

# **Problematika výroby a testování valivého profilu**

**Bc. Ondřej Vašků**

---

Diplomová práce  
2023



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Ondřej Vašků</b>
Osobní číslo:	<b>T21430</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Výrobní inženýrství</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Problematika výroby a testování valivého profilu</b>

## Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše na zvolené téma.
2. Návrh technologie výroby a příprava funkčních vzorků.
3. Testování klíčových vlastností a následné porovnání s komerčně dostupnými vzorky, spolu se subjektivním hodnocením uživatelů
4. Závěrečné vyhodnocení experimentu

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

Seznam doporučené literatury:

KAMAL, Musa R., Avraam I. ISAYEV a Shih-Jung LIU, ed. *Injection molding: technology and fundamentals*. Munich: Hanser, c2009, xxviii, 926 s. Progress in polymer processing. ISBN 9781569904343.

CHANDA, Manas. *Plastics technology handbook*. Fifth edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, xxx, 1012 s. Plastics engineering series. ISBN 9781498786218.

DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 9788070807880.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Mañas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 7. února 2023

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Ondřej Vašků

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá problematikou výroby a testování valivého profilu. Teoretická část práce podává ucelený přehled v oblasti zvoleného valivého profilu – skateboardového kolečka s ohledem na navrženou technologii výroby, volbu materiálů a potenciální ekologickou šetrnost. V praktické části je hlavní pozornost směřována na předprodukční procesy výroby a samotnou výrobu funkčních vzorků valivých profilů. Závěrem jsou vzorky podrobeny testování klíčových vlastností spolu se subjektivním hodnocením uživatelů.

Klíčová slova: skateboardová kolečka, prototypové vstřikování, termoplastický polyuretan

## **ABSTRACT**

The thesis focuses on the production and testing of rolling profile. The theoretical part of the thesis gives a comprehensive overview of the chosen rolling profile - skateboard wheel with regard to the proposed production technology, choice of materials and potential environmental friendliness. In the practical part, the main attention is directed to the pre-production processes and the production of functional samples of rolling profile. Finally, the samples are subjected to testing of key properties together with subjective user evaluation.

Keywords: skateboard wheels, prototype injection molding, thermoplastic polyurethane

Touto cestou bych rád poděloval všem, kteří mi poskytli cenné rady, a především svůj čas při řešení diplomové práce.

Speciální poděkování patří panu Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za ochotu, vedení výrobního procesu, čas strávený při konzultacích v rámci vedení této diplomové práce a také za poskytnutí možnosti se věnovat vlastnímu tématu.

Dále bych chtěl jmenovitě poděkovat Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. a Ing. Cyrilu Hořavovi za čas a ochotu strávenou při výrobě formy. Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D. za 3D tisk prototypů koleček. V neposlední řadě Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za vzorný přístup, rady a čas strávený v rámci testování výrobků. Dalšími dík patří Mgr. Janu Rafajovi, Mgr. Pavlu Vyroubalovi a Vojtěchovi Vašků za pozitivní zpětnou vazbu a subjektivní zhodnocení koleček.

Největší díky patří mé rodině za morální a finanční podporu po celou dobu mého studia. Závěrem bych chtěl poděkovat své přítelkyni Bc. Pavlíně Srbové, která mi poskytovala neustálou podporu, povzbuzovala mě v těžkých chvílích a byla mou oporou po celou dobu studia. Děkuji ti za všechno, co jsi pro mě udělala a že jsem s tebou mohl sdílet tuto významnou životní etapu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 SOUHRN VÝSLEDKŮ PŘEDCHOZÍHO VÝZKUMU</b> .....	<b>12</b>
<b>2 VALIVÝ PROFIL – SKATEBOARDOVÁ KOLEČKA</b> .....	<b>13</b>
2.1 SKATEBOARDING .....	13
2.1.1 Historie skateboardingu .....	14
2.2 VÝVOJ SKATEBOARDOVÝCH KOLEČEK .....	15
2.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SKATEBOARDOVÝCH KOLEČEK.....	16
2.3.1 Průměr kolečka.....	17
2.3.2 Šířka kolečka .....	17
2.3.3 Tvrdost koleček .....	18
2.3.4 Kolečka bez jader (standardní)/s jádry .....	19
2.4 KOLEČKA NA DNEŠNÍM TRHU .....	20
<b>3 STÁVAJÍCÍ MATERIÁL SKATEBOARDOVÝCH KOLEČEK</b> .....	<b>21</b>
3.1 POLYMERY .....	21
3.2 POLYURETAN – STÁVAJÍCÍ MATERIÁL SKATEBOARDOVÝCH KOLEČEK.....	21
3.3 UNIVERZÁLNÍ, ALE KONTROVERZNÍ MATERIÁL OHROŽUJÍCÍ ZDRAVÍ A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ .....	22
3.4 PROBLEMATIKA RECYKLACE .....	23
3.5 SPECIFICKÁ KRITÉRIA .....	24
3.5.1 Pevnost .....	24
3.5.2 Odkok .....	24
3.5.3 Valivý odpor.....	24
3.5.4 Trakce.....	25
3.5.5 Odolnost proti oděru .....	25
3.5.6 Setrvačnost .....	25
3.5.7 Hystereze a přenos tepla.....	26
<b>4 ALTERNATIVNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>27</b>
4.1 VÝBĚR ALTERNATIVNÍCH MATERIÁLŮ.....	28
4.1.1 Výsledky koeficientu tření a opotřebení .....	29
4.2 UDRŽITELNÁ HLEDISKA.....	31
4.2.1 CO <sub>2</sub> stopa .....	32
4.2.2 Ztělesněná spotřeba energie .....	33
4.2.3 Ekonomická analýza .....	34
4.2.4 Výzkumný dopad .....	35
4.2.5 Další úvahy.....	35
4.3 POPIS ZVOLENÉ ALTERNATIVY TPU PRO PRAKTICKOU ČÁST PRÁCE .....	35
4.3.1 Vlastnosti.....	37

4.3.2	Mechanické vlastnosti .....	38
4.3.3	Tvrdość materiálu .....	38
4.3.4	Odolnost proti oděru .....	38
4.4	POPIS ZVOLENÉ ALTERNATIVY PC PRO PRAKTICKOU ČÁST PRÁCE.....	39
4.4.1	Hlavní vlastnosti polykarbonátu .....	39
<b>5</b>	<b>TECHNOLOGIE VÝROBY .....</b>	<b>41</b>
5.1.1	Skateboardová kolečka – Odlévání do statické formy .....	42
5.2	VSTŘIKOVÁNÍ.....	43
5.3	PROTOTYPOVÉ VSTŘIKOVÁNÍ .....	44
5.4	EKOLOGICKÁ ŠETRNOST .....	44
5.5	PROBLEMATIKA VSTŘIKOVÁNÍ PROFILŮ S TLUSTOU STĚNOU .....	45
5.6	VSTŘIKOVÁNÍ VERSUS 3D TISK .....	46
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>NÁVRH VALIVÉHO PROFILU.....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>PROTOTYPOVÁ TECHNOLOGIE VÝROBY .....</b>	<b>50</b>
8.1	3D TISK TPU .....	50
8.1.1	Vyhodnocení prototypů z TPU .....	51
8.2	3D TISK Z PC.....	52
8.2.1	Vyhodnocení prototypu z PC .....	52
<b>9</b>	<b>TECHNOLOGIE VÝROBY VSTŘIKOVÁNÍ.....</b>	<b>54</b>
9.1	ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ.....	54
9.1.1	Tloušťka stěn.....	55
9.1.2	Celkové smrštění .....	56
9.1.3	Plnicí tlak .....	57
9.1.4	Doba do dosažení vyhazovací teploty .....	58
9.1.5	Studené spoje a jejich teplota .....	58
9.1.6	Von Misesovo napětí.....	59
9.2	NÁVRH NÁSTROJE .....	60
9.2.2	Pohyblivá strana formy .....	62
9.2.3	Zbylé normalizované komponenty.....	64
9.3	VÝROBA TVAROVÝCH ČÁSTÍ FORMY .....	65
9.4	PROCES VSTŘIKOVÁNÍ TPU.....	66
9.4.1	Výsledky a úvahy .....	71
9.5	PROCESNÍ PARAMETRY PC .....	72
9.5.1	Výsledky a úvahy .....	74
<b>10</b>	<b>TESTOVÁNÍ .....</b>	<b>76</b>
10.2	TVRDOST.....	78



10.3	ÚBYTEK HMOTNOSTI .....	80
10.4	TOPOLOGIE POVRCHU .....	81
10.5	SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ UŽIVATELŮ .....	82
10.5.1	Hodnocení majitele skateshopu.....	83
10.5.2	Hodnocení profesionálního skateboardisty .....	84
10.5.3	Hodnocení amatérského skateboardisty .....	86
<b>11</b>	<b>ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....</b>	<b>87</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>89</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>100</b>

## ÚVOD

Valivý profil, v tomto případě skateboardové kolečka, je jedním ze základních komponent skateboardu. Skateboarding je poměrně mladý sport, a proto skateboardová kolečka prošla v posledních letech řadou změn v oblasti designu, materiálů a výroby. Dnes je skateboardová kultura rozšířena po celém světě a je stále více považována za jeden z nejvíce ikonických sportů této doby. To dokazuje neustále se zvyšující zájem o tento sport.

Diplomová práce se zabývá problematikou výroby a testováním tohoto valivého profilu. V rámci předešlého výzkumu je zvolenou technologií výroby vstřikování. To sebou nese potenciální výhody i nevýhody. Komerčně dostupná kolečka se vyrábí z polyuretanu a téměř vůbec se nedají recyklovat. Proces vstřikování s navrženými materiály tuto možnost nabízí. Mezi další možné výhody patří – zkrácení výrobního cyklu, zjednodušení výrobního postupu a automatizace procesu. Nevýhody zohledňují především souvislosti s faktem, že realizace vstřikování takto tlustostěnného profilu není standardní a tento proces je náchylnější k vadám na výrobku. Cílem této diplomové práce je tedy vyrobit funkční vzorky skateboardových koleček a následně testovat jejich klíčové vlastnosti.

Teoretická část diplomové práce nejprve hovoří o cílech a výsledcích předešlého výzkumu. Dále je podán ucelený přehled týkající se skateboardových koleček, jejich vývoje a dělení. Dvě následující kapitoly hovoří o materiálech stávajících a navrhovaných. U stávajícího materiálu jsou stěžejním tématem specifická kritéria, která jsou na materiál kladena a také témata ekologické šetrnosti. Alternativní materiály jsou voleny na základě charakteristických potřeb skateboardových koleček spolu s ohledem na udržitelná hlediska. Závěr teoretické části je věnován technologiím výroby. Nejprve je stručně popsána stávající komerční produkce a poté technologie navrhovaná s ohledem na prototypovou výrobu.

Na začátku praktické části práce je jako první popsána výroba prototypů ze dvou alternativních materiálů za pomoci 3D tisku. Po kladné odezvě je vyhodnocena analýza vstřikování valivého profilu a následně je přistoupeno k návrhu, výrobě a samotné produkci skateboardových koleček za pomoci technologie vstřikování. Po potřebné optimalizaci výrobního procesu je vyrobeno dostatečné množství vzorků. Vzorky jsou dále podrobeny testování klíčových vlastností spolu se subjektivním hodnocením uživatelů. Závěrem práce je celý experiment vyhodnocen a dosažené výsledky jsou porovnány s komerčně dostupnými kolečky.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 SOUHRN VÝSLEDKŮ PŘEDCHOZÍHO VÝZKUMU

Jelikož tato práce navazuje na práci bakalářskou, jsou níže stručně shrnuty její cíle a výsledky. Zvolený valivý profil – skateboardová kolečka se v komerční sféře vyrábí z polyuretanu odléváním, v široké škále možných tvrdostí a velikostí. Každý výrobce si střeží technologii výroby a poměr směsí odlévaného polyuretanu jako své know-how. Nabízela se tedy možnost zkoumat alternativní cesty výroby a následně je porovnat z ekonomického hlediska. V rámci toho byly navrženy dvě alternativní technologie výroby – tvarovací technologie (třískové obrábění) a tvářecí technologie (vstřikování). Spolu s tím byly navrženy dvě varianty skateboardových koleček z nichž byla vybrána pouze jedna.

Třískové obrábění – první alternativní technologie, byla realizována kompletně, včetně technologické optimalizace výrobního postupu, až po prototyp finálního produktu. Tato alternativa byla orientována na kusovou výrobou a bohužel ji provázely komplikace. Zvolený materiál nevykazoval při soustružení deklarované vlastnosti výrobcem a v důsledku toho se nedal řádně obrobit. V zájmu co nejvíce se přiblížit k navrženému tvaru výrobku, bylo přistoupeno k frézování.

Druhá alternativní metoda výroby – vstřikování byla zaměřena na sériovou výrobu. Byl navržen nástroj, a to sice idea konceptu vstřikovací formy a následně vypočteno ekonomické zhodnocení dvojnásobné vstřikovací formy se SVS a HVS. S ohledem na ojedinělost vstřikování takto tlustostěnného profilu zůstala tato problematika otevřená a zanechala v sobě široký potenciál na další zpracování.

Obě navrhované technologie byly vyhodnoceny z ekonomického hlediska, a ta byla vztažena na výrobní cenu jedné sady skateboardových koleček. Na jednotlivých výrobních cenách koleček se podepsal především fakt, že první navrhovaná alternativní cesta výroby počítala spíše s kusovou výrobou, kdežto druhá alternativa (vstřikování) se ubírala cestou sériové výroby. Výrobní cena za sadu skateboardových koleček byla vypočtena u metody třískového obrábění na částku okolo 2 000 Kč a u metody vstřikování na částku téměř desetinásobně nižší 181 Kč.

## **2 VALIVÝ PROFIL – SKATEBOARDOVÁ KOLEČKA**

Zvolený valivý profil pro tento navazující výzkum je skateboardové kolečko. To má několik specifických vlastností, které jsou pro provozování tohoto sportu nezbytné. Například potřeba, aby byla kolečka dostatečně měkká pro pohodlnou jízdu po nerovnostech, ale zároveň tvrdá pro zajištění maximální síly při odrazu od země. Je také důležité, aby kolečka měla dobrou přilnavost k povrchu při jízdě, ale aby byla zároveň schopna klouzat, když na ně působí určitá síla pod určitým úhlem. Kromě toho je nutné, aby byla lehká a odolná proti opotřebení. V neposlední řadě lze konstatovat, že skateboardová kolečka z polyuretanu přinesla záchranu skateboardingu před jeho možným zánikem a zvýšila jeho rozvoj a popularitu, až po jeho nedávné zařazení na olympijské hry. Skateboarding je mladý moderní sport, u kterého se jako zajímavé jeví využití nových výrobních technologií, které umožňují například ekologičtější přístup v rámci recyklace daného produktu. V mnoha směrech je historie vývoje skateboardingu historií vědy o materiálech, a proto tato kapitola hovoří o tomto sportu a zejména o skateboardových kolečkách a jejich historii.

### **2.1 Skateboarding**

Skateboarding je forma rekreace a sportu oblíbená prozatím především stále mezi mládeží, při níž člověk jezdí a provádí triky na skateboardu. Skateboarding je považován za jeden z tzv. extrémních sportů a uskutečňují se v něm soutěže v kategoriích vert a street. Vertikální skateboarding zahrnuje akrobacii prováděnou ve výškách okolo 10 m při vysokých rychlostech. Street style představuje triky prováděné ve skutečném nebo simulovaném městském prostředí se schody, zábradlím, lavičkami, dalšími překážkami. Skateboarding se vyvinul jako subkultura mládeže, která klade důraz na kreativitu a individualitu. Je alternativou k běžným týmovým sportům, které jsou formálněji organizované. Skateboarding je také spojen s kulturou a estetikou, která zahrnuje umění graffiti, street art, hudbu a další prvky. Například existuje velká řada rozvíjejících se umělců, kteří se specializují na tvorbu skateboardových designů a grafik. V roce 1998 jezdilo v USA téměř 6 milionů skaterů. V roce 2007 toto číslo vzrostlo na 10 milionů. V roce 2017 zprávy odhalují, že na celém světě bylo 85 milionů skateboardistů, z nichž 6,44 milionu jsou skateboardisté jen ze Spojených států. [1, 2]



*Obrázek 1 Ukázka skateboardingu – Mistr ČR ve skateboardingu z roku 2009 – Adam Lukas [3]*

### **2.1.1 Historie skateboardingu**

Není možné přesně určit začátek skateboardingu, je ale známo, že to začalo surfaři, kteří přemontovali kolečka z truckových bruslí na desky, aby si mohli užít pocit jízdy na vlnách i na pevnině. Tento nový sport byl v období mezi lety 1950–1960 označen jako "Sidewalk surfer". První náznaky dnešních skateboardů byly patentovány v roce 1962–1963 s plochými deskami a kolečky vyrobenými z oceli nebo hliněné keramiky. Skateboarding se rozvinul do mnoha disciplín, jako jsou freestyle, downhill, street, park. Po krizi skateboardingu na konci 60. let se polyuretanová kolečka stala řešením a umožnila vznik disciplín jako street a bowl, které se postupně staly vert disciplínou, což pro skateboarding znamenalo obrovský nárůst popularity. Revolučním milníkem bylo vynalezení triku ollie<sup>1</sup> v roce 1978 Alanem Gelfandem. Skateboarding se stal masovým sportem v 90. letech a byl populární po celém světě, především v disciplíně street. Nicméně pro mnoho lidí zůstává skateboardování hlavně zábavou a životním stylem. V roce 2021 byl skateboarding poprvé představen na letních olympijských hrách v Tokiu, což jen podtrhuje jeho rostoucí popularitu. [4, 5, 6, 7]

---

<sup>1</sup> Ollie je základním trikem skateboardingu, kdy jezdec používá nohy a tělo k tomu, aby vyskočil se svým skateboardem do vzduchu a zase ho přistál na zem. Tento trik je jedním z nejdůležitějších prvků skateboardingu a odvíjí se z něj mnoho dalších triků a kombinací.



*Obrázek 2 Skateboarding v 70. letech v Kalifornii [8]*

## **2.2 Vývoj skateboardových koleček**

Skateboardová kolečka prošla dramatickou evolucí od počátku 20. století, kdy byla převážně ocelová a poskytovala minimální přilnavost a nepohodlnou jízdu. Koncem 50. let se objevily první komerční skateboardy, ale stále převládala domácí výroba. V 60. letech byla vyvinuta keramická kolečka, která fungovala na skateboardu trochu lépe, ale nebyla to žádná velká změna. Frank Nasworthy vynalezl první polyuretanová kolečka po tom, co viděl experimentální verzi na bruslích u přítele svého otce. Tento materiál se ukázal jako ideální pro skateboardová kolečka a Nasworthy založil firmu Cadillac Wheels Company. Během roku 1975 prodala firma 10–20 000 sad skateboardových koleček měsíčně, ale konkurence brzy zdokonalila technologii výroby koleček a ložisek a značka Cadillac byla převálcována. V Československu, v dobách socialismu, bylo téměř nemožné dostat se ke komerčně vyráběným kolečkům, protože byla dostupná pouze v zahraničí. Na ilustraci níže lze vidět podomácky vyrobené skateboardové kolečko. To je vyrobeno z pryže, která původně sloužila jako tlumící mechanismus. Tento polotovár byl však velmi často nedostupný, a proto v této době vznikl fenomén – osoustružená kolečka z hokejových puků, která byla slepena za pomoci epoxidu. Těmto kolečkům se slangově říkalo „pukpaly“

a jejich funkční vlastnosti oproti tehdejším kolečkům ze zahraničí byly mizivé. Dnes jsou nejlepšími výrobci skateboardových koleček značky jako Bones, Powell-Peralta a Spitfire, které pečlivě střeží své směsi polyuretanových koleček a usilují o to, aby co nejlépe uspokojily potřeby uživatelů tohoto skvělého materiálu. [7, 9, 10]



*Obrázek 3 Podomácky vyrobené skateboardové kolečko za dob socialismu v Československu. [zdroj – vlastní]*

### **2.3 Základní rozdělení skateboardových koleček**

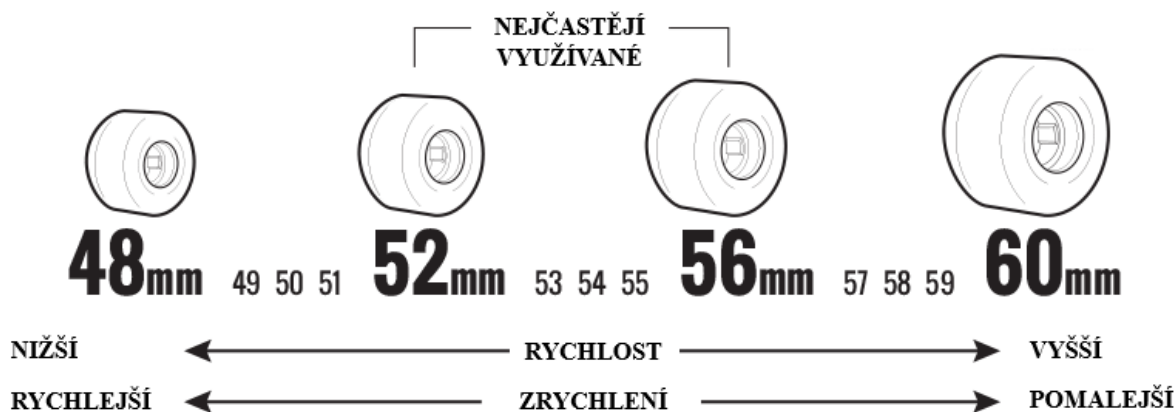
Jak již bylo zmíněno, skateboardová kolečka jsou jedním z nejdůležitějších prvků skateboardu a mají zásadní vliv na jeho jízdní vlastnosti. Existuje mnoho různých typů skateboardových koleček, která se liší tvarem, velikostí, tvrdostí a dalšími vlastnostmi. V neposlední řadě také designem, např. barevná kolečka obsahují barvivo, které se opotřebovává rychleji, než kdyby byl PU čistý. Bílá kolečka většinou neobsahují žádné barvivo, a proto dostávajíme nejčistší úroveň PU. Díky této informaci lze konstatovat, že jsou bílá kolečka odolnější, než ta barevná. Tato subkapitola bude zaměřena na základní rozdělení skateboardových koleček a také na porovnání hlavních rozdílů mezi jednotlivými typy koleček. Dále budou uvedeny dopady na jízdní vlastnosti skateboardu. Závěrem kapitoly budou popsány dva zástupci koleček na dnešním trhu.



