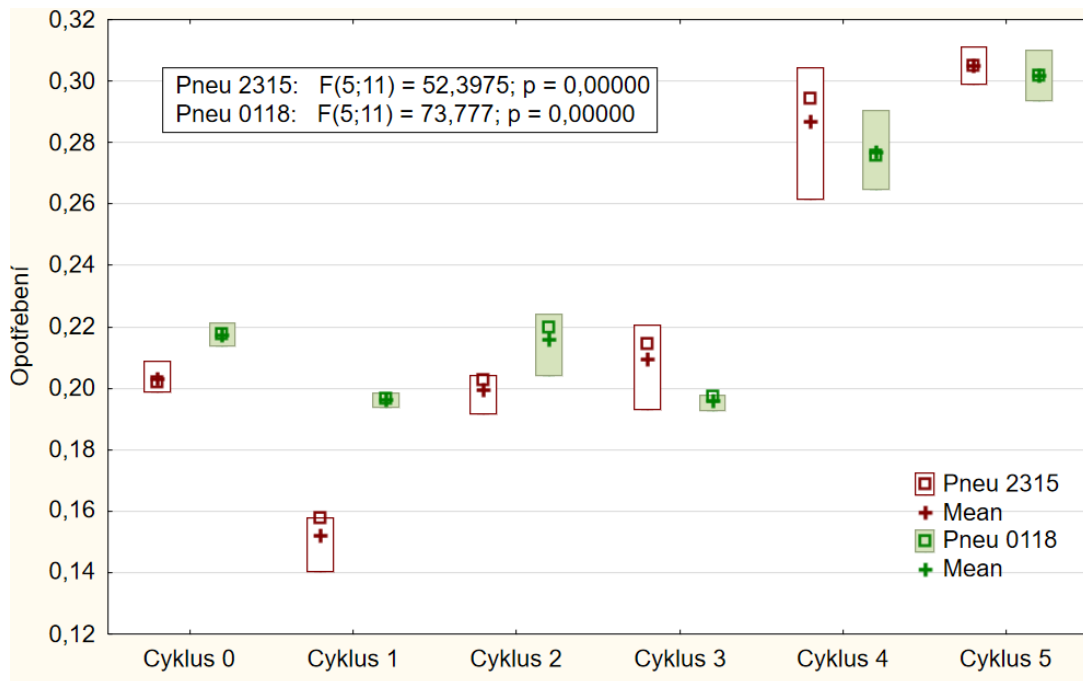
Zdroj: Vlastní

Graf: 28 vývoje opotřebení (klimatická komora)