### 2.3.1 Průměr kolečka

Skateboardová kolečka jsou dostupná v různých velikostech, zejména v průměrech, které jsou specifikovány v milimetrech. Obecně se pro skateboarding doporučují kolečka s průměrem 48–60 mm, nejčastěji využívané jsou však průměry 52–56 mm (viz. ilustrace níže). Větší kolečka jsou vhodnější pro disciplíny jako cruiser, nebo longboarding. Menší kolečka mají větší akceleraci a jsou lehčí, snadno ovladatelnější a kompatibilnější, což je vhodné pro disciplínu street. Větší kolečka jsou hůře ovladatelnější, ale více odolná a umožňují dosažení vyšších rychlostí, což je vhodné pro disciplíny vert, bowl a cruisery. Každá velikost kolečka má své výhody a nevýhody a měla by být vybírána podle požadovaného stylu jízdy a terénu, na kterém se uživatel pohybuje. Níže jsou uvedena jednotlivá rozpětí průměrů koleček, dle jejich vhodnosti ke konkrétním disciplínám. [7, 11 12]

- 48–52 mm – Malá, pomalejší kolečka; určena především pro street skateboarding.
- 52–56 mm – Střední koleček; určena pro; street, skatepark, bowl, mini rampu.
- 56–60 mm – Velká kolečka; určena pro disciplíny vert, bowl, cruiser.
- 60<sup>+</sup> mm – Longboardová kolečka; ve skateboardingu využívané např. filmaři. [12]

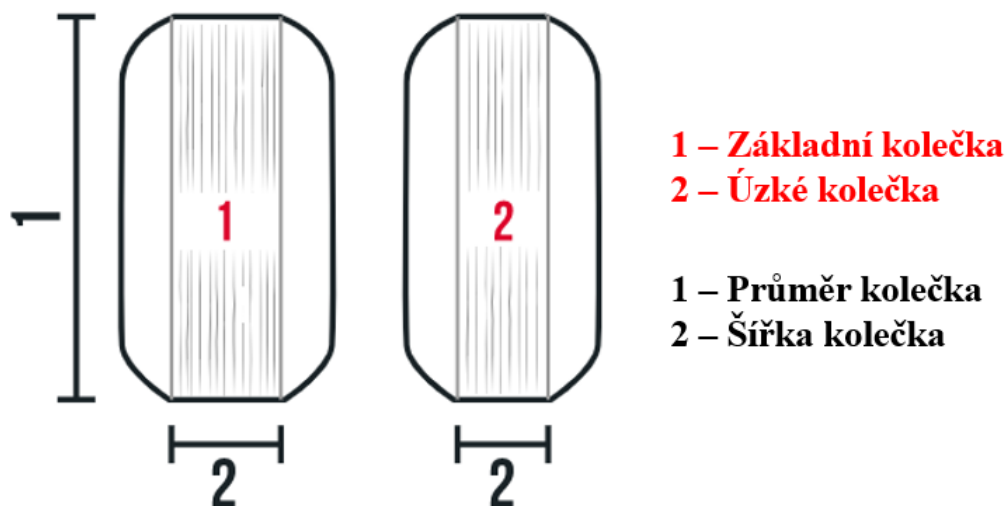


Obrázek 4 Rozdělení skateboardových koleček dle velikosti průměru [12]

### 2.3.2 Šířka kolečka

Důležitým faktorem u skateboardových koleček je také jejich šířka. Ta je důležitá pro zajištění optimálního kontaktu kolečka se zemí. Širší kontaktní plocha může poskytnout větší stabilitu a kontrolu při rychlejší jízdě a při zatáčení. Na druhé straně, užší kontaktní plocha snižuje tření s povrchem, což umožňuje snazší provedení technických triků

a akrobatických kousků v disciplíně street. V případě větší kontaktní plochy se zvětšuje plocha distribuce zatížení, což snižuje množství komprese materiálu v kolečkách a důsledkem toho se snižuje valivý odpor, což zlepšuje výkon kolečka. Existují tedy dva základní rozměry kontaktní plochy: základní – 18–24 mm pro disciplíny jako skatepark, bowl a vert, a úzké – 15–17 mm pro minimalizaci tření v disciplíně street (viz. obr. 5). Hrany koleček mohou být zkosené, podkosené nebo s rádiem. [7, 12]



Obrázek 5 Rozdělení skateboardových koleček dle šířky [7]

### 2.3.3 Tvrdost koleček

Tvrdost skateboardových koleček se obvykle měří metodou dle Shore, která spočívá ve vtlačování zkušebního tělesa do kolečka. Existuje více stupnic s různými typy vnikajícího tělesa a velikostí zatížení, ale pro skateboardová kolečka stačí obvykle stupnice A. Konkrétní norma pro toto měření je ASTM D2240. Některá kolečka mohou mít tvrdost vyšší než 100ShA, a to je v rozporu s normou, protože maximální hodnota stupnice A je 100. Ve světě skateboardingu se tato kolečka značí jako 101A, 102A, 103A, 104A. Ve skutečnosti je ovšem kolečko o tvrdosti 102A tvrdost dle Shore 82 ShB. Tvrdost koleček se pohybuje v rozmezí 73 ShA – 84 ShB. Obecně řečeno, tvrdší kolečka jsou rychlejší, ale více kluzká, zato měkčí kolečka jsou pomalejší, ale mají větší přilnavosti. Měkčí kolečka jsou vhodnější pro street skateboarding. Tvrdší kolečka jsou lepší na hladké povrchy, jako jsou skateparky. Někteří výrobci dokonce svá kolečka speciálně navrhují pro konkrétní použití. Například kolečka Bones STF Formula a Spitfire F1 Street Burner jsou navržena speciálně pro street, zatímco kolečka Bones SPF Formula a Spitfire F1 Park Burner jsou určena

do skateparků. Některé značky také experimentují s kolečkem s dvojitou tvrdostí. V těchto případech může mít vnitřní strana kolečka jeden standard tvrdosti, zatímco vnější strana kolečka jiný. Tento postup často umožňuje dosáhnout větší rychlosti a odolnosti skateboardových koleček, protože jim dává kombinaci pevností z obou konců spektra tvrdosti. Podrobné informace jsou uvedeny v tabulce 1. [12,13]

*Tabulka 1 Dělení skateboardových koleček dle tvrdosti [12]*

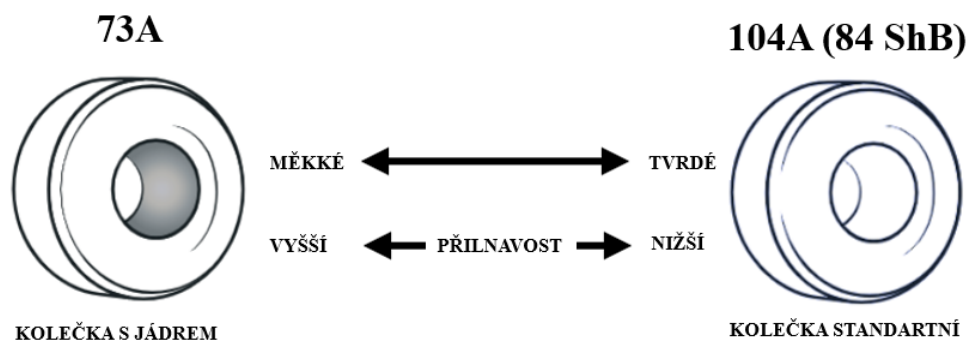
Druh koleček	Tvrdost koleček	Popis
Extra měkká	73–87 ShA	Kolečka určená pro longboardy, cruizery; mají dostatek přilnavosti, a tudíž jsou ideální pro tlumení nárazů na drsném povrchu.
Měkká	88–95 ShA	Kolečka stále dostatečně měkká; tato řada je ideální pro street skateboarding.
Středně tvrdá	96–99 ShA	Ideální pro hladké povrchy jako betonové skateparky; tato kolečka poskytují dobrou přilnavost a střední rychlost. Ideální varianta koleček pro začátečníky.
Tvrdá	100–104 ShA (84 ShB)	Nejrychlejší a nejtvrdší kolečka; mají nejmenší přilnavost a jsou ideální pro technický skateboarding. Kolečka určené pro profesionály.



*Obrázek 6 Rozdělení skateboardových koleček dle tvrdosti [12]*

#### 2.3.4 Kolečka bez jader (standardní)/s jádry

Dále existují dva typy skateboardových koleček – bez jader (standardní) a s jádry. Standardní kolečka jsou vyrobená z jednoho kusu polyuretanu a jsou tvrdší, což je vhodné pro zkušené jezdce a disciplíny jako street, skatepark, bowl a vert. Jejich tvrdost se pohybuje mezi 90–100 ShA a 83–84 ShB. Na druhé straně jsou kolečka s jádry měkčí (72–90 ShA) a mají vložku z tvrdšího polymeru pro ložiska. Díky této vložce jsou lehčí, ložiska zůstávají bezpečně na svém místě a nemohou být vytlačeny. Tyto kolečka se používají především pro cruizery a longboardy. [7]



Obrázek 7 Rozdělení skateboardových koleček dle jader [7]

## 2.4 Kolečka na dnešním trhu

Na trhu existuje jen několik předních výrobců skateboardových koleček. Jako příklad zde bude uvedena řada koleček od firmy Spitfire. Tato firma má velmi oblíbenou řadu koleček Formula Four, u které jsou extrémně odolná kolečka vůči tvorbě plochých míst a opotřebení těchto koleček má pomalejší trend, než je tomu u koleček ostatních. Tato kolečka se řadí mezi jedny z nejrychlejších a jsou vhodná pro street i skatepark. Modely řady Formula Four jsou prodávány v šesti různých tvarech a jsou k dispozici v tvrdostech 99A a 101A. Níže jsou zobrazeny dva příklady koleček z této řady. Kolečka Spitfire Formula Four Classic Shape mají podobný tvar jako většina ostatních skateboardových koleček na trhu. Tento osvědčený tvar nabízí vysokou rychlost a úzkou kontaktní plochu, což z nich dělá skvělou volbu pro všestranné použití. Kolečka pro skateboard Spitfire Formula Four Lock In Shape mají netradiční asymetrický tvar, kde vnější strana má kónický profil a vnitřní strana je vykrojena do rovné hrany. Tento speciální tvar umožňuje přesné přilnutí koleček k obrubníkům a zábradlím, což je ideální pro lepší ovládání a stabilitu při street skateboardingu.



Obrázek 8 Dva zástupci skateboardových koleček z řady Formula Four Spitfire [7]

### **3 STÁVAJÍCÍ MATERIÁL SKATEBOARDOVÝCH KOLEČEK**

V této kapitole je nejprve uvedena teorie k pojmu polymery, jakož to k materiálům v oblasti skateboardových koleček. Dále se kapitola dostává k jádru věci a hovoří o stávajícím materiálu (PU) skateboardových koleček a jeho negativěch, která se týkají především otázek ekologie. Dále jsou uvedena specifická kritéria, která jsou na materiál kladena.

#### **3.1 Polymery**

Molekuly jsou tvořeny skupinami atomů, které mezi sebou mají silné vazby, ale relativně slabé vazby k sousedním molekulám. Voda ( $H_2O$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), oxid uhličitý ( $CO_2$ ) aj. jsou typickými příklady malých molekul. Polymery se skládají z tisíce až milionů atomů v molekule, která je velká a nazývá se makromolekula. Spojením velkého počtu makromolekul dostaneme monomer. Polymery si můžeme představit jako velké budovy a monomery jako cihly, ze kterých se tyto budovy staví. Monomery jsou obvykle jednoduché organické molekuly obsahující dvojnou vazbu, nebo minimálně dvě aktivní funkční skupiny. Přítomnost dvojně vazby, nebo aktivních funkčních skupin působí jako hnací síla, která opakovaně přidává jednu molekulu monomeru na druhou a vytváří tak molekulu polymeru. Tento proces přeměny molekul na polymery je znám jako polymerace. Polymery se dělí do čtyř hlavních skupin:

- termoplasty,
- elastomery,
- reaktoplasty,
- termoplastické elastomery.

Makromolekulární struktury rozlišují třídu každého plastového materiálu, stejně jako jeho fyzikální vlastnosti. Elastomery a reaktoplasty mají měkkou a tvrdou složku a nelze je tavit za účelem recyklace. [14, 15]

#### **3.2 Polyuretan – stávající materiál skateboardových koleček**

V ideálním případě se jedná o materiál, který je lehký, extrémně pevný, odolný, má dobrou přilnavost (za mokra i za sucha) a je snadno a levně vyrobitelný. V současné době je polyuretan stále hlavním materiálem používaným při výrobě skateboardových koleček,

protože splňuje všechny vyjmenované vlastnosti. Navíc může být vyroben v různých tvrdostech a po smíchání s pigmenty dostáváme širokou škálu velikostí, tvarů a barev. Přední výrobci skateboardových koleček používají různé složení polyuretanových směsí, které mají vliv na výsledné vlastnosti kol. Jak již bylo uvedeno, bohužel neexistují téměř žádné informace o těchto poměrech směsí a jejich parametrech zpracování, výrobci si je střeží jako své know-how. Je tedy možné, že kolečka od jednoho výrobce se budou chovat odlišně, než kolečka od výrobce druhého i přesto, že mají stejné specifikace parametrů jako tvrdost, průměr atd. [7, 19, 20]

Všechny různé druhy PU vznikají chemickou reakcí mezi diisokyanátem a polyolem. V závislosti na zvolených výchozích materiálech (existuje široká škála diisokyanátů a polyolů, které lze kombinovat), se vlastnosti konečného produktu budou lišit. Jak již bylo několikrát uvedeno PU kolečka nabízí hladkou jízdu a lepší kontakt s povrchem, navíc jsou velmi odolné a neztrácejí svůj tvar, nabízejí vysokou nosnost a odolnost proti oděru. Díky tomu se stal skateboarding bezpečnější a zvýšila se jeho popularita.

Nicméně použitý PU je obtížně recyklovatelný a s ubývajícími zdroji a ekologickými problémy, kterým dnešní svět čelí, se recyklace stala důležitým aspektem budoucí udržitelné společnosti. Navíc celková produkce spotřeby plastů den ode dne roste a objevují se nové a přísnější zákony týkající se recyklace. O této problematice dále hovoří subkapitola. [20, 21]

### **3.3 Univerzální, ale kontroverzní materiál ohrožující zdraví a životní prostředí**

Polyuretan je jedním z nejuniverzálnějších materiálů na světě. Může být vyráběn v různých formách a používán na různých trzích. V celosvětové produkci polymerů se v roce 2018 umístil na šestém místě s globálním trhem 65,5 miliard dolarů. Očekává se, že tento trh do roku 2025 dosáhne 105,2 miliardy dolarů. Polyuretan však představuje obavy z hlediska životního prostředí a lidského zdraví v různých bodech svého životního cyklu. Stejně jako většina ostatních plastů, je i tento všestranný polymer vyroben z fosilních paliv a při jeho výrobě se uvolňují skleníkové plyny. Nicholson a kolektiv uvedli, že roční emise skleníkových plynů z výroby polyuretanu v USA se odhadují na 7,8 milionů metrických tun. Kromě toho jsou methyldifenyldiisokyanát (MDI) a toluendiisokyanát (TDI), dva z hlavních prekurzorů polyuretanu, klasifikovány jako karcinogenní, mutagenní a toxické

pro reprodukci a při dlouhodobé expozici mohou způsobit zdravotní problémy. Na konci své životnosti se polyuretanové výrobky většinou spalují nebo ukládají na skládky, což vytváří nežádoucí účinky na životní prostředí, jako je spotřeba půdních zdrojů a emise toxinů a skleníkových plynů. [22]

### 3.4 Problematika recyklace

Od konce 19. století jsou plastové materiály schopné konkurovat většině běžně používaných materiálů v aplikacích, kde jejich použití bylo ještě nedávno nemyslitelné. Klíčovým faktorem úspěchu plastových materiálů je schopnost modifikovat jejich vlastnosti podle potřeb různých aplikací. S nárůstem spotřeby zboží se množství odpadu z domácností stalo pro ekonomiky světa velkým problémem. Mezi další podněty k opětovnému použití plastů patří ochrana zdrojů, protože plasty představují 4 % celosvětové spotřeby ropy a s rostoucím nedostatkem zdrojů se tyto náklady pravděpodobně zvýší.

Udržitelný rozvoj společnosti by měl být spojen s racionálním a efektivním využíváním petrochemických a biologických zdrojů. V případě polyuretanového odpadu je nejdůležitější efektivní sběr a efektivní recyklace mechanickými a chemickými metodami, pokud to daný druh PU dovoluje. Vyplývá to z požadavků spojených s předcházením znečištění a ochranou životního prostředí. Navíc opětovné použití a recyklace plastů může snížit náklady na výrobu nových produktů a zlepšit využití odpadních materiálů. Problém způsobují polyuretanové elastomery a odpady termoplastů (z konstrukčních dílů nebo obuvi). Využitím polyuretanových odpadů tepelným rozkladem (např. spalováním) dochází k produkci jedovatých plynů, které jsou nebezpečné z hlediska životního prostředí a lidského zdraví. Obavy z rostoucího množství každoročně produkovaného plastového odpadu vedly k rozvoji metod recyklace polymerů. Dle literatury existují dva hlavní způsoby recyklace polyuretanového odpadu: [15, 21]

- Fyzikální metody recyklace
- Chemické metody recyklace

Fyzikální recyklace je přímé opětovné použití polyuretanového odpadu bez chemické úpravy. Chemická recyklace je realizována degradací chemických struktur polymerů, v případě polyuretanu je to dosaženo pomocí polykondenzace nebo polyadice. Jedním z hlavních problémů recyklace plastů je fakt, že když je plast recyklován, jeho vlastnosti se často zhoršují. Například ty mechanické

se snižují, což je důvod, proč se recyklované plasty běžně používají spíše v méně náročných aplikacích než původní produkt vyrobený z původního materiálu. Navíc je obtížné zaručit materiálové vlastnosti těchto recyklovaných materiálů, takže si konstruktéři musí být vědomi omezených konstrukčních limitů. Recyklované plasty se používají v různých aplikacích, jako jsou automobily, domácí potřeby, obaly a stavebnictví, zkrátka tam, kde požadavky na výkon nejsou příliš vysoké. Tyto aplikace však nemohou plně pokrýt množství plastového odpadu produkovaného ročně, a proto je třeba hledat nové způsoby využití. [15, 21]

### **3.5 Specifická kritéria**

I přes výše uvedená negativa tento polymer splňuje níže uvedená kritéria, která jsou mnohdy protichůdná. V ideálním případě by tyto vlastnosti měl vykazovat i navrhovaný alternativní materiál. Všechna níže uvedená kritéria přímo souvisí s tvrdostí kolečka, která je specifikována již výše (viz kapitola 2.3.3).

#### **3.5.1 Pevnost**

Kolečko s vysokou pevností bude mít tendenci odolávat delaminaci (např. poruše lepeného jádra), rozšíření otvorů na ložiska, roztržení, odlomení a jakýmkoli kombinacím výše uvedených vlastností za všech podmínek zatížení. [23]

#### **3.5.2 Odskok**

Odskok je specifickou vlastností polyuretanové směsi. Návratnost energie je přímo úměrná rychlosti a živosti kolečka. Pro měření odskoku se používá speciální vzorek polyuretanové směsi, na který se upustí malé tvarované těleso z určené výšky a měří se výška, do které se těleso odrazí. Odskok směsi se vyjadřuje v procentech jako výška zpětného vrhu nad počáteční výškou pádu (Bashore Rebound ASTM: D2632-96). Směs s vysokým odskokem, nízkou výškou bočnic kolečka a konstrukcí s jádrem poskytuje nejvyšší energetický zisk. Zlepšení geometrie tvaru bočnic může tuto návratnost energie ještě zvýšit. [23]

#### **3.5.3 Valivý odpor**

Valivý odpor kolečka na daném typu terénu závisí na součiniteli tření mezi kolečkem a terénem, styčné ploše kolečka, velikosti (šířce a průměru styčné plochy) kolečka a hladkosti terénu. Tření je zde nepřímo úměrné tvrdosti (Shore A a D) materiálu.



Do určitého bodu se tvrdší kolečko bude odvalovat s menším odporem než kolečko měkké. Tento vztah se však rozchází s rostoucími nerovnostmi terénu. V tomto bodě má měkkčí kolečko tendenci odvalovat se snadněji, protože pohlcuje nerovnosti. Širší kolečko bude mít větší stopu, a tudíž bude také mít větší tření než úzké kolečko. Kolečko s větším průměrem bude mít také nižší hodnotu valivého odporu. [23]

#### **3.5.4 Trakce**

Postranní trakce je odolnost kolečka proti uvolnění v důsledku působení velkých bočních sil, tzn. při zatáčení. Boční trakce závisí na směsi a geometrii kolečka. Jak již bylo uvedeno dříve, měkké směsi mají mnohem větší tření než tvrdé směsi. Právě toto tření způsobuje, že kolečka v zatáčkách drží. Problémem je, že měkké směsi se také hodně deformují. Tato deformace může způsobit, že stěna kolečka při působení velkých bočních sil se na okamžik prohne. Když k tomuto dojde, ztratíme 100 % veškeré trakce a kolečko začne prokluzovat. Nižší stěna kolečka tuto situaci může napravit, protože při stejné síle působící na menší kolečko se zmenšuje rameno kroutícího momentu. Tento problém se řeší např. u pneumatik s nízkým profilem u závodních vozů. Dalším zlepšením pro přínos stabilní trakce může být zdokonalení geometrie kolečka, tj. rádius na hranách koleček. Rádius na hranách kolečka umožní lepší průběh zatáčení na nerovném povrchu, zatímco kolečka s ostrými hranami mají spíše tendenci se na nerovném povrchu zadržovat a přeskakovat, což vede k celkové ztrátě trakce. V poslední řadě nelze opomenout, že zvýšené tření vede k zahřívání kolečka, což může v extrémních podmínkách, například při sjezdu z kopce (longboarding), skončit až jako roztavené kolečko. [23]

#### **3.5.5 Odolnost proti oděru**

Odolnost proti oděru je výhradní vlastností polyuretanových směsí. Tvrdší směsi jsou obvykle odolnější proti oděru než měkkčí, ale do směsi lze přimíchat určité modifikátory, kterými se tato odolnost mění. [23]

#### **3.5.6 Setrvačnost**

Setrvačnost je tendence kolečka setrvávat v ustáleném stavu, ať už v klidu, nebo při otáčení danou úhlovou rychlostí. Kolečka s velkou setrvačností se chovají jako setrvačnick, tj. mají tendenci pomalu zrychlovat nebo pomalu zpomalovat, protože je připraveno ukládat energii. Nejmenší rotační setrvačnost budou mít celistvá jednodílná kolečka (standardní) s malým

průměrem, zatímco kolečka s jádrem, s velkým průměrem a s velkou boční stěnou budou mít setrvačnost největší. [23]

### **3.5.7 Hystereze a přenos tepla**

Skateboardová kolečka pracují při vysokých otáčkách a při velkých radiálních zatíženích, důsledkem čehož je produkce značného množství tepla. Tento jev se nazývá hystereze. Pokud teplo není účinně odváděno, může to způsobit, že se teplota kolečka přiblíží teplotě tání materiálu a kolečka se roztaví. Předtím než se začne kolečko tavit, dojde k výraznému zhoršení mechanických vlastností materiálu. S nárůstem tepla postupně dojde k roztržení, trhání, delaminaci, měknutí a tečení. Přenos tepla také souvisí se schopností kolečka odvádět nahromaděné teplo pryč z hmoty. Čím větší je hmotnost kolečka, tím je to obtížnější, protože polyuretan je sám o sobě špatným vodičem tepla. Standardní kolečka v tomto ohledu tedy vykazují horší vlastnosti než kolečka s jádrem, která jsou většinou z materiálů na bázi hliníku, a tak mají tendenci dobře odvádět teplo z polyuretanu. [23]

## 4 ALTERNATIVNÍ MATERIÁLY

V návaznosti na úvod předchozí kapitoly, kde je vysvětlen pojem polymer, jsou níže uvedeny dvě základní skupiny polymerů – termoplasty a termoplastické elastomery. Do těchto skupin materiálů spadají navrhované alternativní materiály a jsou specifické tím, že je lze snadno tavit za účelem recyklace. Dále jsou zvoleny a popsány dvě materiálové alternativy pro praktickou část práce. Podle kritérií v kapitole 3.5 jsou dále navrženy tři ekologicky šetrnější materiálové alternativy (PC, PE, HDPE) ze skupiny termoplastů. Na základě tribologického výzkumu dle zdroje [14] je pro praktickou část práce vybrána jedna nejvhodnější varianta. Druhá materiálová alternativa (TPU) zapadá do zvolených specifických kritérií a je s ní počítáno v praktické části práce na základě předešlého výzkumu autora. TPU spadá do skupiny termoplastických elastomerů. Cílem praktické části práce je vyrobit funkční vzorky koleček z obou materiálových alternativ a následně je porovnat.

### **Termoplasty**

Termoplasty jsou buď amorfni nebo semikrystalické. Amorfni polymery mají neuspořádaně orientované makromolekuly, zatímco semikrystalické polymery mají makromolekuly téměř uspořádané. Termoplasty mají lineární uspořádání řetězců, které jsou spojeny slabými sekundárními vazbami. Sekundární vazby drží sousední makromolekuly pohromadě a jsou přímým výsledkem vzniku molekulových dipólů po celé délce polymerního řetězce. Sekundární vazby jsou mnohem slabší než primární vazby, a proto mnoho termoplastů vykazuje nižší teplotu tání, tuhost a pevnost. Typickými amorfními polymery jsou polykarbonát (PC), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), kdežto typickými semikrystalickými pryskyřicemi jsou polyamid (PA) a polypropylen (PP). Mezi typické metody zpracování termoplastů patří vstřikování, vyfukování, 3D tisk nebo vytlačování. [15, 16]

### **Termoplastické elastomery**

Rozmanitá skupina materiálů nazývaná termoplastické elastomery (TPE) se svými užitnými vlastnostmi podobá pryži, kterou lze na rozdíl od konvenčních elastomerů nebo reaktoplastů zpracovávat a recyklovat jako termoplast. Při pokojové teplotě se TPE chovají stejně jako elastomer (mají velikou pružnost a jsou schopné odolávat deformacím). Za pomoci teploty lze však tento materiál roztavit a opakovaně mu udávat tvar technologiemi jako je např. vstřikování, lisování, aj. Termo značí "tepelný", plast označuje materiál, který lze formovat do různých tvarů a elastomer znamená

"pružný materiál". TPE obecně obsahuje více než 50 % elastomeru. Všechny elastomery jsou zesíťovány, a proto je jejich zpracování komplikované. Mnoho TPE jsou kopolymery, což znamená, že jsou složeny z dvou různých složek (monomerů). Jedna z těchto složek je elastomer a druhá je jiný polymer. Existují dva hlavní typy TPE – ionomery a blokové kopolymery. Ionomer je polymer, který má na hlavním řetězci malý počet iontových skupin. Blokový kopolymer je polymer, který má více než jednu sekci nebo blok. [17, 18]



*Obrázek 9 Vlevo – typické výrobky z termoplastů. Napravo typické výrobky z TPE [17]*

#### **4.1 Výběr alternativních materiálů**

Jak již bylo uvedeno, tato kapitola přináší čtyři materiálové alternativy se společným aspektem, a to sice snadnější možnosti recyklace valivého profilu. Je zřejmé, že uvažované materiály spadají do skupin termoplastů nebo termoplastických elastomerů. Před volbou samotných alternativních materiálů je zapotřebí zvážit jejich vlastnosti. Ty by se měly co nejvíce podobat materiálu stávajícímu, tj. polyuretan (reaktoplast). V neposlední řadě by bylo v rámci ekologických otázek vhodné, aby se kandidátské polymery pokud možno hojně vyskytovaly v toku odpadů a byly co nejvíce dostupné. Tabulka 2 níže popisuje tři vybraná kritéria: hustotu, Youngův modul a Poissonův poměr materiálu stávajícího a navrhovaných materiálů. Navrhované materiály PC, PE, HDPE jsou vybrány na základě tribologického výzkumu dle zdroje [14]. Z těchto tří alternativ je vybrána jedna pro praktickou část práce. Druhá materiálová alternativa (tabulka 3) poukazuje na podobnost s materiálem stávajícím, tím pádem zapadá do zvolených specifických kritérií a je s ní počítáno v praktické části práce na základě předešlého výzkumu autora.

Tabulka 2 Vybrané vlastnosti materiálů [13]

	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Youngův modul [MPa]	Poissonův poměr
PU	1 040 – 1 060	4 090 – 4 300	0,375 – 0,391
PC	1 140 – 1 180	2 210 – 2 400	0,392 – 0,408
HDPE	952 – 965	1 070 – 1 090	0,41 – 0,427
PP	897 – 906	1 180 – 1 410	0,402 – 0,41

Tabulka 3 Vybrané vlastnosti materiálu zvoleného na základě předešlého výzkumu [27]

	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Youngův modul [MPa]	Poissonův poměr
TPU	1 020 – 1 120	2 020 – 2 401	0,3897

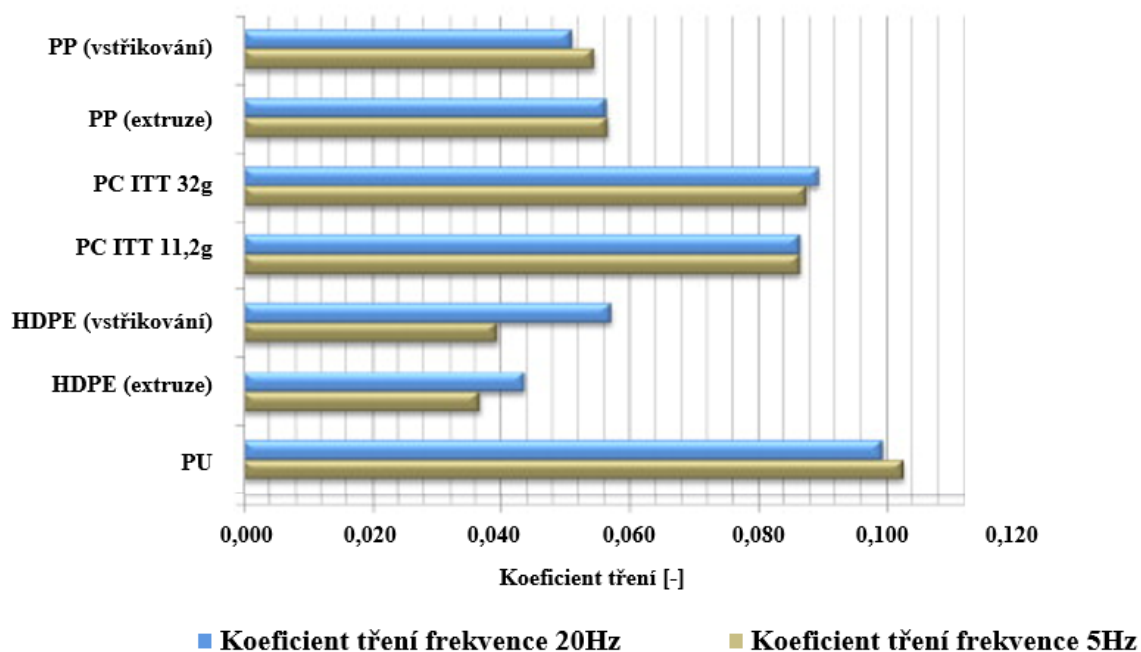
#### 4.1.1 Výsledky koeficientu tření a opotřebení

Zdroj [13] popisuje výsledky řady testů provedených za cílem zjistit, zda recyklované polymery mohou nahradit PU kolečka ve skateboardingu. Testy se zabývají měřením opotřebení a tření proti typickému asfaltovému povrchu při očekávaných tlacích a rychlostech. Zkoušky jsou navrženy tak, aby testovaly úzká místa. Ty spočívají v simulaci situace, kdy kolečko začne za jízdy prokluzovat viz. kapitola 3.5. Tato situace tedy určuje minimální poloměr zatačení, aniž by se kolečko dostalo do smyku. V důsledku provedených testů tření a opotřebení se ukázalo, že PC by mohl být potenciálním materiálem pro náhradu PU koleček používaných na skateboardu. [13, 20]

#### Koeficient tření

Všechny testované materiály vykazují konzistentní hodnoty koeficientu tření pro různé simulované podmínky s nízkými hodnotami směrodatné odchylky (max 0,008), což dokazuje, že získané hodnoty se významně neliší. Bylo rozhodnuto zkoušet materiály při frekvencích 5 Hz a 20 Hz, což v kombinaci se zdvihem 5 mm odpovídá posuvovým rychlostem 0,05 a 0,2 m/s. Je předpokládáno, že první simulace by simulovala normální zatačení při běžné rychlosti a velkém poloměru zatačky, zatímco druhá simulace – prudké zatačení, by simulovala prokluz kolečka důsledkem vysoké rychlosti anebo malého poloměru zakřivení zatačky. Výsledky koeficientu tření na speciálně upraveném tribometru Plint TE57 ukazují, že komerčně dostupná PU kolečka se pohybují v rozmezí 0,1 – 0,15 (viz obrázek 10). Aby se recyklovatelné polymery mohly stát životaschopnou alternativou, musí se těmito hodnotám alespoň přiblížit. Testované vzorky

PC splňují specifikace tření, protože jeho hodnoty se pohybují okolo 0,09. Ostatní testované recyklovatelné polymery nesplňují specifikaci tření a vykazují typické hodnoty 0,04 – 0,05. Testy dále vykazují stabilní tření každého materiálu spolu s konzistentními hodnotami při všech testovaných podmínkách. Z toho vyplývá, že kolečka by mohla vykazovat stabilní výkon, aniž by docházelo k výrazným změnám v zatížení a rychlosti, které by mohly způsobit neovladatelnost skateboardu. V poslední řadě tyto zkoušky vykazují, že třecí síla je úměrná působícímu zatížení, což naznačuje, že se jedná převážně o kohezní a abrazivní mechanismus. [13, 20]



Obrázek 10 Průměrné hodnoty koeficientu tření – 5 a 20 Hz [13]

## Opotřebení

Při zkouškách opotřebení se měří hmotnost vzorku před zkouškou a po ní tak, aby se vyhodnotil úbytek hmotnosti. Koeficient opotřebení se pak vypočítá podle rovnice (1):

$$W = k \cdot F \cdot L = k \cdot F \cdot v \cdot t \quad (1)$$

Kde  $W$  je objem opotřebení [ $\text{mm}^3$ ],  $k$  je koeficient opotřebení [ $\text{mm}^3/\text{Nm} \cdot 10^{-8}$ ],  $F$  je kontaktní síla [ $\text{N}$ ],  $v$  je rychlost [ $\text{m/s}$ ] a  $t$  je uplynulý čas [ $\text{s}$ ].

Zkoušky opotřebení při kluzu probíhaly po dobu 12 hodin, a to při dvou velikostech přitlačné síly a kluzné rychlosti. Díky tomu bylo opotřebení dostačující pro vyhodnocení testů. První simulace proběhla při frekvenci 5 Hz se zatížením 20 N. Druhá simulace při frekvenci 10 Hz a zatížení 30 N. Tyto frekvence při zdvihu 5 mm v tribometru a délce trvání zkoušky 12 hodin dávají celkovou kluznou vzdálenost 2 160 m a 4 320 m. Kontaktní síly 20 a 30 N odpovídají kontaktním tlakům 0,25 MPa a 0,4 MPa.

Povrch vzorků byl také snímán pomocí interferometru, aby bylo možné pochopit přítomné mechanismy opotřebení. Ty ukázaly, že dominantním mechanismem je abrazivní opotřebení. Snímky z interferometru ukazují, že povrch po provedení zkoušek vykazuje paralelní drážky ve směru skluzu. Rovněž také bylo zaznamenáno zvýšení drsnosti povrchu. [13]

*Tabulka 4 Výsledky koeficientu opotřebení [13]*

	Koeficient opotřebení [ $\text{mm}^3/\text{Nm} \cdot 10^{-8}$ ]		
	PU	PC ITT 11,2 g	PC ITT 32 g
<b>12 hodin: 5 Hz - 20 N</b>	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-4}$
<b>12 hodin: 10 Hz - 30 N</b>	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$4,14 \cdot 10^{-4}$

## 4.2 Udržitelná hlediska

V této subkapitole figuruje předpoklad, že by se skateboardová kolečka vyráběla z recyklátu, neboli z materiálu, který už byl prvotně použit za jiným účelem. V níže uvedených výsledcích není zahrnut materiál TPU z důvodu difference zdrojů.

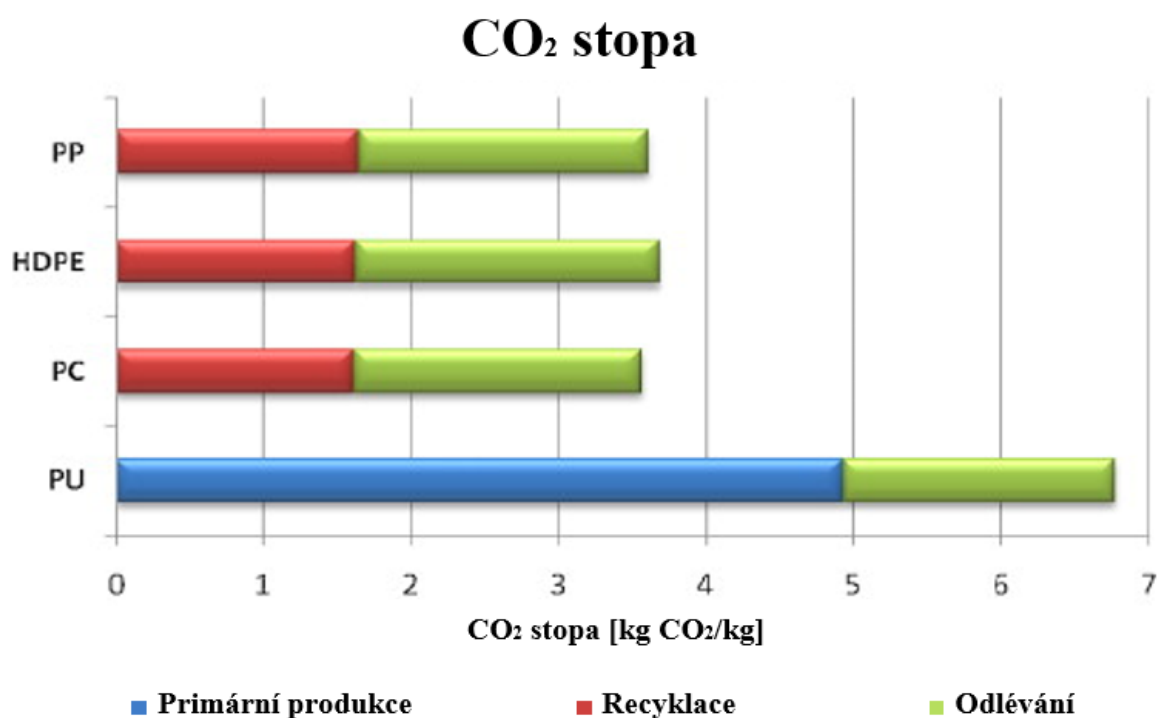
Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.4, je naprosto nezbytné, aby se přírůstek celkového množství recyklovaných plastů zvyšoval. Recyklace plastů má mnoho udržitelných výhod, včetně snížení stopy  $\text{CO}_2$ , snížení ztělesněné spotřebované energie a zachování ropných zdrojů (většina plastů je vyrobena ze surové ropy, což představuje 4 % celkové spotřeby ropy). Celkové množství odpadu, který jde na skládky a do spaloven, lze navíc výrazně snížit recyklací vhodných materiálů. Například s využitím recyklovaných plastů navržených v této studii k nahrazení PU koleček lze dosáhnout několika ekologických výhod a také významného snížení nákladů na produkt, protože cena recyklovaných plastů je mnohem nižší než cena PU (viz. kapitoly níže). [20]

Uvědomíme-li si, že je na světě více než 50 milionů uživatelů skateboardu, tak množství vyrobených koleček je vysoké. Za předpokladu, že každý skateboardista použije průměrně

jednu sadu koleček za rok (jedna sada obsahuje 4 kolečka), znamená to, že se ročně vyrobí minimálně 200 milionů koleček. Každá sada koleček má průměrnou hmotnost 0,85 kg, takže při výrobě skateboardových koleček se na celém světě ročně spotřebuje celkem 42 500 tun PU. Při takovém množství vyrobeného polyuretanu je množství vyprodukovaného CO<sub>2</sub> obrovské. Je důležité si uvědomit, že tento údaj nezahrnuje použití podobných koleček na koloběžkách, kolečkových bruslích, hračkách, nákupních vozících atd. [20]

#### 4.2.1 CO<sub>2</sub> stopa

Celková CO<sub>2</sub> stopa (viz obrázek 11) pro recyklované plasty se vypočítá jako součet CO<sub>2</sub> stopy z recyklace a z výroby pomocí vhodného softwaru (CES Selector 2010). Stopa CO<sub>2</sub> z prvovýroby se v tomto případě nebere v úvahu, protože uvažujeme, že recyklované polymery byly již dříve použity v prvotním výrobku a jsou odpadem, který by byl jinak poslán na skládku nebo využit pro výrobu energie. Naproti tomu celkové množství CO<sub>2</sub> stopy emitované do atmosféry z PU se vypočítá jako součet stop primární produkce a CO<sub>2</sub> z formování. [20]



Obrázek 11 Hodnocení stopy CO<sub>2</sub> pro různé recyklovatelné polymery [20]



Pokud by se při výrobě skateboardových koleček místo PU použily recyklované plasty, celková stopa CO<sub>2</sub> by se snížila téměř o 50 %. Vezmeme-li v úvahu skutečnost, že se ročně spotřebuje 42 500 tun PU, je celková vyprodukovaná stopa CO<sub>2</sub> 284,75 mil. kg CO<sub>2</sub>/rok (CES Selector 2010). Pokud by byl tento materiál nahrazen recyklovanými plasty a světová produkce by zůstala konstantní, stopa CO<sub>2</sub> by se mohla snížit na 148,75 milionů kg CO<sub>2</sub> /rok, čímž by se ušetřilo 136 milionů kg CO<sub>2</sub> /rok. Podle průměrné produkce na domácnost 12,4 t/rok by výše uvedené úspory odpovídaly ročním emisím přibližně 11 000 domácností. V kombinaci s potenciálními ročními domácími úsporami při používání mikro kombinované<sup>2</sup> výroby tepla a elektřiny (1,5 tuny/rok) jsou celkové ekologické přínosy plynoucí z omezení uhlíkových stop obrovské. [20]

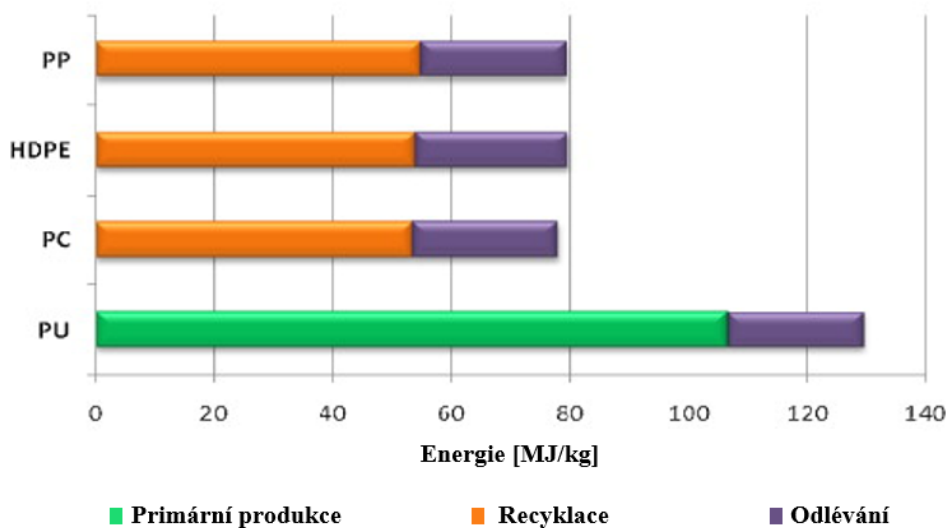
#### **4.2.2 Ztělesněná spotřeba energie**

Podle předchozí analýzy se celková energie spotřebovaná ve výrobním procesu plastového produktu liší v závislosti na primárním zdroji. Primární plast nebo recyklovaný plast (obrázek 12) zobrazuje energii spotřebovanou pomocí CES Selector 2010. Opět platí, že spotřeba energie je podstatně nižší při použití recyklovaných plastů, což dokazuje zlepšení udržitelnosti, protože energie spotřebovaná na výrobu jednoho kg recyklovaných plastů odpovídá pouze 60 % spotřebované energie pro stejnou hmotnost PU. Vzhledem k produkci 42 500 t/rok PU by to znamenalo snížení celkové spotřeby energie o  $2200 \times 10^6$  MJ/rok ( $5\,510 \times 10^6$  MJ/rok u PU oproti  $3\,310 \times 10^6$  MJ/rok pro recyklované polymery PP, HDPE, PC). [20]