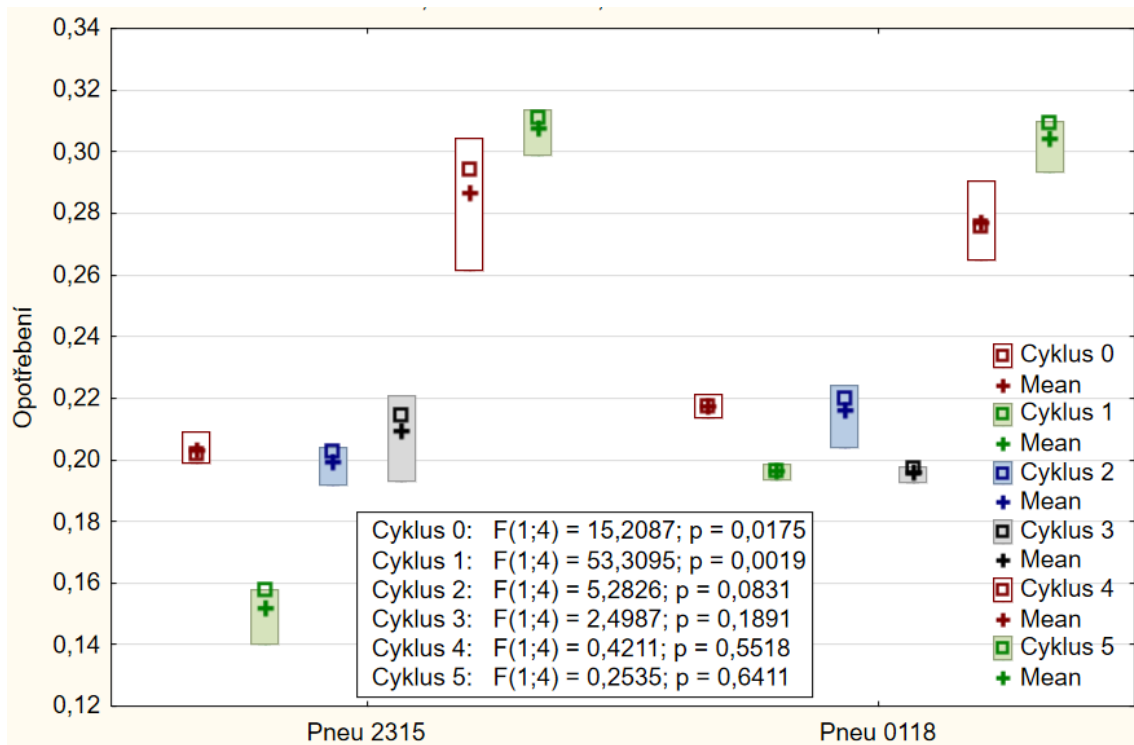
Zdroj: Vlastní

Graf: 29 Boxplot graf opotřebení (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů



Zdroj: Vlastní

Graf: 30 Boxplot graf opotřebení (Klimatická komora) v závislosti na stáří pneumatiky



Zdroj: Vlastní

Je patrné, že obdobně jako v případě měření tvrdosti i zde došlo k výraznému rozdílu mezi jednotlivými degradanty. V případě vzorků z klimatické komory, dosahovala ze začátku lepších hodnot starší pneumatika. Dle grafů je patrné, že zvyšující se tvrdost povrchové vrstvy způsobuje její vyšší opotřebení. Na konci výzkumu došlo k nárůstu opotřebení u vzorků z pneumatiky DOT 2315 o 51,5 %, pro pneumatiku DOT 0118 tento nárůst činil 39,9 %.

Tab.: 11 Statistické vyhodnocení opotřebení vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na počtu cyklů

p-parametr	NaCl	Klim. Kom.
Pneu 2315	0,00001	0,00000
Pneu 0118	0,00005	0,00000

Zdroj: Vlastní

U obou typů pneumatik byla pomocí Anova F-testu prokázána velice významná závislost na době působení degradačního prostředí. Dané tvrzení je platné pro vzorky vystavené působení solného roztoku i zvýšeným teplotám v klimatické komoře.

Tab.: 12 Statistické vyhodnocení opotřebení vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na typu pneumatiky

p-parametr	NaCl	Klim. Kom.
Cyklus 0	0,01750	0,01750
Cyklus 1	0,62760	0,00190
Cyklus 2	0,01860	0,08310
Cyklus 3	0,03410	0,18910
Cyklus 4	0,35940	0,55180
Cyklus 5	0,01360	0,64110

Zdroj: Vlastní

Závislost opotřebení na stáří pneumatiky nemohla být v případě degradace klimatickou komorou potvrzena. S přibývajícimi cykly došlo k nárůstu hodnot p-parametru, na jehož základě byla přijata hypotéza H_0 o statisticky nevýznamném rozdílu hodnot. Tento fakt potvrzuje teorii o dodatečném zesílení pryžových produktů vystavených zvýšeným teplotám, které zvyšují tvrdost. Toto zesílení však může pokračovat jen do jakési maximální hodnoty, kde poté dojde k zastavení procesu a ustálení na této hodnotě. Vzhledem ke stejnému zvolenému

typu pneumatik lze předpokládat, že tato maximální hodnota bude stejná nebo minimálně velice podobná.

V případě vzorků umístěných v solném roztoku byla přijata hypotéza H1, která potvrzuje statisticky významný rozdíl naměřených hodnot. Dle p-parametru není tato hypotéza přijata při hodnotách opotřebení získaných během cyklu 1 a cyklu 4. Během cyklu 4 došlo ke skokovému nárůstu hodnot opotřebení vzorků DOT 0118, která není možné zcela vysvětlit. Proto se domnívám, že došlo zřejmě k získání ne zcela správných hodnot vlivem chyby měření, která dále vyvrátila hypotézu o signifikantním rozdílu naměřených hodnot.