---

<sup>2</sup>Kombinovaná výroba elektřiny a tepla je efektivní způsob využití tepla vznikajícího v parních elektrárnách, resp. v teplárnách. Horká voda či pára je dodávána do soustavy centrálního zásobování teplem, nebo je využita ve výrobních procesech mateřského podniku. Jako vysokoúčinná je pak označována taková výroba, při níž je dosaženo úpory primární energie ve výši alespoň 10 %. [28]

## Ztělesněná spotřeba energie



Obrázek 12 Hodnocení spotřeby energie pro různé recyklovatelné polymerní materiály [20]

### 4.2.3 Ekonomická analýza

Udržitelnost zahrnuje širší otázky, jako jsou ekonomické a sociální aspekty, které v kombinaci s dopady na životní prostředí představují „tři pilíře“ udržitelnosti. Náklady na PU jsou podstatně dražší než náklady na recyklované plasty, zejména cena za HDPE a PP, která může být až 10x nižší (Tabulka 1), což představuje roční úspory mezi 2 512,98 a 3 268,22 miliony Kč/ročně, v závislosti na použitém materiálu. [20]

Tabulka 5 Náklady na různé plasty za rok 2011. Roční náklady a úspory. [20]

Materiál	Cena (Kč/kg)	Celková cena (v milionech Kč/rok)
PU	88,67	3 769,78
PC	29,56	1 257,49
HDPE	11,82	502,46
PP	13,43	570,97

#### **4.2.4 Výzkumný dopad**

Pokud by se například PC jevil jako potenciální materiál pro náhradu PU koleček používaných na skateboardu, zaznamenalo by to tedy možnost potenciálně ušetřit více než 2 418 milionů Kč globálně každý rok, snížit CO<sub>2</sub> stopu o 136 milionů kg CO<sub>2</sub> ročně a také snížit spotřebu energie o 60 %. Kromě toho by se snížilo celkové množství plastů putujících každý rok na skládky, a to nejen kvůli 42 500 tunám PU, které by se každoročně nevyráběly na kolečka, ale také kvůli dalším 42 500 tunám PC (nebo jakéhokoli jiného recyklovaného plastu), který by bylo možné odstranit ze skládek, čímž by se ročně ušetřilo celkem asi 85 000 tun. [20]

#### **4.2.5 Další úvahy**

Recyklované materiály by mohly být dále integrovány do koleček ve stylu PU s použitím tzv. koleček s dvojitou tvrdostí, což jsou kolečka s vnitřním jádrem vyrobeným z materiálu odlišného od jízdního povrchu. Z hlediska užitných vlastností je vhodné a možné aby bylo vnitřní jádro tvrdší než jízdní povrch, tj. 100ShA oproti 95ShA. Takový produkt by vykazoval menší působení sil na ložiska při provádění triků a důsledkem toho by mohla být více kontrolovaná jízda. Dalším plusem by byla menší spotřeba PU pro vnější materiál kolečka, jehož hmotnost je asi o 25 % nižší než celková hmotnost standardního kolečka. Vnitřní jádro by tedy mohlo být vyrobeno z recyklovaného materiálu, zatímco kontaktní plocha by mohla být nadále vyrobena z PU, což by znamenalo, že tření a míra opotřebení by zůstala nezměněna, ale v této aplikaci by bylo možné použít velké množství recyklovaných plastů. Z toho by plynuly všechny ekologické a ekonomické výhody, které byly nastíněny v předchozích kapitolách. [20]

### **4.3 Popis zvolené alternativy TPU pro praktickou část práce**

Termoplastické polyuretany jsou materiály, které mohou být zpracovávány běžnými metodami pro zpracování termoplastů, a tím přispívají k rychlému rozvoji termoplastických elastomerů. Tato vlastnost umožňuje snadné zpracování TPU a to pomocí běžných metod jako je vytlačování, vstřikování nebo kalandrování. Některé z kompozic mohou být zpracovány také rozpuštěním v rozpouštědlech. Nicméně, ne všechny druhy TPU jsou

univerzální a pro každou z těchto metod je třeba použít specifické třídy s vhodnou morfologií a viskozitou taveniny. [29]

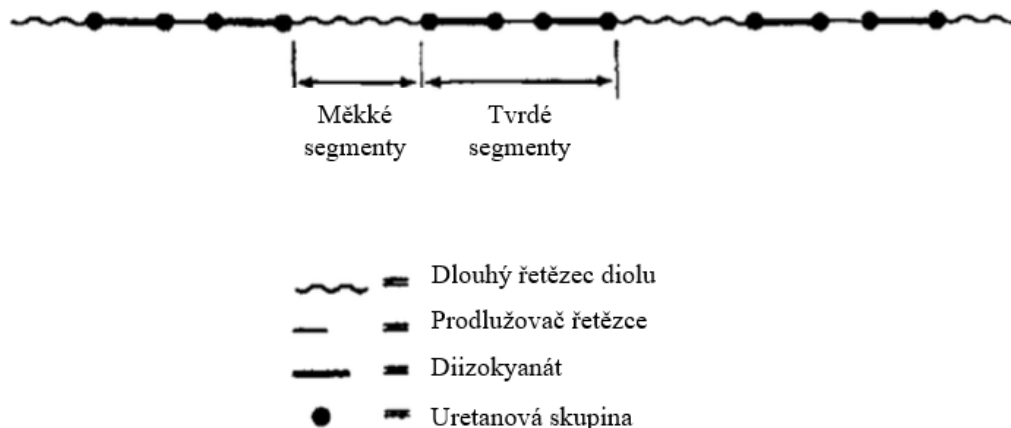
Polyuretanové elastomery byly objeveny v Německu skupinou vedenou Ottem Bayerem na I.G. Farbenindustrie (nyní Bayer A.G.). Patenty na elastomerní vlastnosti polyuretanů byly vydány společností DuPont a ICI. První polyuretanový elastomer, označovaný jako „I-Rubber“, měl špatné vlastnosti, ale díky dalšímu vývoji byly vlastnosti vylepšeny. Tyto prvotní polyuretanové elastomery se skládaly ze tří hlavních složek:

- polyesterový nebo polyetherový vysokomolekulární diol,
- achainextender (voda, nízkomolekulární diol),
- objemný diisokyanát, jako je naftalen-1,5-diisokyanát (NDI) [29].

Tyto polyuretanové elastomery nebyly v minulosti považovány za skutečné termoplasty, protože měly vyšší teploty tání než teploty rozkladu uretanových vazeb. Významný pokrok nastal, když byl difenylmethan-4,4-diisokyanát (MDI) použit místo NDI v těchto systémech. První zmínky o skutečných termoplastických polyuretanových elastomerech jsou z roku 1958. Dnes je obecně uznáváno, že elastomerní vlastnosti TPU jsou způsobeny jejich složitou multiblokovou strukturou, která zahrnuje fázově oddělené systémy.

Pro tvorbu tvrdého segmentu se používá prodlužovač řetězce, například butadien diol, který se přidává k izokyanátu (většinou MDI). Měkký segment je tvořen elastickými polyetherovými nebo polyesterovými řetězci, které spojují dva tvrdé segmenty. Při pokojové teplotě tyto dva segmenty nejsou kompatibilní, což vede k mikrofázovému oddělení. Toto oddělení je způsobeno rozdíly v bodech tání a polaritě obou segmentů. Tvrdé segmenty mají mnohem vyšší bod tání a polaritu než měkké segmenty, které jsou méně polární a mají nižší teplotu tání. Při překročení teploty tání tvrdých segmentů se materiál stává viskózní tekutinou, která může být zpracována běžnými plastovými metodami, jako je například vstřikování, vytlačování nebo vyfukování. Po ochlazení se opět vytvoří fázově oddělené segmenty tvrdého a měkkého charakteru a materiál získává své elastické vlastnosti.

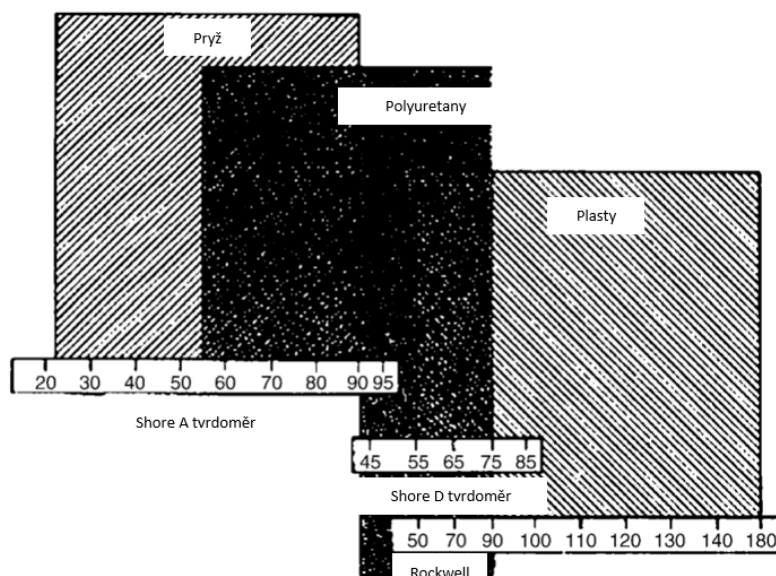
Měkké segmenty vytvářejí elastomerní matici, která je odpovědná především za elastické vlastnosti materiálu. Tvrdé segmenty fungují jako multifunkční spojovací body, které mohou sloužit jako příčné vazby i jako výztužná plniva. Příčné vazby mohou být odstraněny pomocí tepla nebo rozpouštědel. Pokud se odstraní síť, TPU lze obnovit ochlazením nebo odpařením rozpouštědla tak, jak již bylo dříve zmíněno. [29]



Obrázek 13 Schematické znázornění TPU složené z diizokyanátu, diolu s dlouhým řetězcem a prodlužovače řetězce. [29]

### 4.3.1 Vlastnosti

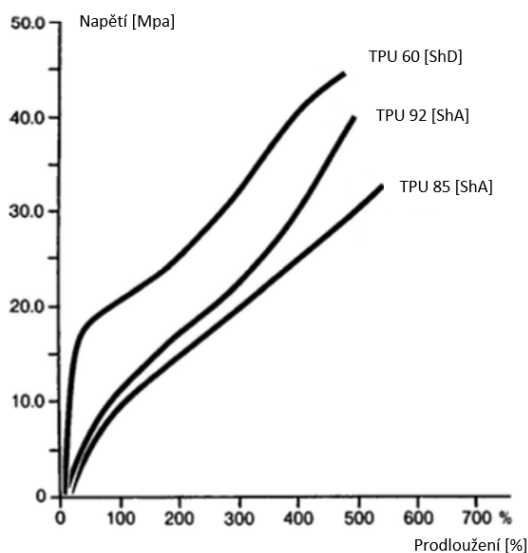
TPU jsou tedy první polymerní materiály, které kombinují pružnost elastomerů s termoplastickými vlastnostmi. Podíl tvrdých a měkkých segmentů určuje vlastnosti materiálu, jako je tvrdost, modul pružnosti, pevnost a maximální teplota použití. Poměry polyol: prodlužovač řetězce: diisokyanát se pohybují v rozmezí 1:0,5:1,5 až 1:20:21, což umožňuje dosáhnout tvrdosti 55 ShA až 75 ShD a vyšší bez použití změkčovadel. TPU se pohybují v rozmezí Youngova modulu 5 až 2 000 MPa a překlenou tak mezeru mezi elastomery a plasty. Zvýšení tuhosti lze dosáhnout použitím organických nebo anorganických plniv, jako jsou například skleněná vlákna. [29]



Obrázek 14 TPU překlenující mezeru mezi elastomery a plasty [29]

### 4.3.2 Mechanické vlastnosti

TPU jsou charakteristické svou vysokou pevností v tahu a vysokou mírou prodloužení, jak je znázorněno na obrázku č. 15. Dále jsou tyto materiály vynikající v odolnosti proti roztrhání a opotřebení. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny především teplotou a tvrdostí materiálu. [29]



Obrázek 15 Křivky napětí-deformace tří TPU s různými hodnotami tvrdosti. [29]

### 4.3.3 Tvrdost materiálu

TPU má dobrou schopnost odolat vtlačení cizího předmětu, což je ve své podstatě charakteristika tvrdosti. Pro měření tvrdosti TPU se nejčastěji používají testy Shore A a Shore D. Materiály s nižší tvrdostí se měří Shore A, zatímco tvrdší se měří Shore D. Poměr tvrdého segmentu k měkkému ovlivňuje hodnotu tvrdosti TPU s hodnotami 70 ShA a 80 ShD, díky blokové povaze kopolymeru. Obvykle se tvrdost spolu s modulem pružnosti, únosností, pevností v roztržení a měrnou hmotností TPU zvyšuje s rostoucím obsahem tvrdého segmentu. [29]

### 4.3.4 Odolnost proti oděru

TPU vykazují výbornou odolnost vůči opotřebení způsobenému třením. Avšak opotřebení TPU je značně ovlivněno zvýšením povrchového tepla při testování, což souvisí s koeficientem tření, tlakovým zatížením a kontaktními plochami. Vzorčky opatřené lubrikací obvykle vykazují nižší abrazivní opotřebení než nemazané vzorky, a to díky sníženému tření

a hromadění tepla. V tabulce 6 je uvedeno srovnání odolnosti proti opotřebení TPU s několika dalšími polymery. [29]

*Tabulka 6 Odolnost různých polymerů proti oděru [29]*

<b>Materiál</b>	<b>Úbytek materiálu [mg]</b>
TPU	0,4 – 3,2
Nárazuvzdorné PVC	89
Nylon 6	104
Vysoce nárazuvzdorný polystyren	545

#### **4.4 Popis zvolené alternativy PC pro praktickou část práce**

Polykarbonát byl poprvé použit v roce 1953 Dr. H. Schnellem z Bayer AG. PC je transparentní termoplast s uhlíkovými funkčními skupinami. Jeho vysoká pevnost ho činí odolným proti nárazu a zlomení. Je lehký, takže se jeví jako skvělá alternativa ke sklu. Je široce používán díky svému ekologickému zpracování a recyklovatelnosti.

Polykarbonát je vysoce výkonný, houževnatý, amorfni a transparentní termoplastický polymer s organickými funkčními skupinami spojenými karbonátovými skupinami ( $-O-(C=O)-O-$ ) a nabízí jedinečnou kombinaci vlastností. PC se s oblibou používá jako technický plast díky svým jedinečným vlastnostem, mezi které patří – vysoká rázová houževnatost, vysoká rozměrová stabilita a dobré elektrické vlastnosti mimo jiné. Vlastnosti polykarbonátu jsou sice podobné polymethylmethakrylátu (PMMA), ale polykarbonát je pevnější, použitelný v širším teplotním rozsahu (bod tání: 155 °C), ale je také dražší. Některé z běžných aplikací jsou kompaktní disky, ochranné přilby, neprůstřelná skla, čočky světlometů automobilů, kojenecké láhve, zastřešení a zasklení atd. [25]

##### **4.4.1 Hlavní vlastnosti polykarbonátu**

PC je ideální materiál, který je dobře známý a široce používán v průmyslu pro své všestranné vlastnosti, ekologické zpracování a recyklovatelnost. Níže jsou uvedeny hlavní vlastnosti:

- **Houževnatost a vysoká rázová houževnatost** – Polykarbonát má vysokou pevnost, díky čemuž je odolný vůči nárazu a lomu a dále poskytuje bezpečnost

v aplikacích, které vyžadují vysokou spolehlivost a výkon. PC má hustotu  $1,2 - 1,22 \text{ g/cm}^3$ , udržuje si houževnatost od  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ . [25]

- **Propustnost** – PC je extrémně čirý plast, který dokáže propustit přes 90 % světla stejně dobře jako sklo. Polykarbonáty jsou k dispozici v široké škále odstínů a barev, které lze přizpůsobit v závislosti na aplikaci koncového uživatele. [25]
- **Nízká hmotnost** – Umožňuje výrobcům prakticky neomezené možnosti navrhování např. ve srovnání se sklem. Tato vlastnost také umožňuje zvýšit efektivitu, zjednodušit proces instalace a snížit celkové náklady na dopravu. [25]
- **Ochrana před UV zářením** – Polykarbonáty mohou být navrženy tak, aby blokovaly škodlivé UV záření a poskytovaly tak 100% ochranu. [25]
- **Chemická odolnost** – Polykarbonát vykazuje dobrou chemickou odolnost proti zředěným kyselinám, alifatickým uhlovodíkům a alkoholům; střední chemická odolnost proti olejům a tukům. Výrobci doporučují čistit PC určitými čisticími prostředky, které neovlivňují její chemickou povahu. Je citlivý na abrazivní alkalické čističe. [25]
- **Tepelná odolnost** – Polykarbonáty nabízejí dobrou tepelnou odolnost a jsou tepelně stabilní až do  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tepelnou odolnost lze zlepšit přidáním retardérů hoření bez ovlivnění vlastností materiálu. [25]

Polykarbonáty se střední molární hmotností (do  $30 \text{ kg/mol}^{-1}$ ) se nejčastěji zpracovávají vstřikováním. Trubky, tyče a profily se vyrábějí za pomoci vytlačování. Polykarbonát lze také lisovat, bezproblémově třískově obrábět, svařovat horkým vzduchem a lepit za pomoci roztoků. Z fyziologického hlediska jsou polykarbonáty nezávadné, bez chuti a zápachu. [14]



## 5 TECHNOLOGIE VÝROBY

Jelikož stávající produkce koleček využívá materiálovou skupinu reaktoplasty a navrhované alternativy spadají do skupiny termoplastů, jsou níže popsány typy procesů využívaných pro zpracování těchto materiálů. Nejdříve je popsána technologie výroby komerčně dostupných skateboardových koleček. Následně je stručně popsána technologie výroby (vstřikování) pro alternativní materiály. Ta je zaměřena především na prototypové vstřikování, jakož to teoretický podklad pro praktickou část práce.

Polymery jsou mimořádně rozsáhlá a rozmanitá rodina materiálů. Existuje však několik poměrně širokých a základních přístupů, které lze dodržet při navrhování nebo výrobě výrobků z polymerů nebo častěji z polymerů ve směsi s jinými složkami. Typ výrobního postupu závisí na vlastnostech a charakteristikách polymeru a na tvaru a formě výsledného výrobku. Jak již bylo uvedeno v široké klasifikaci polymerů existují dvě obecně uznávané kategorie – termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty se skládají z dlouhých polymerních molekul, z nichž každá může, ale nemusí mít postranní řetězce nebo skupiny. Boční řetězce nebo skupiny, pokud jsou přítomny, nejsou spojeny s jinými molekulami polymeru (tj. nejsou zesíťovány). Termoplasty proto lze opakovaně tavit nebo vytvrzovat zahříváním nebo ochlazováním. Vstupní surovina je obvykle v podobě granulátu. Zahřátím se materiál změkčí nebo roztaví tak, aby mohl být tvarován; následným ochlazením se pak materiál v daném tvaru vytvrdí nebo ztuhne. Během tohoto tvarovacího procesu obvykle nedochází k žádné chemické změně. Na rozdíl od reaktoplastů zde během výrobního procesu dochází k reaktivním skupinám molekul ze síťových vazeb mezi molekulami. Zesíťované nebo vytvrzené materiály nelze zahříváním roztavit. Reaktoplasty se obvykle dodávají jako částečně polymerizovaná formovací směs nebo jako kapalný monomer polymerní směsi. V tomto nevytvrzeném stavu je lze tvarovat tlakem nebo bez něj a polymerovat do vytvrzeného stavu pomocí chemikálií nebo tepla. S technologickým pokrokem se hranice mezi zpracováním termoplastů a reaktoplastů stává méně zřetelnou. Pro reaktoplasty byly vyvinuty postupy, které využívají ekonomické vlastnosti zpracování termoplastů. Například zesíťovaný polyethylenový povlak se vyrábí vytlačováním termoplastického polyethylenu, který se následně zesíťuje (buď chemicky, nebo ozařováním), čímž vzniká reaktoplast, který nelze znovu zahřátím roztavit. Přesto je v průmyslu stále rozšířeno rozlišování mezi termoplasty a reaktoplasty. Nejběžnějšími metodami zpracování reaktoplastů jsou lisování a odlévání. U termoplastů jsou nejdominantnějšími technikami zpracování vytlačování, vstřikování, vyfukování aj. [14]

## 5.1 Stávající komerční produkce

Jak z předešlých kapitol vyplývá, technologie odlévání se používá pro výrobě komerčně dostupných skateboardových koleček z polyuretanu. Tento proces spočívá v tom, že se materiálem v tekutém stavu naplní formy, a poté se materiál nechá vytvrdit. Existuje několik způsobů technologie odlévání, např. atmosférické, podtlakové, přetlakové, odstředivé nebo polymerační. Tento proces se hodí pro malosériovou nebo kusovou výrobu, avšak lze poměrně snadno zautomatizovat jako je tomu právě u zvoleného valivého profilu. K výrobě se nejčastěji používají licí pryskyřice, které musí splňovat určité parametry, aby je bylo možné použít pro výrobu. Materiál musí mít dobré vlastnosti toku, aby bylo možné zaplnit všechny detaily formy. Při tuhnutí se nesmí vytvářet bubliny nebo staženiny. Zhotovený výrobek musí mít předepsanou pevnost a splňovat další mechanická a fyzikální kritéria. Při odlévání se nejčastěji používají vytvrditelné pryskyřice, jako jsou fenolformaldehydové, epoxidové nebo polyesterové, a také polyuretany. [24, 25, 26]

- Výhodou odlévání je výroba dílů bez vnitřního pnutí, výroba tvarově rozdílných dílů najednou, minimální odpad, konstrukční jednoduchost a nízké náklady na formy a stroje.
- Nevýhodou je omezení počtem vhodných plastů, nízká rozměrová přesnost, dlouhé pracovní cykly.

Podle pohybu formy se odlévání dělí na gravitační, rotační a odstředivé. Jako poslední bude detailněji popsán proces výroby skateboardových koleček. [24]

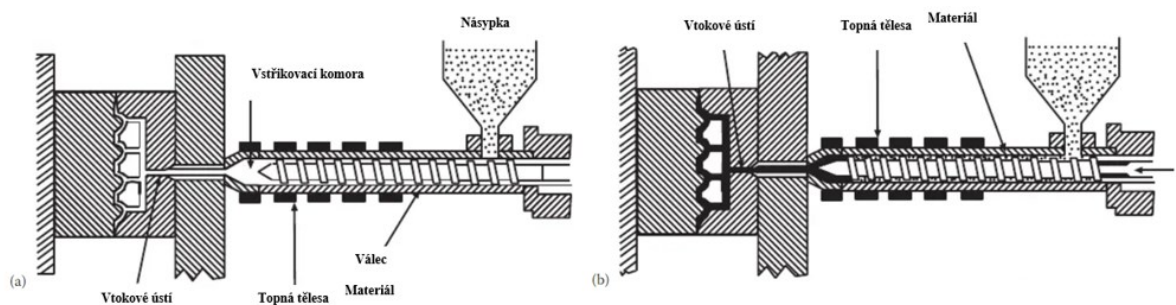
### 5.1.1 Skateboardová kolečka – Odlévání do statické formy

Skateboardová kolečka se vyrábějí pomocí odlévání do statických forem vyrobených z hliníku. Formy mohou být jednodílné nebo dvoudílné s válcovým středovým kolíkem. K vytvrzení směsi polyuretanu se používá teplota 115 °C po dobu 40 minut. Po vytvrzení a vychladnutí se kolečka odstraňují z formy pomocí stlačeného vzduchu a kontrolují se rozměry a tvrdost. Nakonec se kolečka upravují na požadované rozměry za pomoci soustruhu. Obrobí se čela a průměr. Výsledná kvalita a přesnost závisí na správném nastavení a kontrolách během celého procesu výroby. Jako poslední se kolečka upravují po designové stránce, za pomoci potisku. [37]

## 5.2 Vstřikování

Historie plastových výrobků pomocí vstřikování se vyvíjela od roku 1872, kdy byly vynalezeny nové materiály a technologie zpracování. Bratři John a Isaiah Wyattovi vytvořili první vstřikovací stroj na výrobu kulečnickových koulí z celuloidu. Později se začaly vyrábět výrobky pro domácnost z termoplastů, jako je acetát celulózy, PVC a polystyren. Během druhé světové války se plastové materiály staly populární jako náhrada za kovové a pryžové díly. V roce 1946 James Watson Hendry vytvořil šnekový vstřikovací stroj, který umožnil lepší kontrolu kvality plastu a výrobu složitějších dutých dílů. V 70. letech minulého století se výroba plastů stala důležitější, než výroba oceli a v 90. letech se staly populárními hliníkové formy, které byly rychlejší a levnější než ocelové formy.

Vstřikování je nejdůležitější metodou pro zpracování termoplastů. Proces spočívá v roztavení materiálu v zahřátém válci a jeho vstřikování pod tlakem do dutiny formy, kde se ochlazením vytvrdí. Každý krok se provádí v samostatné zóně téhož zařízení v cyklických operacích. Zjednodušené schéma vstřikovacího stroje je uvedeno na obrázku 16. Materiál ve formě granulátu padá ze zásobníku do válce. Šnek pak vtlačuje materiál do ohřívací zóny, kde se zahřívá a měkne (plastifikuje). Před otevřením formy a vyhozením výrobku musí být materiál ve formě ochlazen pod tlakem při nižší teplotě, než je  $T_m$  nebo  $T_g$ . Poté se šnek stáhne zpět a z násypky se doplní nový granulát, forma se uzavře potřebnou uzavírací silou a celý cyklus se opakuje. U některých strojů dosahuje uzavírací tlak hodnot  $562 - 2\,812 \text{ kg/cm}^2$  a doby cyklu jsou až 15 s. Hlavními prvky vstřikovacího stroje jsou vstřikovací jednotka, která taví materiál a vstřikuje jej do formy; uzavírací jednotka, která otevírá formu a uzavírá ji pod tlakem; použitá forma a ovládací prvky stroje. [14, 30, 31, 34]



Obrázek 16 Příčný řez typickým šnekovým vstřikovacím strojem, znázorňující šnek (a) v zasunuté poloze a (b) v přední poloze. [14]

### 5.3 Prototypové vstřikování

Prototypové vstřikování se používá k výrobě funkčních prototypů, které slouží k ověření designu a funkčnosti výrobku. Analýzy pro vstřikování se zaměřují na analýzu materiálu, vlastností materiálu a procesu vstřikování, aby se zlepšila kvalita výroby a minimalizovaly se problémy. Porovnání prototypového vstřikování s analýzami pro vstřikování může poskytnout užitečné informace o tom, jak se skutečné vstřikování chová v porovnání s předpoklady ze simulací a analýz. To může pomoci při zlepšování procesu výroby a minimalizaci rizik výroby výrobku. Prototypy jsou nákladově nejefektivnější alternativou pro malé nebo specializované podniky. Konkrétněji řečeno, prototypové vstřikování se uskutečňuje proto, aby se:

- Prokázalo, že návrh dílu bude fungovat právě touto metodou.
- Zajistilo, že finální díl bude fungovat bez problémů se zvoleným materiálem a konstrukcí nástroje.
- Mohl díl řádně otestovat, včetně zjištění vlastností kosmetického typu.
- Mohl díl předvést v co nejrealističtější podobě potenciálním distributorům.
- Využívalo specifického materiálu nebo povrchové úpravy, které není možné dosáhnout jinými způsoby, např. vytvoření polystyrenových dílů (které nelze vytisknout).
- Mohl uskutečnit výzkum anebo propagace výrobku. [31]

Obecně prototypové díly budou vyrobeny z komoditních plastů, jako je polykarbonát, nylon, polypropylen a ABS, a také z termoplastických elastomerů jako TPE, TPU a SAN. [31]

### 5.4 Ekologická šetrnost

Vstřikování plastů je ve srovnání s jinými výrobními procesy šetrné k životnímu prostředí. Protože se při této technice používá pouze takové množství plastu, které je nutné k naplnění formy, dochází k menšímu plýtvání materiálem, zejména když se přebytečný plast z vtoků a vtokových kanálů rozele a znovu použije (což lze v případě potřeby provést vícekrát). Tento proces také produkuje méně emisí a spotřebovává méně energie ve srovnání s jinými technologiemi. Průmysl vstřikování plastů je však natolik rozsáhlý, že se v této oblasti stále

spotřebovává velké množství energie a většina plastů při svém vzniku produkuje velké množství emisí. Lze však provést další práce, aby byl tento proces šetrnější k životnímu prostředí, a to optimalizací konstrukce výrobků, procesů, efektivity výrobních cyklů a úspory energie. Existují také biologicky odbouratelné plasty a plniva, která lze použít k výrobě ekologičtějších výrobků. [31]

## **5.5 Problematika vstřikování profilů s tlustou stěnou**

U silnostěnných součástí vyrobených vstřikováním mohou vznikat častěji propadliny, a to důsledkem nerovnoměrného ochlazování v průběhu procesu tváření. Tyto vady zhoršují kvalitu povrchu vstřikovaných dílů a jsou spolehlivým indikátorem nadměrného objemového smrštění během procesu. Kvantifikace deformací v tlustostěnných součástech a předpovídání možných defektů v závislosti na nastavení procesních parametrů jsou užitečnými nástroji pro optimalizaci kvality výrobku při vstřikování plastů. Tyto propadliny se obvykle vyskytují na místech, která jsou nejtlustší a nejvíce hromadí teplo, jako jsou například rohy nebo výstupky. Ke vzniku propadlin může docházet také v důsledku nedostatečného plnění dutiny formy vstřikovacím strojem, či při použití materiálu s nízkou teplotou tání nebo nízkou hustotou. Propadliny mohou způsobit oslabení a snížení pevnosti součásti, což může vést k selhání funkčnosti výrobku. Proto je důležité při navrhování formy a procesu vstřikování brát v úvahu potenciální rizika propadlin a přijmout opatření ke snížení jejich výskytu. [33, 34]

Polymery používané při vstřikování jsou neneutonské kapaliny a během procesu vstřikování podléhají značné tepelné expanzi. Po naplnění dutiny formy přejde roztavený polymer z kapalné fáze na pevnou fázi. Pokud je však uzavírací tlak příliš nízký nebo doba chlazení příliš krátká, dojde k tomu, že součást podléhá velkému objemovému smrštění.

Závažnost defektů závisí do značné míry na rozsahu objemového smrštění, které součást utrpěla během fáze chlazení. U většiny běžných termoplastů se míra smrštění pohybuje kolem 0,005 až 0,015. Stopy propadlin bývají zvláště závažné u vstřikovaných součástí, u kterých je průměrná tloušťka větší než 10 mm a rychlost ochlazování je nerovnoměrná. Procesy ruční kontroly defektů ve stopách jsou však nejen časově náročné a nákladné, ale jsou také subjektivní a náchylné k lidské chybě. Pro detekci a kontrolu objemového smrštění během vstřikování silnostěnných součástí se postupně vyvíjejí objektivnější metody pro kvantifikaci propadlin a pochopení korelace mezi jejich tvorbou a použitými parametry vstřikování. [33]

Specifický objem taveniny polymeru závisí na tlaku a teplotě a vede k odlišnému chování tlak-objem-teplota (pVT). V procesu vstřikování dominuje specifickému objemu viskózní disipace, vstřikovací tlak, uzavírací tlak a rychlost chlazení. Proto se stav taveniny polymeru, a tedy i objemové smrštění dynamicky mění v závislosti na komplexním chování vývoje cesty pVT. V případě nekonzistentního vývoje cesty pVT se objemové smrštění polymerů mění v dutině nerovnoměrně, a proto dochází k deformaci dílu po jeho odformování. Literatura obsahuje různé metody pro překonání tohoto problému pomocí místní regulace teploty formy nebo externího těsnění podporovaného plynem. [33]

Stručně řečeno, jak se tavenina polymeru ochlazuje v dutině pro vstřikování, vzdálenost mezi molekulárními řetězci se zmenšuje, čímž se zmenšuje volný objem a dochází ke smrštění. Účinek smršťování je citlivý na parametry vstřikování, zejména na teplotu válce a formy, rychlost vstřikování, stav držení a rychlost chlazení. Tyto parametry však mají jak individuální, tak hromadné účinky. Podmínky zpracování se realizují takovým způsobem, aby bylo možné zvládnout smrštění vstřikovaných součástí, které je velmi náročné, a to i s pomocí metod umělé inteligence. V praxi kolísání kvality vstřikovaných součástí silně souvisí se stavovými proměnnými, jako je:

- teplota taveniny,
- homogenita taveniny,
- viskozita taveniny,
- vnitřní napětí. [33]

## 5.6 Vstřikování versus 3D tisk

Vstřikování plastů je výhodnější než 3D tisk pro větší výrobní série, silnější díly, rychlejší výrobu a disponuje větší rozmanitostí materiálů, které lze použít a to včetně plniv. Vzhledem k tomu, že výrobní proces vstřikování jednoduše zahrnuje vstřikování a chlazení polymerů, může být díl vytvořen maximálně během několika minut, na rozdíl od vytváření dílu vrstvou po vrstvě prostřednictvím 3D tisku. Díky tomu je možné vyrábět větší objemy dílů rychleji než na 3D tiskárně, i když stavba forem a další nastavení znamená, že vstřikování má mnohem delší dodací lhůtu. Díly jsou také pevnější, protože nejsou závislé na spojích mezi jednotlivými vrstvami polymeru, což je důležité pro produkty, jako jsou např. nárazníky automobilů. Současně lze téměř všechny polymery vstřikovat. [27, 31]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce se zabývá experimentální výrobou funkčních vzorků valivého profilu – skateboardového kolečka a následným testováním klíčových vlastností. Kroky jednotlivých bodů obsažených v diplomové práci lze dále rozdělit do následujících bodů:

- Vypracování literární rešerše na zvolené téma se zaměřením na potencionální využití recyklovatelných polymerů.
- Návrh technologie výroby a následná výroba funkčních vzorků z více možných alternativních materiálů.
- Testování klíčových vlastností a následné porovnání s komerčně dostupnými vzorky, spolu se subjektivním hodnocením uživatelů.
- Závěrečné vyhodnocení experimentu.



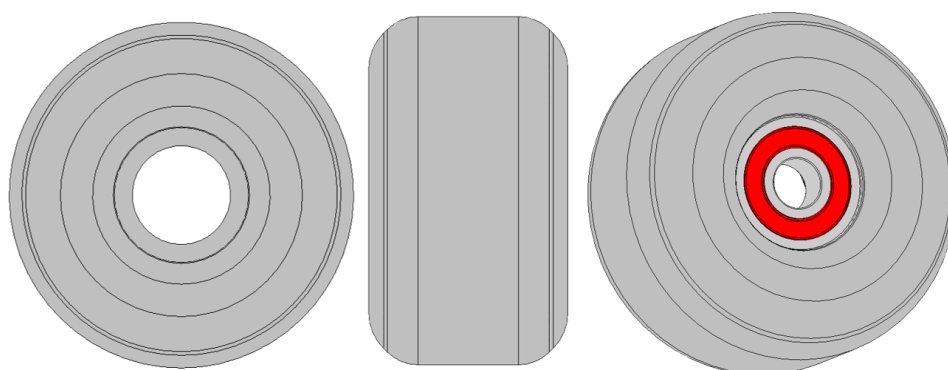
## 7 NÁVRH VALIVÉHO PROFILU

Jak bylo uvedeno dříve, navržené alternativní materiály TPU a PC se nedají zpracovávat stejnou technologií (odolávání) jako materiál koleček komerčních, a proto je pro tyto materiály zvolena technologie vstřikování. Opíráme se zde o předešlý výzkum, kde byly navrženy dvě varianty skateboardových koleček, z nichž byla vybrána varianta vhodnější. Pro tento experiment je zvolena varianta, která v předešlém výzkumu nebyla realizována.

Navržené kolečko má průměr 56 mm, celkovou šířku 32 mm, kontaktní plochu 16 mm a celkový objem 62,58 cm<sup>3</sup>. Vnitřní rozměry odpovídají standardu pro osy trucků a ložisek. Očekávaná tvrdost profilu se pohybuje v rozmezí 95 ShA – 104 ShA (84 ShB), což odpovídá standardním kolečkům bez jader. Na základě informací z teoretické části práce, zejména z kapitoly 2.3, se jedná o kolečka vhodná především pro street skateboarding. Díky rovným plochám čela kolečka by měl skateboard lépe držet v grindech. Velikost průměru umožňuje dosáhnout vynikajícího poměru mezi maximální rychlostí a životností kolečka. Očekává se, že tato kolečka by se díky svému tvaru a předpokládaným vlastnostem měla co nejvěrněji podobat kolečkům dostupným na dnešním trhu. Výkres kolečka je součástí příloh práce.

*Tabulka 7 Základní parametry skateboardového kolečka.*

Parametr	Skateboardové kolečko
Materiál	TPU, PC
Vnější průměr	56 mm
Šířka kolečka	32 mm
Max tloušťka stěny	30,786 mm
Hmotnost kolečka	0,075 kg
Plocha kolečka	106,2 cm <sup>2</sup>
Objem kolečka	62,6 cm <sup>3</sup>



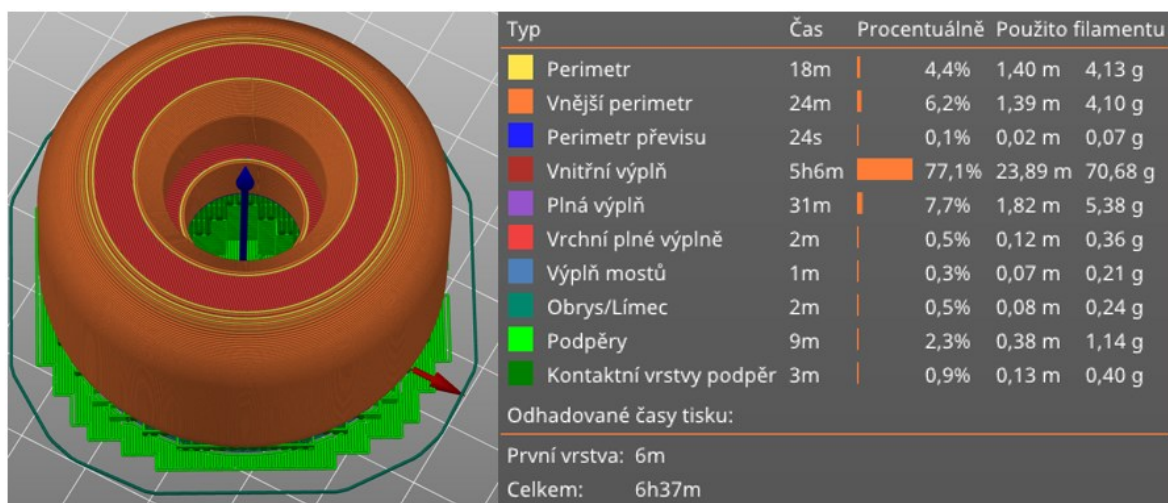
*Obrázek 17 Navržený model valivého profilu s ložiskem.*

## 8 PROTOTYPOVÁ TECHNOLOGIE VÝROBY

Technologie 3D tisku nám umožňuje rychle a relativně levně vytvářet prototypy a získat tak reálnou zpětnou vazbu. Například díky různým materiálovým konfiguracím, můžeme nalézt ideální kombinaci pro finální výrobek. Tisk prototypů tedy představuje úsporný a efektivní způsob testování. Následně i možnosti optimalizace designu výrobků v průběhu vývoje produktu. Byla vytisknuta pouze dvě kolečka od každého materiálu (TPU, PC). Důvodů bylo hned několik – ověření návrhu a funkčnosti výrobku, následná minimalizace chyby, a tudíž i možné snížení nákladů na výrobu nástroje pro vstřikování. Dosažené výsledky byly porovnány s teoretickými předpoklady a použity pro optimalizaci návrhu. V poslední řadě byl získán širší soubor vzorků pro testování v kapitole 10.

### 8.1 3D tisk TPU

Pro tisk byl použit materiál Fillamentum TPU 98A, který je vhodný pro výrobu odolných a pružných komponent. Tento materiál byl využit také z důvodu aktuální dostupnosti na fakultě. Tisk probíhal na tiskárně DeltiQ 2 + FlexPrint2 s tloušťkou vrstvy 0,2 mm, 100 % hustotou výplně a rychlostí tisku 45 mm/s. Tisk probíhal na půdě fakulty technologické ve Zlíně. Celková hmotnost vytočeného filamentu vztažená na jedno kolečko byla 86,7 g a doba tisku se pohybovala okolo 6 h. Podpěry byly řešeny pouze v rámci podložky (viz ilustrace 18). Před tiskem byly modely připraveny v softwaru Catia V5 a exportovány jako soubory typu STEP, který je standardním formátem pro 3D tisk. Tento soubor byl následně zpracován za pomoci Open-source softwaru – Prusa Slicer.



Obrázek 18 Vizualizace tisku kolečka z TPU s vybranými informacemi o tisku.

Po dokončení tisku byly oba prototypy ošetřeny pomocí skalpelu a brusných papírů s různou hrubostí. Následně se kolečka testovala spolu s ostatními kolečky v laboratoři (konkrétní výsledky testů jsou uvedeny v kapitole 10).

### 8.1.1 Vyhodnocení prototypů z TPU

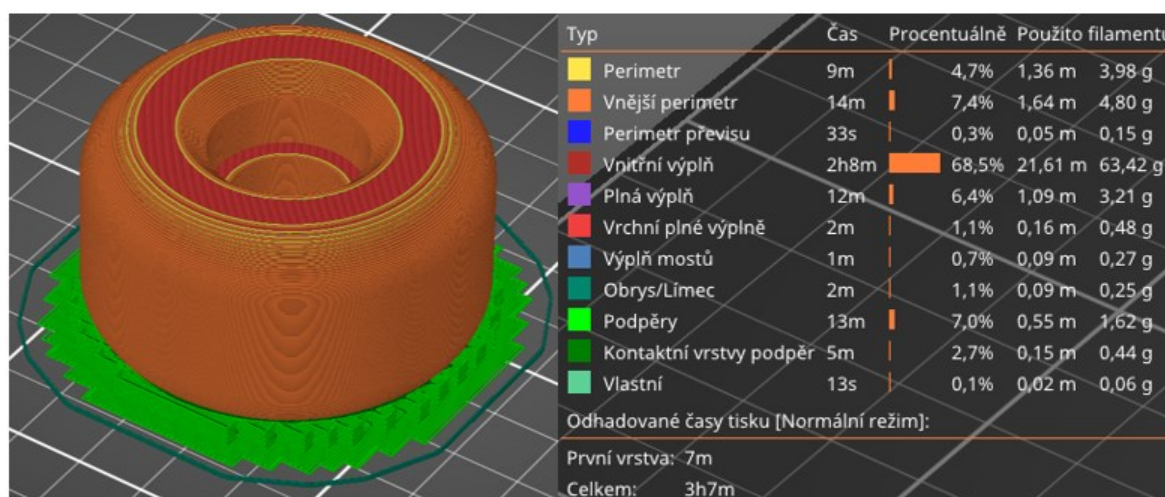
Výsledné prototypy byly testovány za pomoci skateboardu, aby byla ověřena jejich funkčnost a výkonnost. Konkrétně pak v u-rampě jejíž materiál byl z dřevěných překližek. Test ukázal, že tvar koleček zcela funkčně vyhovuje jak pro jízdni vlastnosti, tak pro vlastnosti v grindech. Rozměr pro uložení ložisek zcela vyhovoval. Při porovnání s komerčně dostupnými kolečky však tyto prototypy vykazovaly nižší tření v důsledku čehož kolečka výrazněji klouzala. Dále se kolečka při jízdě oproti komerčně vyráběným kolečkám výrazně více zahřívala. Obojí mohlo být způsobeno nejen materiálem, ale i technologií výroby. Prototypová kolečka se totiž v rámci použité výrobní technologie nejeví tak homogenně. Jak již bylo uvedeno, kolečka se testovala v kryté mini rampě ze dřeva. Tzn. že maximální čas jízdy se pohyboval okolo 1 min. Zatímco komerčně dostupná kolečka se stihla zahřát na cca 2 %, tak prototypy se zahřály na cca 35 %. Nutno dodat, že výsledky jsou čistě odhad, vyhodnocený za pomoci doteku rukou. Pokud bychom uvažovali, že se na kolečkách pojede z kopce po asfaltovém povrchu, např. 10 min mnohem vyšší rychlostí, téměř určitě by se kolečka v okolí ložiska začala tavit.



*Obrázek 19 Vlevo – upnutá prototypová kolečka na skateboardu, vpravo – detail kolečka.*

## 8.2 3D tisk z PC

Pro tisk prototypů koleček z druhého materiálu byl použit materiál Prusament PC Blend. Tisk tentokrát probíhal na tiskárně Original Prusa i3 MK3S + s tloušťkou vrstvy 0,3 mm, 100 % hustotou výplně, teplotou trysky 275 °C a rychlostí tisku 50 mm/s. Celková hmotnost vytočeného filamentu vztažená na jedno kolečko byla 78,69 g a doba tisku se pohybovala okolo 3 h. Podpěry byly řešeny pouze v rámci podložky (viz ilustrace 20). Před tiskem byly modely opět připraveny v softwaru Catia V5 a exportovány jako soubory typu STEP, který je standardním formátem pro 3D tisk. Tento soubor byl následně zpracován za pomoci Open-source softwaru – Prusa Slicer 2.5.2.