8 Závěr

V úvodní části práce je popsán typ zvolené pneumatiky, použitá degradační prostředí, způsob přípravy vzorků a veškerá zařízení použitá během této práce. V následujících kapitolách diplomové práce byla řešena problematika pneumatik osobních automobilů počínaje jejich historií, materiálovým složením a procesem výroby. Je nutné porozumět materiálovému složení a interakcím různorodých částí pláště mezi sebou, aby bylo zřejmé působení hlavních degradačních činitelů a jejich možný dopad na vlastnosti pneumatik. Další nedílnou součástí je proto charakteristika základních degradačních činitelů a degradačních procesů, kterými na pláště působí. V závěrečné části práce jsou interpretovány vlastní výsledky společně s jejich statistickým zpracováním.

Během měření došlo k výraznému nárůstu tvrdosti vzorků umístěných v klimatické komoře, hodnoty nárůstu tvrdosti u vzorků r. v. 2018 dosahovaly v průměru 13,89 Shore, u vzorků z pneumatiky r. v. 2015 tento nárůst činil pouze 10,97 Shore. Větší míra nárůstu tvrdosti u mladší pneumatiky se nechá vysvětlit mírou dodatečného zesílení polymerů. U starší pneumatiky můžeme předpokládat, že tento proces dodatečného zesílení již částečně proběhl, proto je její výchozí tvrdost běhounu o něco vyšší. Hodnoty tvrdosti nemůžou pokračovat v růstu do nekonečna, finální hodnota tvrdosti bude limitována stavem, kdy dojde k zesílení veškerých molekul a proces již nebude moci dále pokračovat. Tuto teorii potvrzuje průběh grafu (logaritmický trend), kde v úvodní fázi je nárůst hodnot značně vyšší. V případě vzorků umístěných v solném roztoku, došlo k očekávatelnému, kdy hodnoty zdaleka nedosáhly takové míry degradace. Když vezmeme v úvahu, že byl testován letní typ pneumatik, kde se při výrobě nepočítá, že bude běžně vystaven působení solných roztoků. Proto se domnívám, že daný nárůst tvrdosti byl ještě relativně vysoký oproti případu, kdy by byla testována pneumatika pro provoz v zimních podmínkách. V solném roztoku došlo dále k viditelné korozi odhalených ocelových kordových lan v oblasti řezu. Míra znehodnocení této části pláště však nebyla cílem měření. Zároveň u těchto vzorků nebylo sledováno žádné bobtnání vzorků.

Obdobně jako v případě měření změny tvrdosti, došlo i v případě opotřebení k významnému nárůstu opotřeбенé hmoty u vzorků degradovaných pomocí klimatické komory. Nárůst míry opotřebení těchto vzorků po pátém cyklu degradace z pneumatiky r. v. 2018 činil 0,0867 g (39,9 %), v případě vzorků u pneumatiky r. v. 2015 byl tento nárůst výraznější 0,1046 g (51,5 %). Tento vyšší nárůst opotřebení se nechá vysvětlit vyšší tvrdostí daného vzorku. Z grafu je patrné že se zvyšující se tvrdostí dochází ke zvýšení opotřebení. Vlivem

zvyšování tvrdosti vzorků dochází ke ztrátě hystereze a tím schopnosti rozptýlit část tangenciálních sil. Velikost těchto tangenciálních sil ovlivňuje třecí práci dle rovnice $FE = \int FT * dl$, proto dochází ke zvýšenému opotřebení tvrdších vzorků.[32]

Je patrné, že ačkoliv se primárně nepočítá vystavení vlivu určitým degradantům, pneumatiky jim odolávají. To svědčí o kvalitě provedení a materiálovém zpracování pneumatik. Působením tepelné degradace dochází k výrazně větší degradaci. Tyto podmínky, kterým byla pneumatika vystavena lze považovat za extrémní, neboť v běžném provozu se nepočítá vystavení těmto extrémním teplotám po tak dlouhou dobu. Pro určení celkové odolnosti pneumatik proti působení degradantů by bylo třeba pneumatiku podrobit dlouhodobější zkoušce a ideálně více typům prostředí, tak aby se získaly její podrobnější vlastnosti.