Obrázek 20 Vizualizace tisku kolečka z PC s vybranými informacemi o tisku.

Opět platí, že po dokončení tisku byly oba prototypy ošetřeny pomocí skalpelu a brusných papírů s různou hrubostí. Následně se kolečka testovala spolu s ostatními kolečky v laboratoři (konkrétní výsledky testů jsou uvedeny v kapitole 10).

### 8.2.1 Vyhodnocení prototypu z PC

Především v tomto případě bylo opodstatněné vytvořit a otestovat prototypy koleček. PC se totiž dle svých vlastností na první pohled nemusí jevit jako ideální materiál pro skateboardová kolečka. Kolečka opět oproti komerčně dostupným kolečkům výrazněji klouzala. To mohlo být opět způsobeno typem technologie výroby. Proto je vhodné pokusit se kolečka z PC vstříkovat. PC má vysokou tvrdost, a proto není tak poddajný jako TPU a z toho důvodu bylo problematictější manuální zalisování ložisek do kolečka. I přes tyto

komplikace lze konstatovat, že vytisknutá kolečka z PC fungovala poměrně uspokojivě a má význam pokusit se je vyrábět primární zamýšlenou technologií – vstřikováním.



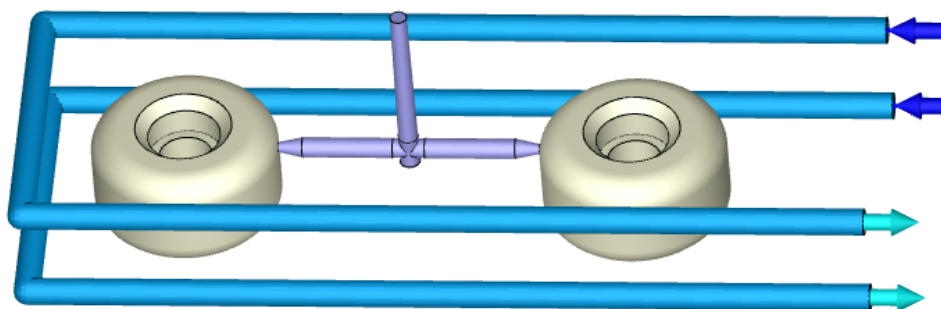
*Obrázek 21 Vlevo – upnutá prototypová kolečka na skateboardu, vpravo – detail kolečka.*

## 9 TECHNOLOGIE VÝROBY VSTŘIKOVÁNÍ

Po úspěšné výrobě prototypů se tato kapitola zaměřuje na primární technologii výroby funkčních vzorků skateboardových koleček – vstřikováním. Realizace vstřikování takto tlustostěnného profilu představuje výzvu, protože komerčně dostupná kolečka se touto technologií nevyrábějí, a tak je vyžadován specifitější přístup a zkušenosti. Pokud není vstřikování provedeno správně, je takto tlustostěnný profil více náchylný k deformacím a vzniku vad. Proto je nezbytné volit vhodné vstřikovací parametry, aby byla dosažena co nejvyšší kvalita výrobku. Nejprve jsou uvedeny výsledky analýzy vstřikování, které byly vyhodnoceny za pomoci programu Moldex 3D. Analýza byla uskutečněna pouze pro jeden materiál – TPU. Důvodem je předpoklad, že tento materiál bude přece jen v rámci tohoto výzkumu a jeho časové náročnosti zajišťovat větší jistotu finálního produktu. Dále se tato kapitola soustředí na popis koncepce a výroby nástroje, protože se nejedená a formu určenou pro sériovou výrobu, která by byla pro tento experiment zbytečně komplikovaná a cenově nevýhodná. Na závěr se kapitola zaměřuje na samotnou výrobu funkčních vzorků valivého profilu z obou materiálů a hovoří o dosažených výsledcích a charakteristických úskalích.

### 9.1 Analýza vstřikování

Před finálním návrhem nástroje byla vytvořena analýza vstřikování v programu Moldex 3D. Výsledky této analýzy pomohly specifikovat úzká místa v procesu. V našem případě, kdy vstřikujeme takto tlustostěnný profil, se tento postup jeví jako nejvýhodnější. Předpokládáme, že se bude jednat o dvojnásobnou formu se studeným vtokovým systémem a temperančními kanály o průměru 8 mm (viz. ilustrace 22). Důležité výsledky analýzy jsou popsány v jednotlivých subkapitolách níže. Určení pozice vtoku nenarušuje funkční plochu kolečka a vychází z předešlého výzkumu. Tento výsledek tedy není zahrnut v následujících subkapitolách.



Obrázek 22 Rozvržení dutin vtoku a temperančních kanálů ve formě.



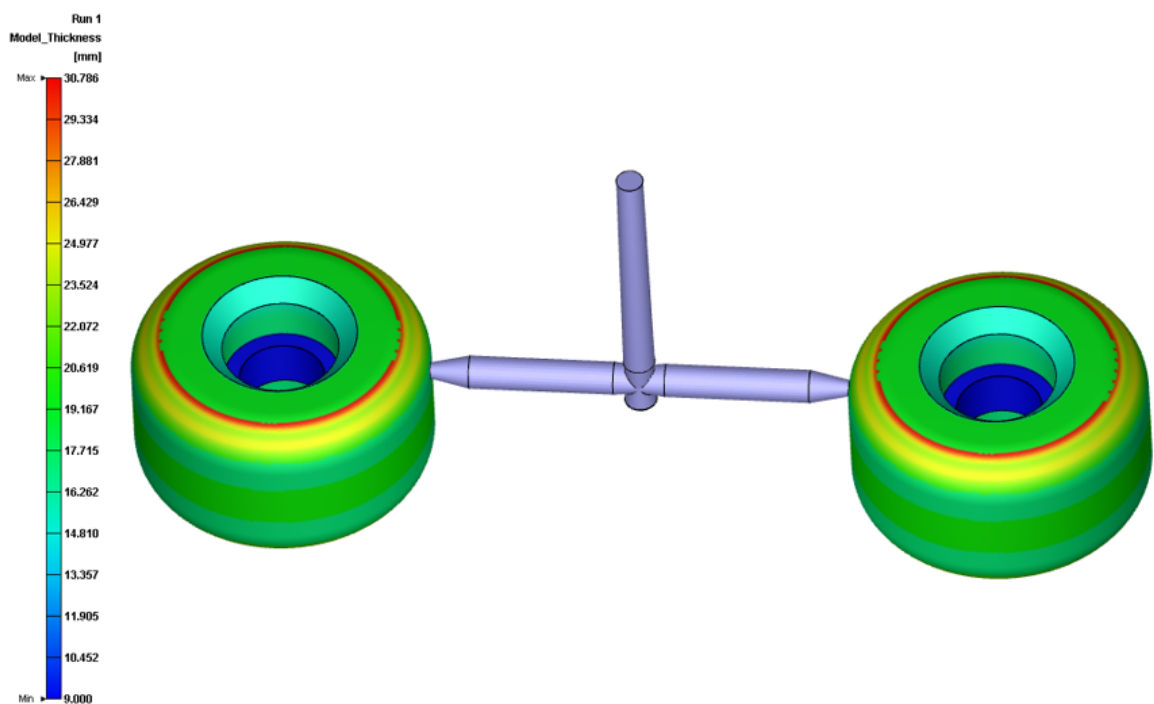
Nastavený materiál pro analýzu byl – Elastollan C 95A. Další nastavené parametry pro analýzu jsou uvedeny níže v tabulce 8.

Tabulka 8 Technický list nastavených parametrů pro analýzu.

Proces	Hodnoty	Jednotky
Doba plnění	1,2	s
Doba dotlaku	15	s
Doba chlazení	25,6	s
Vstřikovací tlak	35	MPa
Teplota tání materiálu	220	°C
Teplota formy	60	°C
Vyhazovací teplota	99,85	°C
Teplota vzduchu	25	°C
Přepnutí na dotlak	99,8	%

### 9.1.1 Tloušťka stěn

Jak již bylo několikrát uvedeno – tloušťka stěny je důležitým faktorem u vstřikovaných výrobků. Tloušťka stěny by měla být co nejvíce jednotná. Hlavní stěna kolečka je sjednocena na rozměr pohybující se okolo 20 mm. Z ilustrace níže lze dále vyčíst, že maximální tloušťka stěny je 30,786 mm a minimální 9 mm, což je část kolečka, která vymezuje ložiska vůči ose trucků.

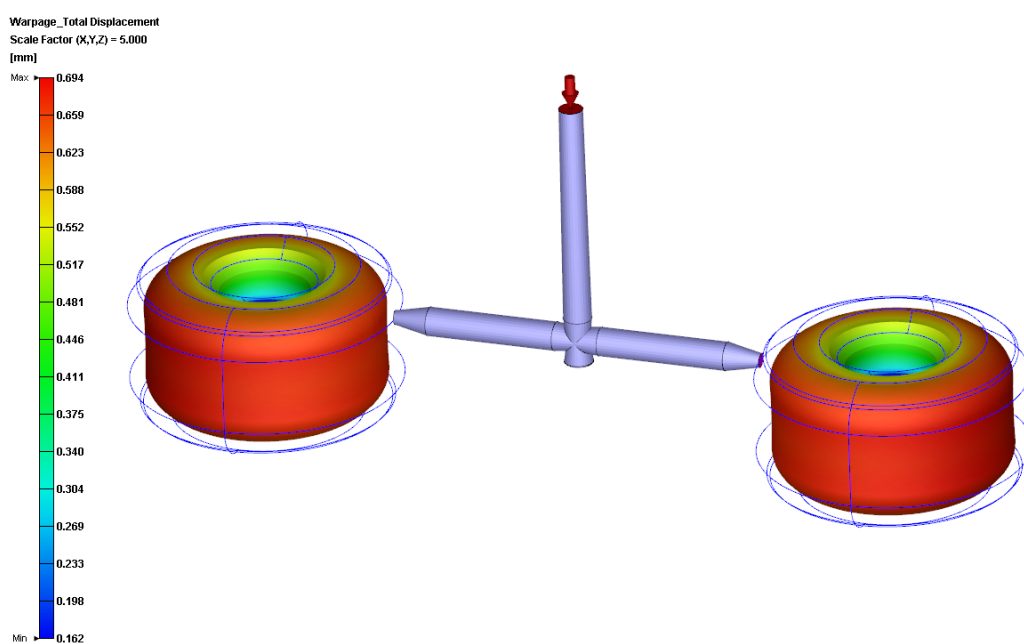


Obrázek 23 Výsledek analýzy zobrazující tloušťku stěny profilu.

### 9.1.2 Celkové smrštění

Lze předpokládat, že smrštění u takto tlustostěnného profilu bude ovlivněno řadou faktorů, jako je: teplota formy, vstřikovací tlak, typ materiálu a geometrie výrobku. Na základě ilustrace lze konstatovat, že smrštění profilu je asymetrické a je koncentrováno především na kontaktní ploše profilu a jeho maximální hodnota je 0,694 mm. To může být způsobeno nerovnoměrným rozložením teploty ve formě během chlazení polymeru. Tyto změny teploty mohou mít vliv na rychlost smrštění polymeru a dále mohou vést k nevyrovnanému průběhu smrštění. Je tedy důležité kontrolovat a sledovat smrštění profilů s tlustou stěnou už během výroby a přizpůsobovat proces vstřikování polymeru tak, aby se minimalizovaly problémy s rozměry a tolerancemi výrobků.

Výsledky analýzy však nemusí být zcela přesné, a právě proto se jako nejlepší způsob jeví zjištění skutečné hodnoty smrštění až při vstřikování. Proto bude tento fakt zohledněn při návrhu vstřikovací formy v kapitole 9.2. Je jednodušší upravit formu tak, aby z ní bylo odebráno určité množství materiálu než následně upravovat díl. Při odebrání materiálu dochází ke zmenšení rozměru u otvorů (vnitřních rozměrů) vstřikovaného dílu, a tudíž musí být zvětšeny vnější rozměry formy. Z konstrukčního hlediska formy je tedy důležité učinit rozhodnutí, které rozměry jsou pro funkci kolečka rozhodující. V tomto případě jsou to vnitřní otvory pro ložiska, jejichž hodnota smrštění se pohybuje kolem 0,4 mm. Při návrhu formy to bude zohledněno tak, aby v případě potřeby mohlo dojít k jejich zmenšení (viz. kapitola 9.2.1.1 a 9.2.2.1). [35]

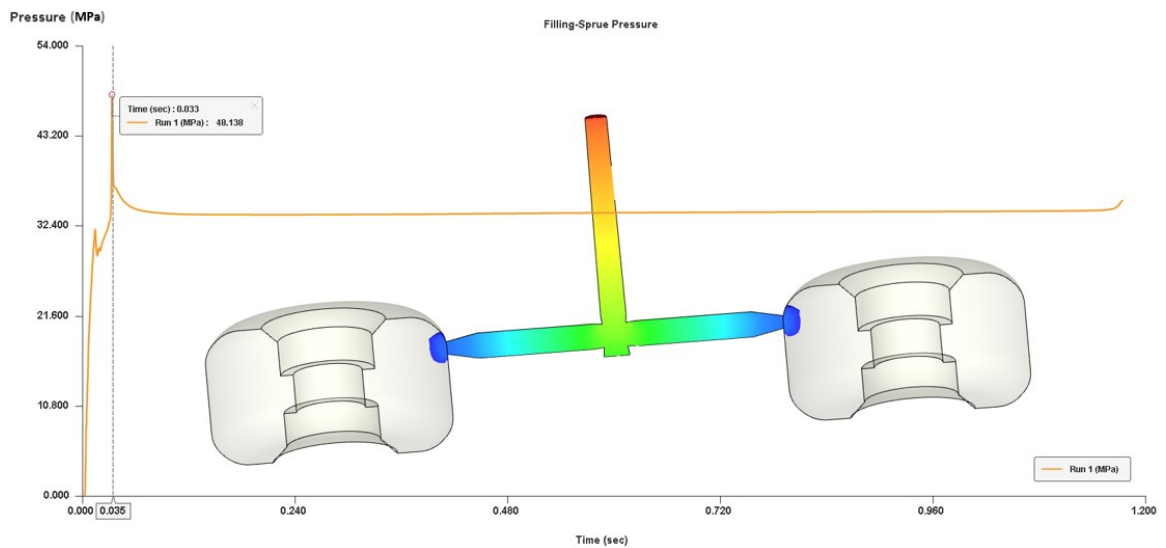


Obrázek 24 Výsledek analýzy zobrazující celkové smrštění profilu.

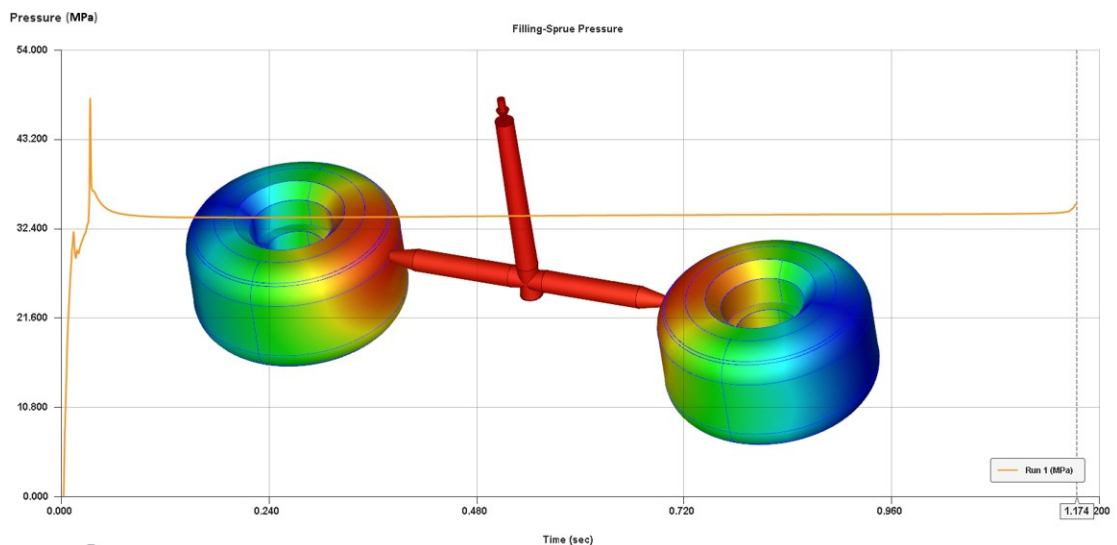


### 9.1.3 Plnicí tlak

Tento výsledek ukazuje graf závislosti plnicího tlaku na času plnění. Výsledek lze využít k vyhledání neobvyklého nárůstu vtokového tlaku během plnění. K prvnímu poklesu tlaku dojde při přechodu taveniny do rozvodných kanálů – zvětší se prostor pro taveninu, a tudíž poklesne tlak (viz. obrázek 25). Dle analýzy k tomuto dojde v čase okolo 0,035 s. K druhému výraznějšímu poklesu dojde ve chvíli, kdy tavenina začne plnit dutinu formy. Pokles je výraznějšího charakteru právě z důvodu poměrně velkých (tlustostěnných) dutin formy. Celkový čas zaplnění dutiny formy je dle této simulace 1,174 s.



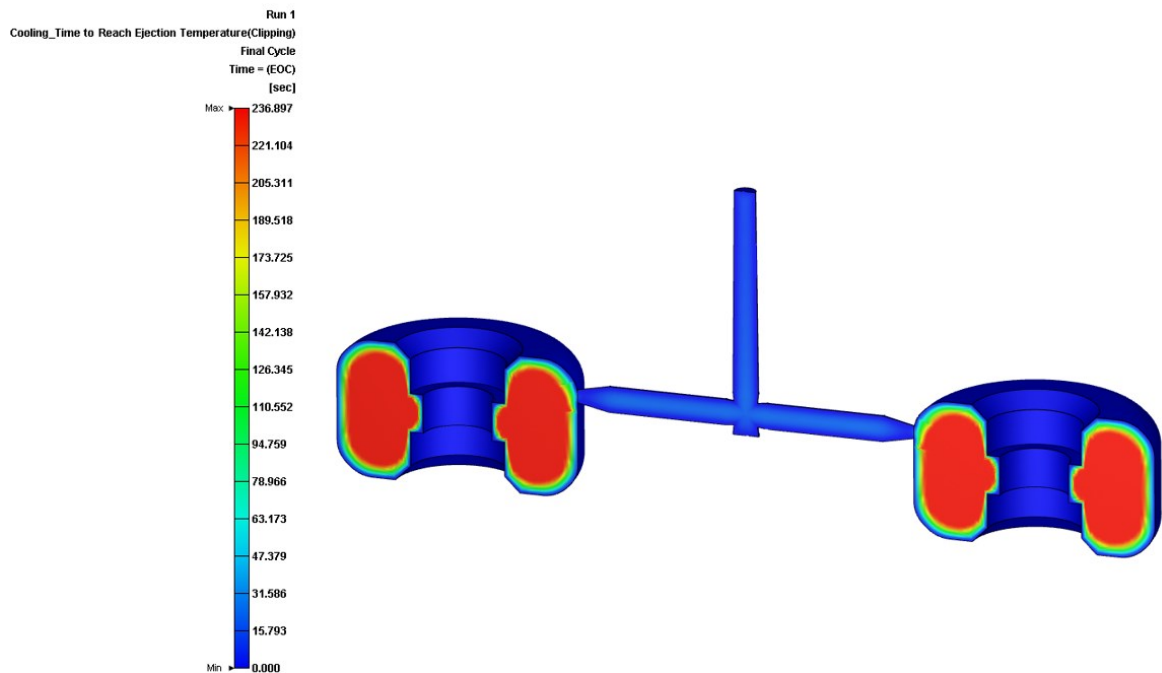
Obrázek 25 Výsledek analýzy zobrazující průběh plnicího tlaku se začátkem plnění dutiny.



Obrázek 26 Výsledek analýzy zobrazující průběh plnicího tlaku s kompletně zaplněnou dutinou.

### 9.1.4 Doba do dosažení vyhazovací teploty

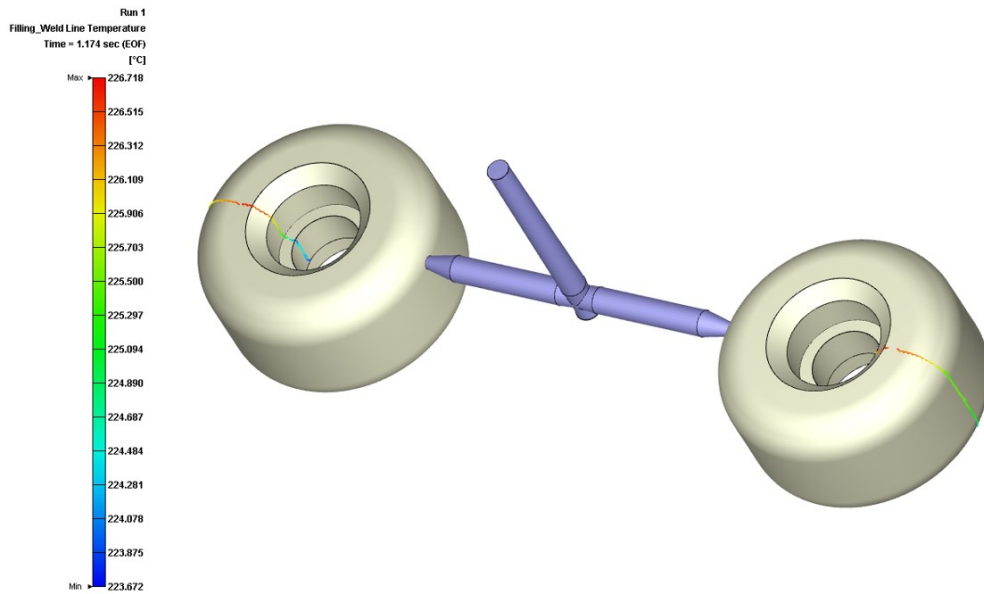
Tento časový odhad je založen na výsledcích z fáze dotlaku a určuje se podle teploty povrchu dutiny formy a teploty ve středu dílu. Tyto hodnoty jsou důležité pro zajištění dostatečného ochlazení dílu, aby bylo možné jeho vyhození. Jak je u takto tlustostěnného profilu patrné, nejvyšší čas potřebný k vyhození výrobku vyšel 236,9 s (vyhazovací teplota – 98,5 °C) blíže ke středu výrobku.



Obrázek 27 Výsledek analýzy zobrazující čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty.

### 9.1.5 Studené spoje a jejich teplota

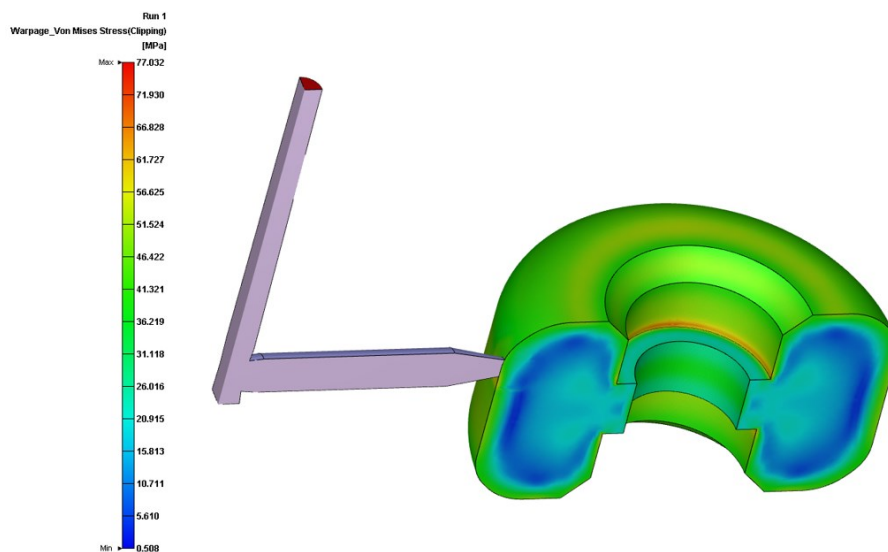
Tato analýza zobrazuje místa, kde dochází k takzvanému studenému spoji. Tato situace nastává, když se v dutině setkají čela taveniny. Tato čela jsou chladnější než zbytek materiálu, a proto jejich spojení nemusí být dostatečně pevné. Z hlediska umístění vtokových kanálů a symetrického tvaru profilu je zřejmé, v jakém místě bude ke studenému spoji docházet (viz. ilustrace 28). Teplota taveniny se při vstřiku a dotlaku pohybuje okolo 228 °C. Z výsledku analýzy lze dále vyčíst, že nejnižší teplota studeného spoje se pohybuje okolo 224 °C. Tento rozdíl 4 °C není markantní a naznačuje, že by studený spoj neměl způsobovat potenciální komplikace. Pokud by byla přeci jen potřeba optimalizace, nabízí se např. možnost řešení za pomoci změny místa ústí vtoku anebo zvýšení teploty taveniny.



Obrázek 28 Výsledek analýzy zobrazující studené spoje a jejich teplotu.

### 9.1.6 Von Misesovo napětí

Von Misesovo napětí je veličina, která vyjadřuje celkovou intenzitu napětí ve všech směrech v materiálu. U vstříkovaných výrobků je důležité sledovat Von Misesovo napětí, protože v procesu dochází k vysokému mechanickému namáhání materiálu vlivem vysokého tlaku taveniny a vysokých teplot. Pokud je toto napětí v materiálu příliš vysoké, může dojít k různým vadám, jako jsou trhliny, praskliny nebo deformace výrobku. Níže je uveden tento výsledek analýzy pro kontrolu a minimalizaci rizik vzniku vad.

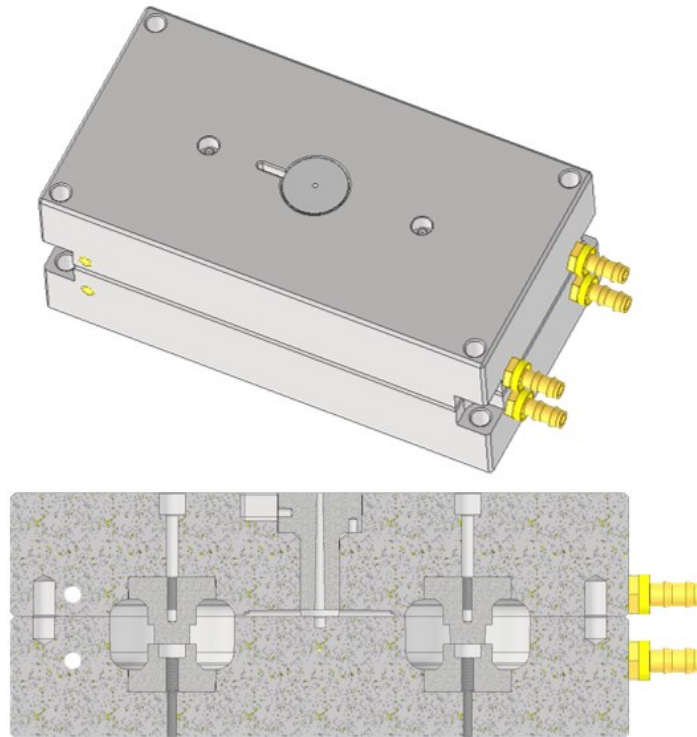


Obrázek 29 Výsledek analýzy zobrazující rozložení Von Misesova napětí v řezu.

## 9.2 Návrh nástroje

V rámci prototypového vstřikování (kapitola 5.3) se jedná o prototypovou dvoudeskovou vstřikovací formu se studeným vtokovým systémem, která obsahuje dvě dutiny a temperaci. Počet dutin je navržen na základě velikosti objemu plastifikační jednotky zamýšleného vstřikovacího stroje. Forma neobsahuje vyhazovací systém. Sestava formy se skládá z 11 dílů (viz. výkresová dokumentace v přílohách). Primární jsou vyjmutelné tvarové piny a již zmíněné desky. Dále je sestava opatřena normalizovanými díly: vtokovou tryskou, nátrubky a ucpávky pro temperaci, kolíky a šrouby. V kapitolách níže jsou popsány základní komponenty. Forma byla vymodelována za pomoci programu Autodesk Inventor Professional 2023. Při jejím návrhu bylo bráno v potaz smrštění výrobku a také odformovací úkosy. Materiál nenormalizovaných tvarových částí formy je nástrojová ocel 1.2343. Níže je uvedena charakteristika tohoto materiálu:

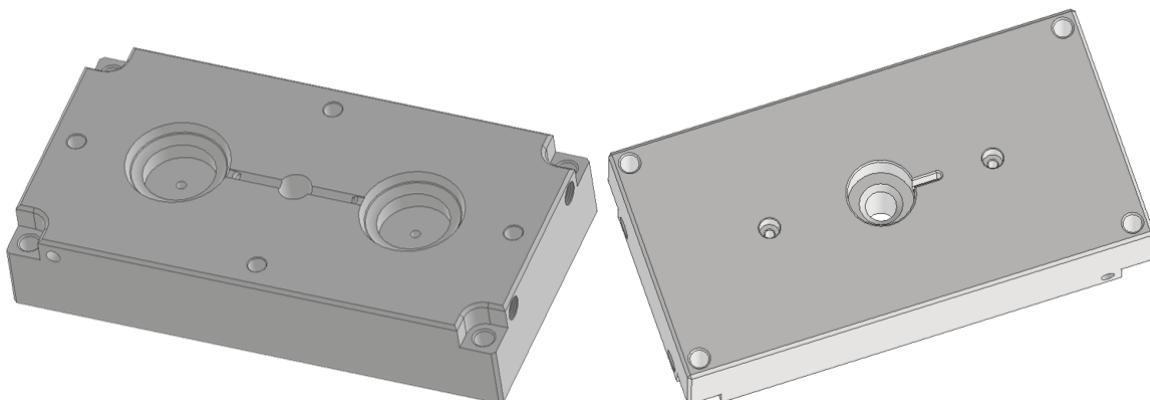
- Vlastnosti: Houževnatá, odolná proti tepelnému zatěžování, dobře snáší teplotní rázy, nástroje je možné chladit vodou, špatně se brousí, dobře prokaluje i ve větších rozměrech, dobrá tepelná vodivost. [39]
- Použití: Formy na tlakové lití lehkých kovů, části malých a středních zápustek, části forem na plasty, nože pro stříhání za tepla, protlačování za tepla. [39]



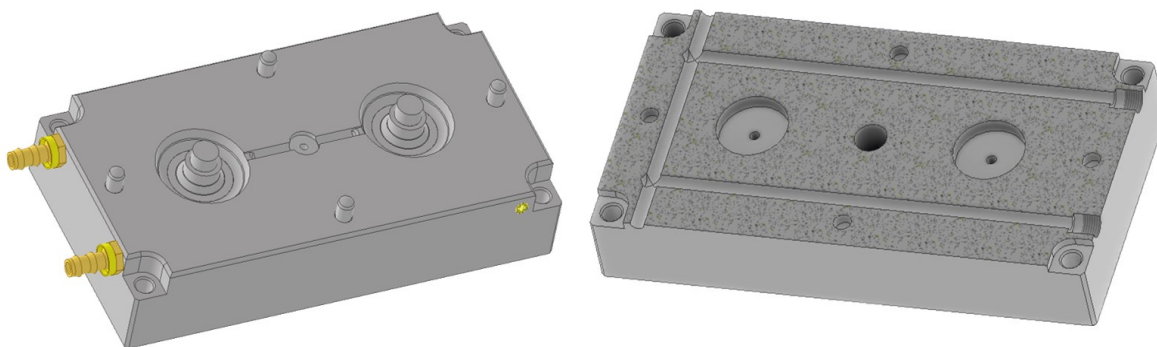
Obrázek 30 Sestava nástroje – vstřikovací formy a pohled do jejího řezu.

### 9.2.1 Pevná strana formy

Pevná strana formy (dále jen PE) je deska o rozměrech 280 x 56 x 145 mm. Tato deska je opatřena vtokovou tryskou, vtokovými kanály a dvěma piny. Vtoková tryska je zajištěna proti pootočení za pomoci kolíku a piny jsou zajištěny pomocí dvou šroubů M5 x 40 mm. Dutiny formy jsou zvětšeny o 1 % kvůli smrštění výrobku a jejich hloubka odpovídá bočnímu rádiusu kolečka tak, aby stopa po vtoku nezasahovala do kontaktní plochy kolečka. Další význam této hloubky je spojen s pinem, který je v tomto případě delší než dutina v desce PE (viz. ilustrace 32.). Důvodem je úmysl ručního odformování – je požadováno aby kolečka po vstříknutí zůstala právě na těchto pinech, a tím pádem v PE. Na rozích desky jsou čtyři otvory s vybráním pro hlavu šroubů, s pomocí kterých je deska uchycena ve vstříkovacím stroji. Vystředění dutin desek je zajištěno čtyřmi symetricky uloženými kolíky o průměru 10 mm. PE disponuje temperačními kanály o průměru 8 mm (viz. ilustrace 32).



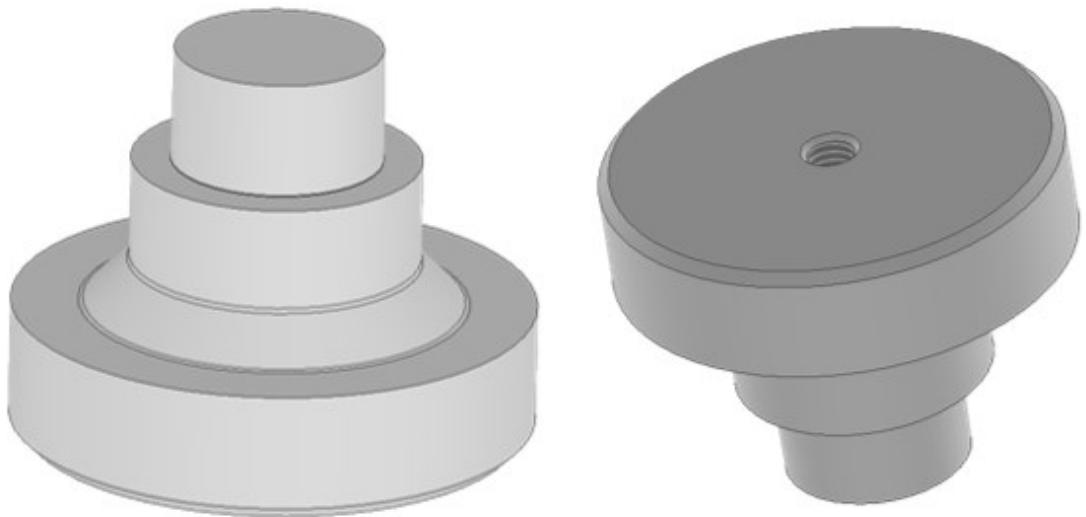
*Obrázek 31 PE bez osazených komponent.*



*Obrázek 32 Vlevo – PE osazená komponenty, vpravo – řez zobrazující temperační kanály.*

### 9.2.1.1 Pin pevné strany formy

Piny jsou také zvětšeny o 1 %. Průměr určený pro ložisko je tolerovaný jako js10 tak, aby bylo po odformování kolečka zajištěno uložení ložiska s přesahem. V případě že by byl průměr moc velký, piny by se upravily na soustruhu. Piny jsou dále tolerovány na svém největším průměru tak, aby bezproblémově dosedly do PE. Samozřejmostí je také tolerance na celkové délce pinu, aby desky při zaformování dosedly bez vůle a zároveň v dělicí rovině pinů nevznikal přetok. Nejmenší průměr pinů není funkčním rozměrem, pouze vymezuje vzdálenost ložisek vůči ose trucků, a proto je opatřen odformovacím úkosem  $1^\circ$ . Pro zajištění pinu v PE pomocí šroubu je určena závitová díra M5. Výkresová dokumentace pinu PE je obsahem příloh práce.

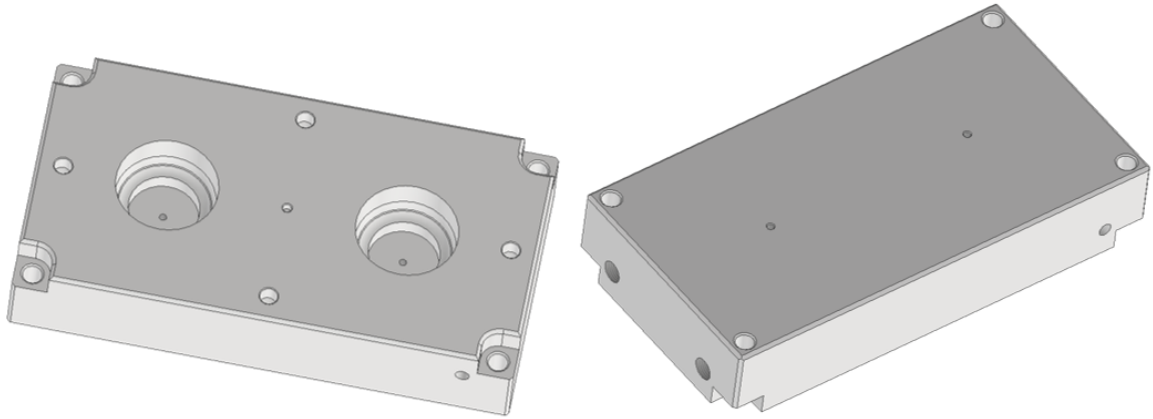


Obrázek 33 Pin PE.

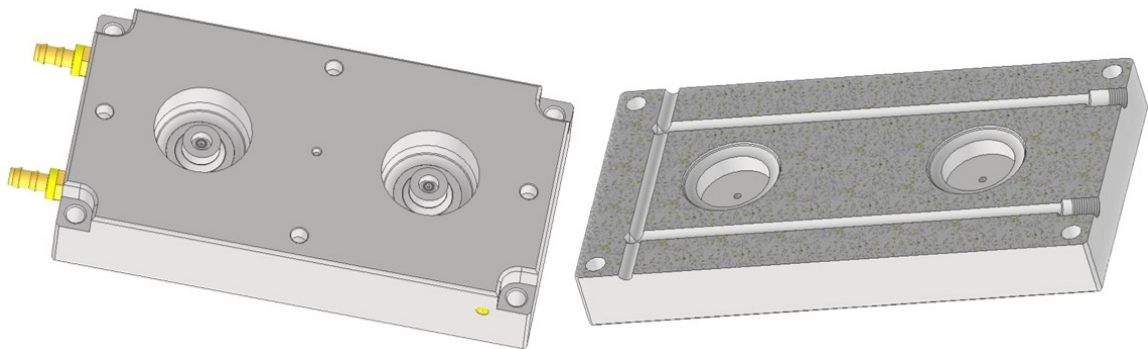
### 9.2.2 Pohyblivá strana formy

Pohyblivá strana formy (dále jen PO) má stejné hlavní rozměry jako PE (280 x 56 x 145 mm). Dutiny formy jsou negativem kontaktní plochy kolečka a jeho bočního rádiusu. Dutiny jsou opět zvětšeny kvůli smrštění o 1 %. Negativ kontaktní plochy je opatřen odformovacím úkosem  $1^\circ$ , který by měl zajistit snadnější odformování v případě, že kolečko zůstane v PO. V ideálním případě by kolečka měla mít kontaktní plochu bez úkosu. Avšak s ohledem na fakt, že komerčně dostupná kolečka se po odlévání ještě soustruží do finální podoby (viz. kapitola 5.1.1), lze tento fakt přehlédnout. Jak již bylo zmíněno, je požadováno, aby kolečko po odformování zůstalo v PE. Pro případ, že by tomu tak nebylo, jsou piny PO uchyceny ze strany dutiny formy tak, aby se s kolečky dalo

manipulovat bez požadavku na vytažení celé PO ze stroje. PO dále obsahuje přídržovač vtoku, otvory pro kolíky, otvory pro uchycení ve stroji a temperační kanály.



*Obrázek 34 PO bez osazených komponent.*



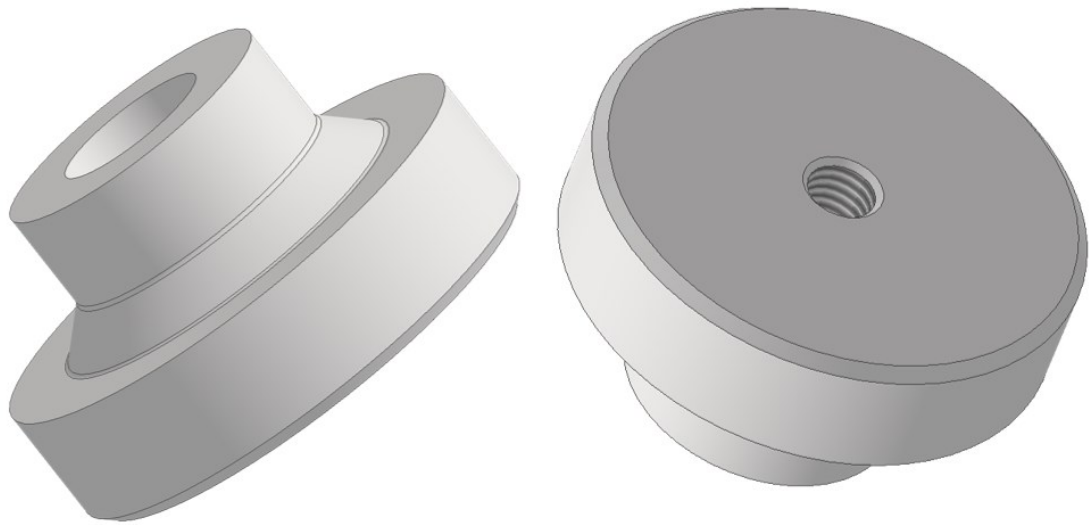
*Obrázek 35 Vlevo – PO osazená komponenty, vpravo – řez zobrazující temperační kanály.*

#### **9.2.2.1 Pin pohyblivé strany formy**

Piny jsou opět zvětšeny o 1 %. Průměr určený pro ložisko je logicky také tolerován na js10 tak, aby bylo po odformování kolečka zajištěno uložení ložiska s přesahem. V případě že by byl průměr moc velký, opět by se piny upravily na soustruhu. Piny jsou dále opět tolerovány na svém největším průměru tak, aby bezproblémově dosedly do otvoru v PE. Samozřejmostí je tolerance na celkové délce pinu tak, aby desky při zaformování dosedly bez vůle a zároveň v dělicí rovině pinů nevznikal přetok. Jak již bylo uvedeno, piny jsou uchyceny do PO za pomoci šroubu M5 ze strany dutiny formy. Pro případ, že kolečko zůstane v této straně formy, je pin opatřen otvorem se závitem M6. Pokud kolečko zůstane po odformování v této desce, postup je plánován následovně – povolí a vyjme se šroub M5



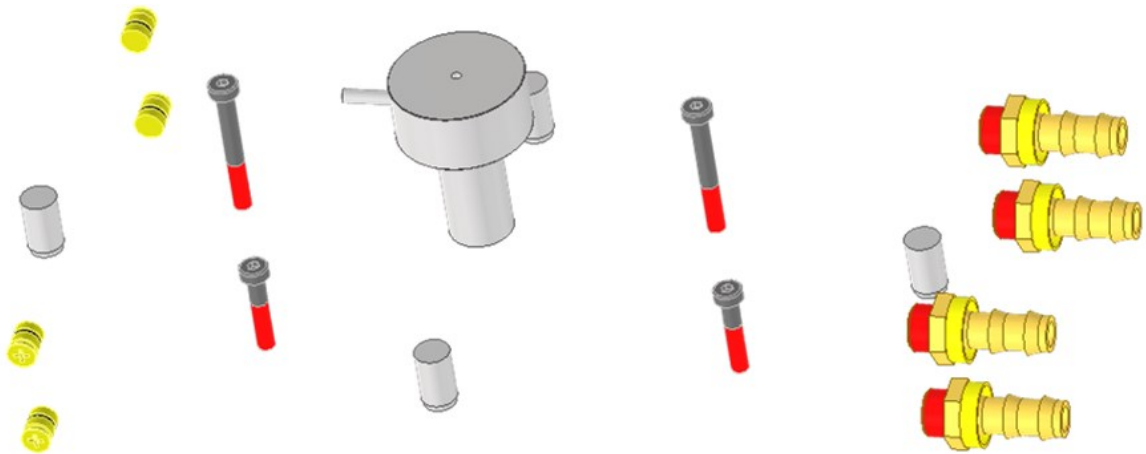
a do otvoru se závitem M6 v pinu PO se našroubuje vyrážec, s pomocí kterého by mělo být kolečko vyjmuto. Výkresová dokumentace pinu PO je také obsahem příloh práce.



*Obrázek 36 Pin PO.*

### **9.2.3 Zbylé normalizované komponenty**

Veškeré normalizované díly jsou převzaty z webu Meusburger. Jedná se o trysku E1600 s vnitřní geometrií 1°, dále šrouby pro uchycení pinů M5x50 mm a M5x20 mm, čtyři kolíky 10x15 mm, kolík 4x20 mm, nátrubky E20405 a ucpávky E2079 pro teplotu vždy po čtyřech kusech.