9 Příloha

Obr.: 25 Koroze ocelových kordů vzorků umístěných v solném roztoku



Zdroj: Vlastní

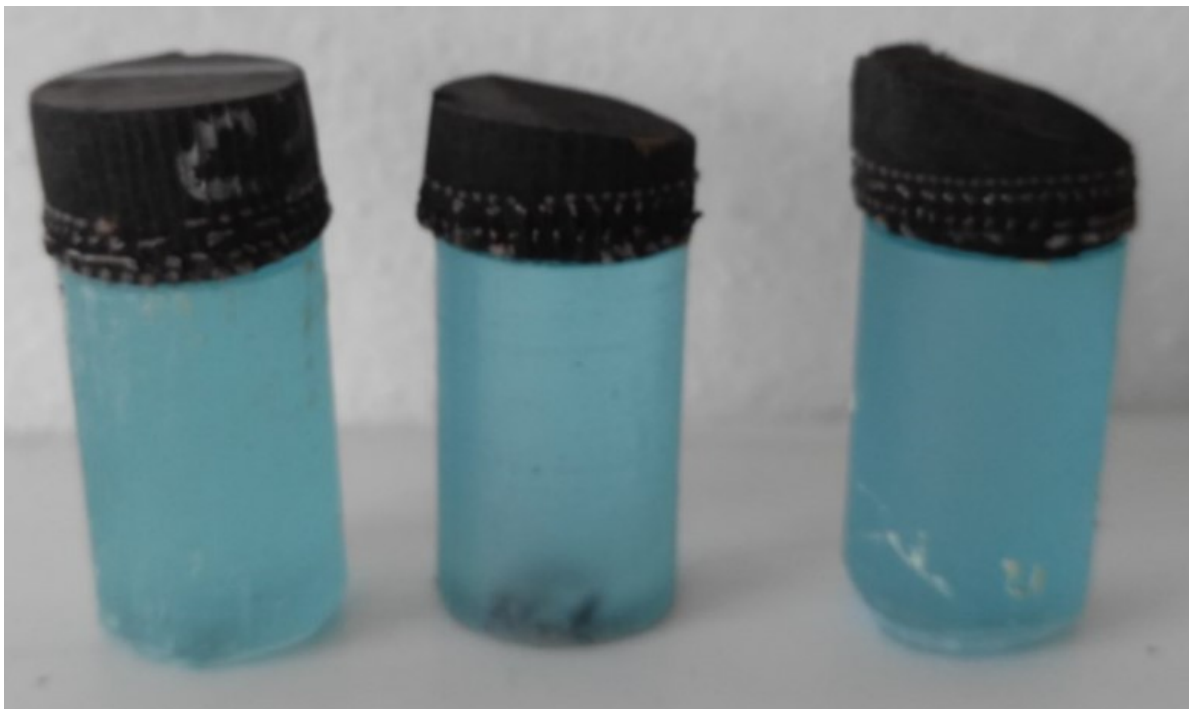
Obr.: 26 Tepelná deformace vzorků z klimatické komory



Zdroj: Vlastní

Obr.: 27 Vzorky pro zkoušku opotřebení

Zleva: Původní vytvořený vzorek; vzorek po přizpůsobení povrchu válci s brusným papírem (výchozí hmotnost); vzorek po zkoušce opotřebení (konečná hmotnost)



Zdroj: Vlastní

10 Zdroje literatury

1. MARCÍN, Jiří. *Pneumatiky - výroba, použití, údržba*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1976, 272 s.,
2. DOČKAL, Vladimír, KOVANDA, Jan a HRUBEC, František. *Pneumatiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998, 71 s. ISBN 80-01-01882-2,
3. KRMELA, Jan. *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I*. Vyd.1. Brno: Tribun EU, 2008, 102 s. ISBN 978-80-7399-365-8,
4. MARCÍN, Jiří a ZÍTEK, Petr. *Pneumatiky*. Vyd.1. Praha: SNTL, 1985, 492 s. ISBN 04-625-85,
5. GRUBER, Josef. *Z dějin největšího lidského vynálezu* [online]. 2004 [citován. 2020-02-04]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/vyn_kola.pdf
6. POLYMER SCIENCE LEARNING CENTER. *The birth of BUNA* [online]. [citován. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://pslc.ws/macrog/exp/rubber/synth/buna.htm>
7. EVROPSKÁ HOSPODÁŘSKÁ KOMISE ORGANIZACE SPOJENÝCH NÁRODŮ. Jednotná ustanovení pro schvalování pneumatik pro motorová vozidla a jejich přípojná vozidla. In: [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>
8. KUBU, M. *Průvodce značením pneumatik* [online]. 2015 [citován. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://www.testpneumatik.eu/blog/tag/znaceni-pneumatik/>
9. EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE. NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 1222/2009 ze dne 25. listopadu 2009 o označování pneumatik s ohledem na palivovou účinnost a jiné důležité parametry. In: [online]. 2009. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:02009R1222-20120530&from=EN>
10. KRMELA, Jan. *Pláště pneumatik a jejich materiálové charakteristiky pro výpočtové modelování*. Vyd.1. Zborov: Jan Krmela, Česká republika, 2017, 100 s. ISBN 978-80-270-2893-1,
11. SAJDL, Jan. *Konstrukce pneumatik* [online]. [citován. 2020-02-05]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>
12. MASTINU, Giampiero a PLOECHL, Manfred. *Road and off-road vehicle system dynamics handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2013, 1692 s. ISBN 978-0-8493-3322-4,

13. HOŘEJŠ, Karel, MOTEJL, Vladimír a A KOLEKTIV. *Příručka pro řidiče a opraváře automobilů*. Vyd.4. Brno: Littera, 2008, 357 s. ISBN 978-80-85763-42-3,
14. VENENÝ, Petr. Adheze výztužných materiálů (ocelových a textilních kordů) ke kaučukovým směsím. In: [online]. 2011. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/df3b/c218b7ff84573fb1f6f437f7f8bbdb3973aa.pdf>
15. PROJECT SMART EXPLORER. *Halobutyl* [online]. 2012 [citován. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://www.2b1stconsulting.com/halobutyl/>
16. KOLEČEK, Petr a RŮŽIČKA, Bronislav. *Pneumatiky pro váš automobil*. Brno: CP Books, 2005, 154 s. ISBN 80-251-0561-X,
17. *Konstrukce, funkce a výroba pneumatik* [online]. Dostupné z: <http://www.pneu-asistent.cz/Konstrukce-funkce-a-vyroba-pneumatiky.html>
18. DOPRAVNÍ NOVINY. *Výroba pneumatik* [online]. 2005. Dostupné z: <http://www.dnoviny.cz/silnicni-doprava/vyroba-pneumatik2335>
19. MLEZIVA, Josef. *Polymery - struktura, vlastnosti a použití*. Vyd.1. Praha: Sobotáles, 1993, 528 s.,
20. MECHL, Viktor, MUŠINSKÝ, Martin a A KOL. *Gumárenská technologie v Barum Continental, spol. s.r.o.* Vyd.1. Zlín: COP Zlín, 2011, 97 s. ISBN 978-80-905002-2-8,
21. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015, 275 s. ISBN 978-80-7080-788-0,
22. KYSELÁ, Gabriela, HUDEC, Ivan a ALEXYS, Pavol. *Výroba a spracovanie kaučukov a gumy*. Vyd.1. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 269 s. ISBN 978-80-227-3324-3,
23. NEXEN TIRE. *Proces výroby* [online]. [citován. 2020-02-20]. Dostupné z: http://www.nexentire.com/cz/information/tire_information/basic_sense/process.php
24. *Pneumatiky - konstrukce* [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.autoznanosti.cz/index.php/podvozek-a-kola/12-pneumatiky-konstrukce.html>
25. WARNES, Colin. *The tire story* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.allardregister.org/blog/tag/Tire>
26. RIGHTTURN. *Bias-belted tires* [online]. [citován. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.rightturn.com/tire-guide/bias-belted-tires/>

27. UNIROYAL. *What is the difference between summer and winter tyres?* [online]. Dostupné z: <https://www.uniroyal-tyres.com/car/tyre-guide/tyre-knowledge/difference-summer-and-winter-tyres>
28. JANČAŘÍKOVÁ, Marie. *No Title*. [online]. B.m., 2016. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, . Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=123431
29. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. [online] Liberec: publi.cz, 2014, ISBN 978-80-88058-68-7, Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
30. HONSKUS, Jiří. *Degradace a odolnost pryže*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1969, 68 s.,
31. TIRETRACK.COM. *TIRE TECH: TIRE CONTACT WITH PETROCHEMICALS & SOLVENTS* [online]. Dostupné z: <https://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=262>
32. THE UNIVERSITY OF EDINBURGH. *Tyre Mechanisms of Wear* [online]. [citován. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://wearmechanismsorubbertyres.weebly.com/>
33. SCHÄTZ, M a VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů*. Vyd.2. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1988, 276 s.,
34. KLUEPPEL, Manfred. *Wear and Abrasion of Tires* [online]. 2014 [citován. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278707187_Wear_and_Abrasion_of_Tires
35. T-MARTS, BOB JANE. *Load Index & Speed Symbols Explained* [online]. 2018 [citován. 2020-01-29]. Dostupné z: bobjane.com.au/blog/load-index-speed-symbol-guide
36. DUNLOP. *SPORT BLURESPONSE* [online]. [citován. 2020-01-29]. Dostupné z: https://www.dunlop.eu/cs_cz/consumer/tires/sport_bluresponse.SPTBLURES.html
37. CENTRUM SLUŽEB PRO NORMALIZACI. ČSN 62 1466. *Pryž. Stanovení odolnosti proti odírání na přístroji s otáčivým bubnem*. 1992. Praha.
38. BROŽEK, Milan. *STEEL CUTTING USING ABRASIVE WATER JET* [online]. 2017 [citován. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/d93e/7390048ba8aad0002cd5cc8d8846d722379e.pdf>
39. MELCHER, Karel. *Posypové materiály pro zimní údržbu komunikací v ČR a v zemích EU* [online]. 2001 [citován. 2020-01-29]. Dostupné

- z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/posypove-materialy-pro-zimni-udrzbu-komunikaci-v-cr-a-v-zemich-eu>
40. REŠL, Ondřej. *Posypová sůl na komunikace, technická specifikace* [online]. 2009 [citován. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.veronica.cz/otazky?i=303>
 41. AUSTRALASIAN CORROSION ASSOCIATION. *Correcting Concrete Corrosion. Materials Performance* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.materialsperformance.com/articles/material-selection-design/2016/03/correcting-concrete-corrosion>
 42. AIRTEMP. *Environmental simulation chambers MK/MKF/MKT* [online]. [citován. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.airtemp.eu/dico/UserFiles/Downloads/Binder klimaatkasten serie M.pdf>
 43. BINDER. *Model MKF 240* [online]. [citován. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.binder-world.com/en/products/dynamic-climate-chambers/series-mkf/mkf-240>
 44. KOLÁŘ, V., TICHÝ, M., MÜLLER, M., VALÁŠEK, P. a RUDAWSKA, A. Research on influence of cyclic degradation process on changes of structural adhesive bonds mechanical properties. *Agronomy Research* [online]. 1062–1070, 2019, **17**. ISSN 1406894X. Dostupné z: doi:10.15159/AR.19.090
 45. KERN. *ABS-N/ABJ-NM Analytické váhy* [online]. 2010 [citován. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://vahy-kern.cz/produkty/kern-laboratorni-vahy/analyticke-vahy/abs-n-abj-nm-analyticke-vahy/>
 46. MÜLLER, Miroslav a KEJVAL, Jiří. Research on wear resistance of poly-component composite materials. *Research in Agricultural Engineering* [online]. 106–114, 2017, **63**(3). ISSN 12129151. Dostupné z: doi:10.17221/79/2015-RAE
 47. ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN ISO 48-4:2019 (621433) Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tvrdosti - Část 4: Tvrdost metodou vlačování hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). 2019. Praha.
 48. BAREISS. *HPE* [online]. [citován. 2020-01-30]. Dostupné z: https://www.techrentals.com.au/uploads/BAR_HPE-FM02177.pdf
 49. BEDÁŇOVÁ, Iveta. *Testování hypotéz ve statistice* [online]. 2005 [citován. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm#krithod>

11 Seznam obrázků

Obr.: 1 Funkce kol s pneumatikami a požadavky na ně kladené	13
Obr.: 2 Příklad označení pneumatiky	14
Obr.: 3 Tabulka zátěžových a rychlostních indexů	15
Obr.: 4 Energetický štítek.....	16
Obr.: 5 Konstrukční části pláště pneumatiky	17
Obr.: 6 Kordová tkanina	18
Obr.: 7 Konstrukce radiální pneumatiky	28
Obr.: 8 Konstrukce diagonální pneumatiky	29
Obr.: 9 Diagonální pneumatiky s nárazníkovými pásy	29
Obr.: 10 Páskový a blokový typ dezénu.....	30
Obr.: 11 Vliv teploty na adhezi pneumatik	31
Obr.: 12 Zimní typ dezénu Bridgestone Blizzak DM-V2	32
Obr.: 13 Tabulka mezních teplot dlouhodobé použitelnosti nepoužívanějších pryží při výrobě pneumatik	33
Obr.: 14 Průběh kontaktu části pneumatiky s vozovkou.....	37
Obr.: 15 Dunlop Sport Bluresponse	40
Obr.: 16 Proces vytváření dílů 16x16 cm.....	42
Obr.: 17 Odstříhávání bočnic	42
Obr.: 18 CNC řezací stroj AWAC AW CT 0806.....	43
Obr.: 19 Binder MKF 240	45
Obr.: 20 Analytická váha Kern ABS 120.....	47
Obr.: 21 Přístroj pro oděr gumy	48
Obr.: 22 Měřené oblasti běhounu	49
Obr.: 23 Indentor tvrdoměru Shore A	50
Obr.: 24 Tvrdoměr Bareiss HPE	51
Obr.: 25 Koroze ocelových kordů vzorků umístěných v solném roztoku.....	78
Obr.: 26 Tepelná deformace vzorků z klimatické komory.....	78
Obr.: 27 Vzorky pro zkoušku opotřebení.....	79

12 Seznam tabulek

Tab.: 1 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků A a B (5% roztok NaCl).....	53
Tab.: 2 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků C a D (5% roztok NaCl).....	56
Tab.: 3 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na počtu cyklů	60
Tab.: 4 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na oblasti měření	61
Tab.: 5 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků A a B (klimatická komora).....	61
Tab.: 6 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků C a D (5% roztok NaCl).....	65
Tab.: 7 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na počtu cyklů	69
Tab.: 8 Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na oblasti měření	69
Tab.: 9 Naměřených hodnot opotřebení [g] (5% roztok NaCl).....	70
Tab.: 10 Naměřených hodnot opotřebení [g] (klimatická komora)	72
Tab.: 11 Statistické vyhodnocení opotřebení vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na počtu cyklů	74
Tab.: 12 Statistické vyhodnocení opotřebení vzorků dle ANOVA F-testu s p-parametrem stanoveným v hladině významnosti $\alpha = 0.05$ v závislosti na typu pneumatiky	74

13 Seznam grafů

Graf: 1 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku A (5% roztok NaCl).....	53
Graf: 2 Boxplot graf tvrdosti vz. A (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů.....	54
Graf: 3 Boxplot graf tvrdosti vz. A (5% roztok NaCl) v závislosti na oblasti měření.....	54
Graf: 4 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku B (5% roztok NaCl).....	55
Graf: 5 Boxplot graf tvrdosti vz. B (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů.....	55
Graf: 6 Boxplot graf tvrdosti vz. B (5% roztok NaCl) v závislosti na měřené oblasti.....	56
Graf: 7 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku C (5% roztok NaCl).....	57
Graf: 8 Boxplot graf tvrdosti vz. C (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů.....	57
Graf: 9 Boxplot graf tvrdosti vz. C (5% roztok NaCl) v závislosti na oblasti měření.....	58
Graf: 10 (Excel) vývoje tvrdosti vzorku D (5% roztok NaCl).....	58
Graf: 11 Boxplot graf tvrdosti vz. D (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů.....	59
Graf: 12 Boxplot graf tvrdosti vz. D (5% roztok NaCl) v závislosti na oblasti měření.....	59
Graf: 13 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku A (klimatická komora).....	62
Graf: 14 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů.....	62
Graf: 15 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření.....	63
Graf: 16 (Excel) Vývoj tvrdosti vzorku B (klimatická komora).....	63
Graf: 17 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů.....	64
Graf: 18 Boxplot graf tvrdosti vz. A (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření.....	64
Graf: 19 Vývoj tvrdosti vzorku C (klimatická komora).....	65
Graf: 20 Boxplot graf tvrdosti vz. C (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů.....	66
Graf: 21 Boxplot graf tvrdosti vz. C (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření.....	66
Graf: 22 Vývoj tvrdosti vzorku D (klimatická komora).....	67
Graf: 23 Boxplot graf tvrdosti vz. D (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů.....	67
Graf: 24 Boxplot graf tvrdosti vz. D (Klimatická komora) v závislosti na oblasti měření.....	68
Graf: 25 Vývoj opotřebení (5% roztok NaCl).....	70
Graf: 26 Boxplot graf opotřebení (5% roztok NaCl) v závislosti na počtu cyklů.....	71
Graf: 27 Boxplot graf opotřebení (Klimatická komora) v závislosti na typu pneumatiky.....	71
Graf: 28 vývoje opotřebení (klimatická komora).....	72
Graf: 29 Boxplot graf opotřebení (Klimatická komora) v závislosti na počtu cyklů.....	73
Graf: 30 Boxplot graf opotřebení (Klimatická komora) v závislosti na stáří pneumatiky.....	73