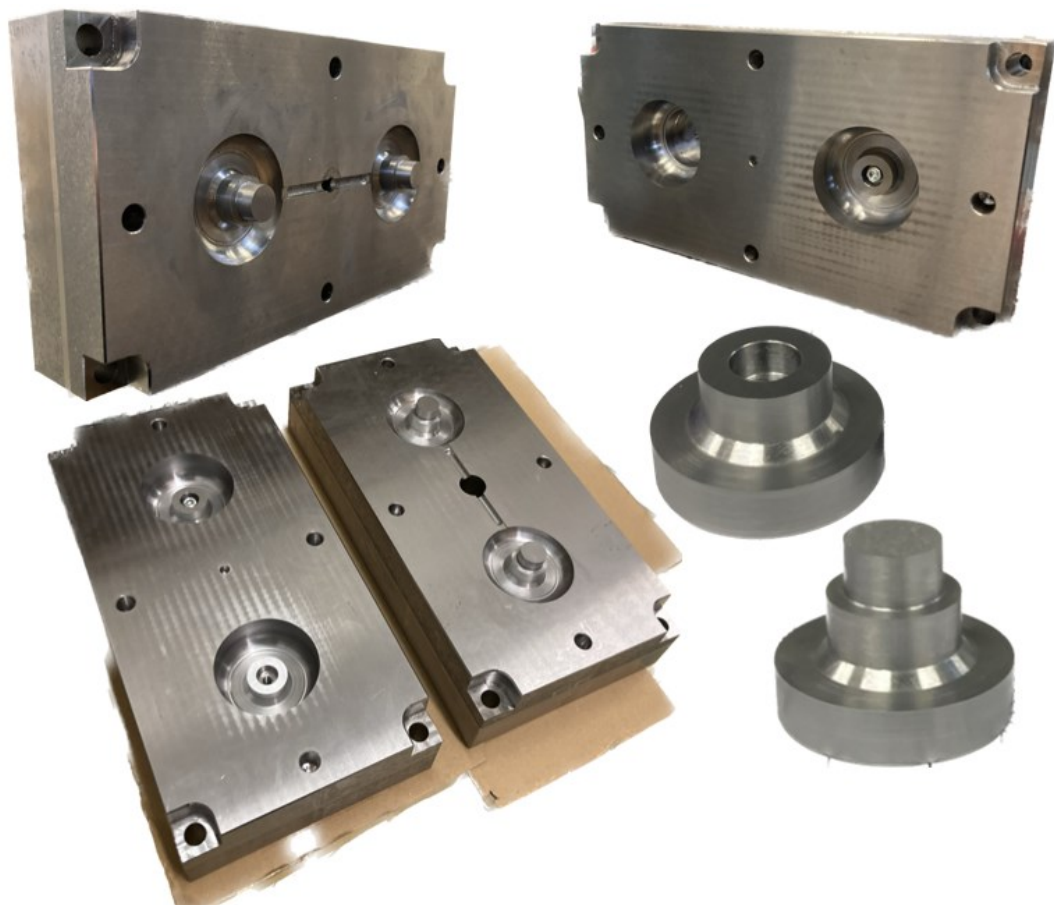
*Obrázek 37 Normalizované komponenty sestavy formy.*



### 9.3 Výroba tvarových částí formy

Celá výroba se řídila dle výrobních výkresů (viz. přílohy). Jako první byly vyrobeny piny PO a PE z důvodu pozdějšího zalícování do desek formy. Piny byly vysoustruženy na půdě univerzity na stroji DMG MORI | NXT 1000 a programování probíhalo přímo ze stroje. Následně byla čela pinů broušena na finální rozměr na brusce na plocho.

Polotovary na desky PO a PE byly v rámci ekonomické úspory pořízeny nenaformátované. Formátování a následné obrábění funkčních částí bylo realizováno opět na půdě univerzity na stroji DMG MORI | DMU 50 a brusce na plocho. V rámci programování bylo využito kombinace dílenského a CAM programování. Kvůli odformovacím úkosům na negatívech funkčních ploch koleček bylo využito pětiosé obrábění. CAM programování probíhalo v programu Siemens NX. Při obrábění dutin pro piny probíhalo za chodu zkušební zalícování pinů. Na konci výroby byla forma sestavena, měřena a kontrolována především v rámci dosednutí desek za pomoci obtisku barvy z jednoho pinu PE na pin PO. V případě, kdy by se barva neobtiskla, bylo počítáno s případným vypodložením pinů. Výroba tvarových částí formy i s veškerými přípravami zabrala okolo 20 h.



Obrázek 38 Obrobené desky PO a PE s piny.

## 9.4 Proces vstřikování TPU

Jak již bylo uvedeno, nejdříve se začalo se vstřikováním TPU za předpokladu, že tento materiál bude přece jen v rámci tohoto výzkumu a jeho časové náročnosti zajišťovat větší jistotu finálního produktu. Jako první se vstřikovalo do formy bez vyvrtaných temperančních kanálů, a tudíž i bez temperace. Vstřikování probíhalo na půdě univerzity konkrétně v Centru polymerních systému (CPS). Vstřikovalo se na stroji Mitsubishi 180MEtII.

Vstřikovaným granulátem byl Elastollan od firmy BASF konkrétně EC 95A 55 000. Materiálový list se součástí elektronických příloh této práce. Níže jsou uvedeny základní vlastnosti tohoto materiálu:

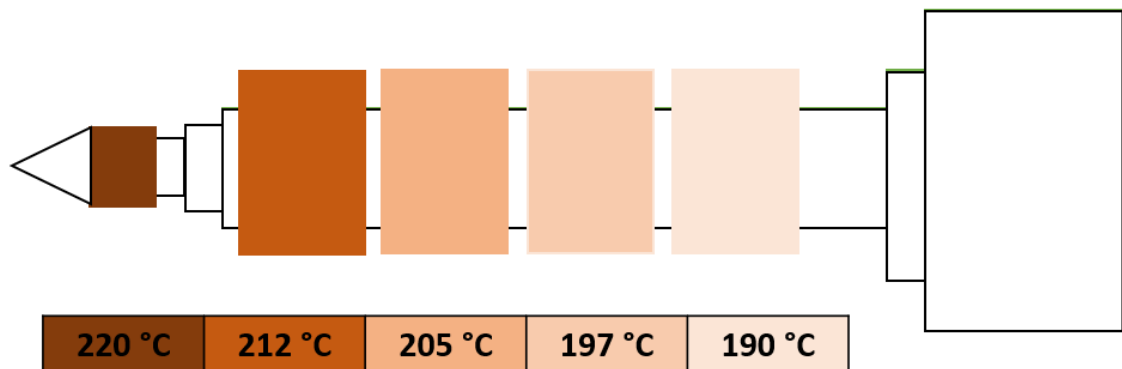
- **Speciální vlastnosti** – Vysoká pevnost v tahu, vysoká odolnost proti přetržení, dobré tlumící vlastnosti, vysoká odrazová elasticita, velmi dobrá odolnost proti opotřebení, dobrá pružnost při nízkých teplotách a odolnost proti hydrolyze. [36]
- **Typické aplikace** – Technické díly, hadice, průmyslová kolečka, síťové prvky. [36]
- **Doporučení pro zpracování** – Před vstřikováním předsušit v sušárně s cirkulací vzduchu 2–3 h při 100–110 °C. Teplota taveniny 225 °C, teplota formy 25–40 °C, teplota plastikační jednotky 205–225 °C. [36]
- **Tvrdość materiálu** – 96 ShA (45 ShD). [36]

Granulát byl před vstřikováním sušen v sušárně Memer UN55 po dobu 90 min při teplotě 100 °C. V tomto mečičase byla upnuta a vystředěna forma ve stroji (viz. ilustrace 39).



Obrázek 39 Forma upnutá ve stroji.

Dále byly na stroji nastaveny teploty pro plastikační jednotku. Teploty jsou zobrazeny na ilustraci níže:



Obrázek 40 Teploty plastikační jednotky pro vstřikování TPU.

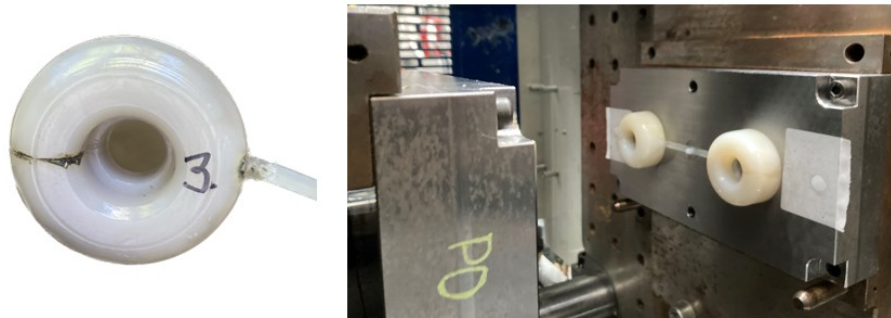
Po vysušení materiálu a vyhřátí plastikační jednotky se přistoupilo k samotnému procesu vstřikování. Byly nastaveny zkušební parametry vstřikování, které se postupně odlaďovaly do finální podoby. Během procesu se forma několikrát separovala za pomoci separátoru Lusin Alro OL 151. Bylo provedeno 17 zdvihů, než byl proces finálně zoptimalizován. Níže jsou uvedeny hlavní problémy, kterým se během optimalizace muselo čelit.

- **1. – 2. zdvih:** Nedostatečná velikost objemu taveniny vstřikované do dutiny formy, výsledkem čehož nemohl účinně působit dotlak. Kolečka jsou zbarvena do černa kvůli předešlému vstřikovanému materiálu.



Obrázek 41 Výsledek 1. – 2. zdvihu.

- **3. – 5. zdvih:** Dieselův efekt – nedostatečné odvzdušnění formy. Tento problém byl vyřešen za pomoci vyložení formy páskou v okolí dutin, kde se tento jev vytvářel.



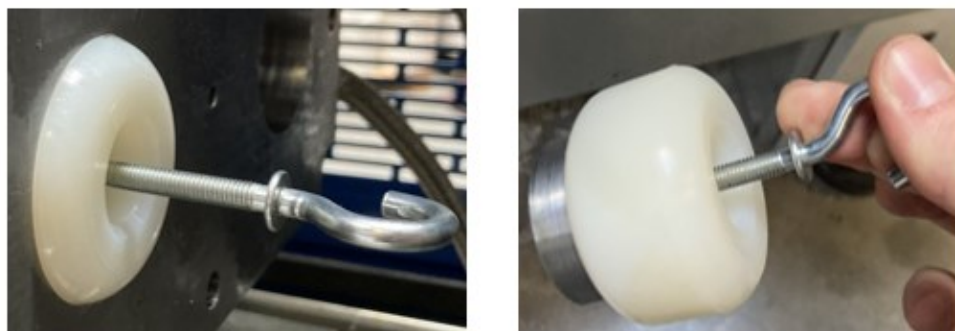
Obrázek 42 Výsledek 3. – 5. zdvihu.

- **6. – 9. zdvih:** Výrazně viditelný studený spoj. Tento problém byl postupně eliminován za pomoci snížení rychlosti vstřikování a zvýšení tlaku vstřikování. Zároveň se při těchto zdvích ověřila funkčnost rozměru pro ložiska ve smyslu snadného manuálního zalisování ložiska do kolečka.



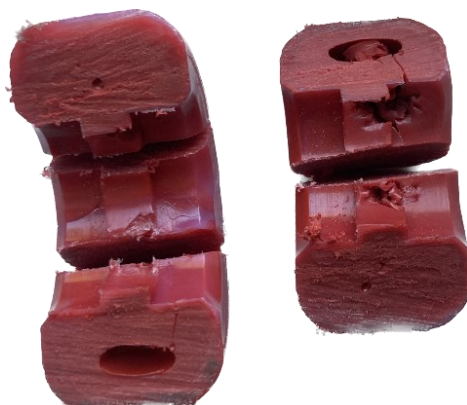
Obrázek 43 Výsledek 3. – 5. zdvihu.

- **10. zdvih:** V rámci minimalizace optické stopy po studeném spoji bylo přimícháno do násypky červené barvivo. Při tomto zdvihu zůstalo kolečko poprvé v PO formy. Za použití vyrážče, bylo kolečko bez problému vyjmuto z formy.



Obrázek 44 Výsledek 10. zdvihu – znázornění postupu vyjmutí ze PO formy.

- **11. – 15. zdvih:** Při těchto zdvizích se kontrolovala přítomnost vzduchových kapes ve výrobku. Po rozřezání se ukázalo, že kolečko tyto kapsy bohužel obsahovalo. Za pomoci zvýšení vstřikovacího tlaku byl tento problém eliminován.



*Obrázek 45 Výsledek 11. – 15. zdvihu – vzduchové kapsy uvnitř kolečka.*

- **16. – 17. zdvih:** Proces byl zoptimalizován. Stopa po studenem spoji lze vidět pouze minimálně. Po rozřezání předposledního vzorku kolečko neobsahovalo žádné vzduchové kapsy.



*Obrázek 46 Výsledek 16. – 17. zdvihu.*

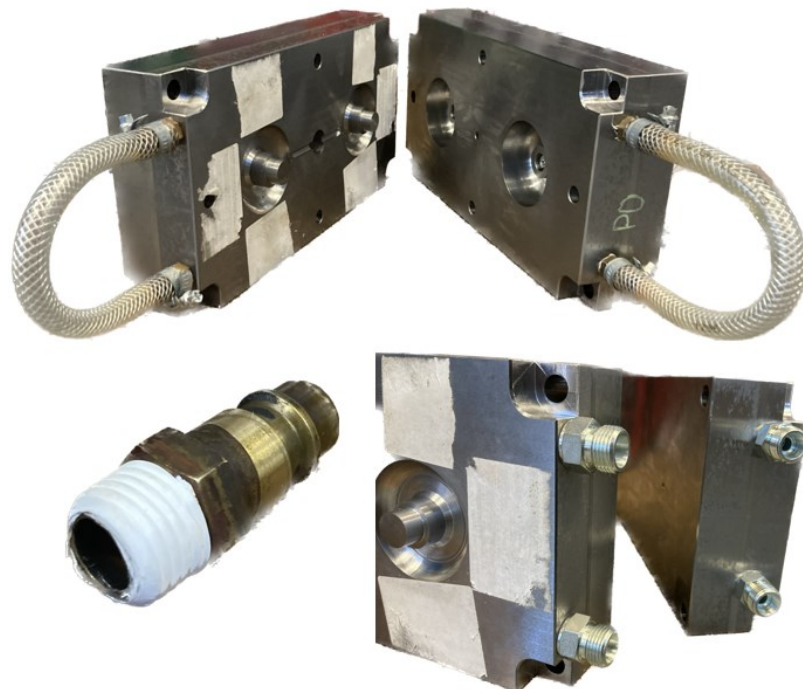
Níže v tabulce 9 jsou uvedeny výsledné zoptimalizované parametry, které byly nastaveny na vstřikovacím stroji. Přičemž teplota formy se při procesu opakovaně měřila a rovnala se teplotě okolí + max 5 °C.

*Tabulka 9 Zoptimalizované parametry vstřikování TPU.*

Čas chlazení [s]	Rychlost vstřiku [mm/s]	Vstřikovací tlak [MPa]	Přidržovací tlak [MPa]	Teplota formy [°C]
210	50	50	30	25



Po zoptimalizování a ověření funkčnosti výrobní technologie následovala úprava formy ve smyslu vyvrtání temperačních kanálů, aby se mohlo vyrábět s formou vyhřátou na stálou teplotu. Kanály byly vyvrtány externě mimo půdu univerzity. V rámci časové úspory se přistoupilo k drobnému odklonění od návrhu rozložení kanálů (viz. obrázek 47). Závit nátrubků byly opatřeny teflonovou páskou kvůli lepšímu zajištění těsnosti. Procesní parametry tedy zůstaly stejné až na teplotu formy, která byla vytemperována na stálou teplotu 30 °C. Temperaci obstarávala temperační jednotka ICS Tricoolthermal C7 a temperačním médiem byla voda. Stálá teplota formy napomohla stabilizovat proces tak, aby byl vyroben dostatek vzorků skateboardových koleček pro testování. Na obrázku 48 jsou zobrazena výsledná kolečka po stabilním zoptimalizovaném procesu.



*Obrázek 47 Forma s vyvrtanými temperačními kanály a příslušenstvím.*



*Obrázek 48 Finální podoba koleček po odladění procesu s uloženým ložiskem.*

### 9.4.1 Výsledky a úvahy

Jak již bylo uvedeno, stávající komerční produkce koleček využívá materiálovou skupinu reaktoplasty. U této skupiny polymerů je velmi obtížné minimalizovat dopad na životní prostředí. Z tohoto důvodu a na základě teoretické části, je prvním zvoleným alternativním materiálem TPU. Tento materiál však nelze zpracovávat za pomoci technologie odlévání tak, jako je tomu u komerční produkce, a proto bylo využito technologie vstřikování. Vstřikování takto tlustostěnného profilu představovalo výzvu, protože tyto profily jsou více náchylné k deformacím a vzniku vad, pokud není vstřikování provedeno správně. Proto bylo nezbytné zvolit vhodné vstřikovací parametry tak, aby byla dosažena co nejvyšší kvalita výrobku. Ukázalo se, že volba této výrobní technologie nebyla chybou a proces se po optimalizaci jeví jako vhodný pro výrobu skateboardových koleček z materiálu TPU. Během optimalizace procesu se čelilo téměř všem typickým chybám, které se vyskytují u vstřikování tlustostěnných výrobků a jsou popsány v teoretické části práce a dále na ně poukazuje analýza vstřikování (viz kapitola 9.1). Níže v tabulce 10 jsou shrnuty veškeré základní parametry týkající se procesu vstřikování koleček z TPU.

*Tabulka 10 Shrnutí základních parametrů vstřikování koleček z TPU.*

Vstřikovaný materiál	TPU 95 ShA
Vstřikovací stroj	Mitsubishi 180MEtII
Násobnost formy	2
Čas cyklu	212 s
Teplota formy	30 °C
Teplota taveniny	220 °C
Rychlost vstřiku	50 mm/s
Vstřikovací tlak	50 MPa
Přidržovací tlak	30 MPa
Celkový počet zdvihů	30
Počet optimalizovaných zdvihů	14
Počet funkčních sad koleček	7



*Obrázek 49 Kolečka z TPU upnuté na skateboardu.*

### **Výsledky jsou tedy následující:**

- Prokázalo se, že návrh dílu lze realizovat do finální podoby touto technologií.
- Po prvotním testování jízdy se potvrdilo, že kolečka bez problémů fungují se zvoleným materiálem a konstrukcí nástroje.
- Díky prototypovému vstřikování máme dostatek vzorků TPU koleček pro testování v 10. kapitole.
- Potvrdily se hypotézy týkající se prototypů vytisklých na 3D tiskárně. Kolečka nadměrně klouzala a zahřívala se. To bylo způsobeno technologií výroby. U vstřikovaných koleček z TPU k těmto jevům nedocházelo v tak vysoké míře.

### **Úvahy spojené s výrobou za pomoci technologie jsou následující:**

- Nabízí se tedy potenciálně ekologicky šetrnější vize – Sjetá kolečka by se dala znovu využít. Nejprve by se odstranily nečistoty, poté by kolečka byla rozemleta a následně přidávána jako procentuální příměs recyklátu do nového granulátu.
- Proces výroby umožňuje použít pouze nezbytné množství polymeru k naplnění formy, což vede k menšímu odpadu materiálu. Kromě toho lze přebytečný plast z vtoků a vtokových kanálů znovu použít, což vede ke snížení plýtvání materiálem.
- Proces by bylo možné plně zautomatizovat za pomoci vyhazovačů.
- Časová náročnost na výrobu kolečka je oproti komerční produkci minimální a teoreticky nemusí být využito dalších obráběcích strojů po odformování.
- Vyměnitelné piny – pokud bychom chtěli měnit boční tvar kolečka, který je významný z hlediska kapitoly 3.5, bylo by to možné realizovat poměrně snadno a to pouze vyměněním pinů. Dostáváme tedy poměrně jednoduchý, efektivní a multifunkční nástroj.

## **9.5 Procesní parametry PC**

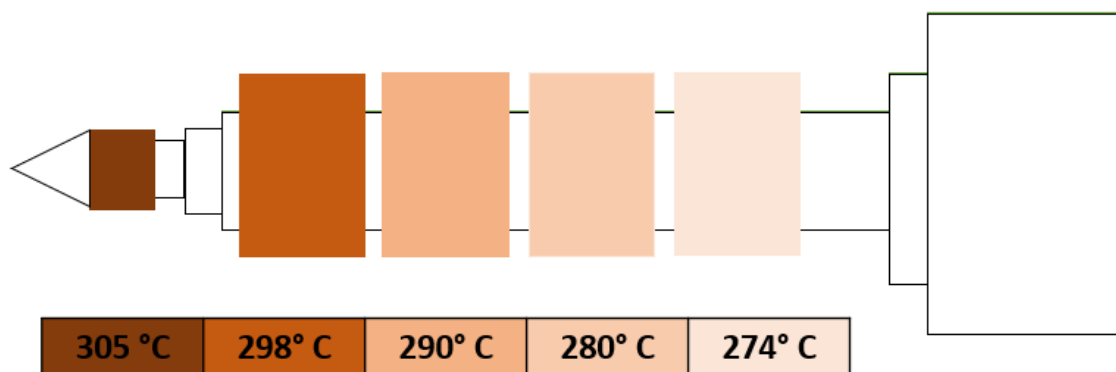
PC vyžaduje vyšší teplotu formy, a proto se nejprve zajistily výsledky z TPU, které teplotu nevyžadovaly. Po vyvrtání temperačních kanálů se postupovalo obdobně jako v předešlé subkapitole. Vstřikování probíhalo na stejném stroji a materiál, který byl dostupný na CPS



byl Polykarbonát ET3127 Makrolon. Materiálový list se součástí elektronických příloh této práce. Níže jsou uvedeny základní vlastnosti materiálu:

- **Vlastnosti** – Vysoká houževnatost, dobrá teplotní odolnost, průhlednost, vysoká rozměrová přesnost. [37]
- **Typické aplikace** – Automobilový průmysl (výroba nárazníků), kryty mobilních telefonů a dále výroba průmyslových součástek (např. kryty a ochranné prvky pro stroje a zařízení), díky své vysoké odolnosti proti nárazu a chemické odolnosti. [37]
- **Doporučení pro zpracování** – Před vstřikováním předsušit v sušárně s cirkulací vzduchu 4 h a více při 90–110 °C. Teplota taveniny 300 °C, teplota formy 80–120 °C, teplota plastikační jednotky 280–320 °C. [37]

Na stroji byly nastaveny teploty pro plastikační jednotku. Teploty jsou zobrazeny na ilustraci níže:



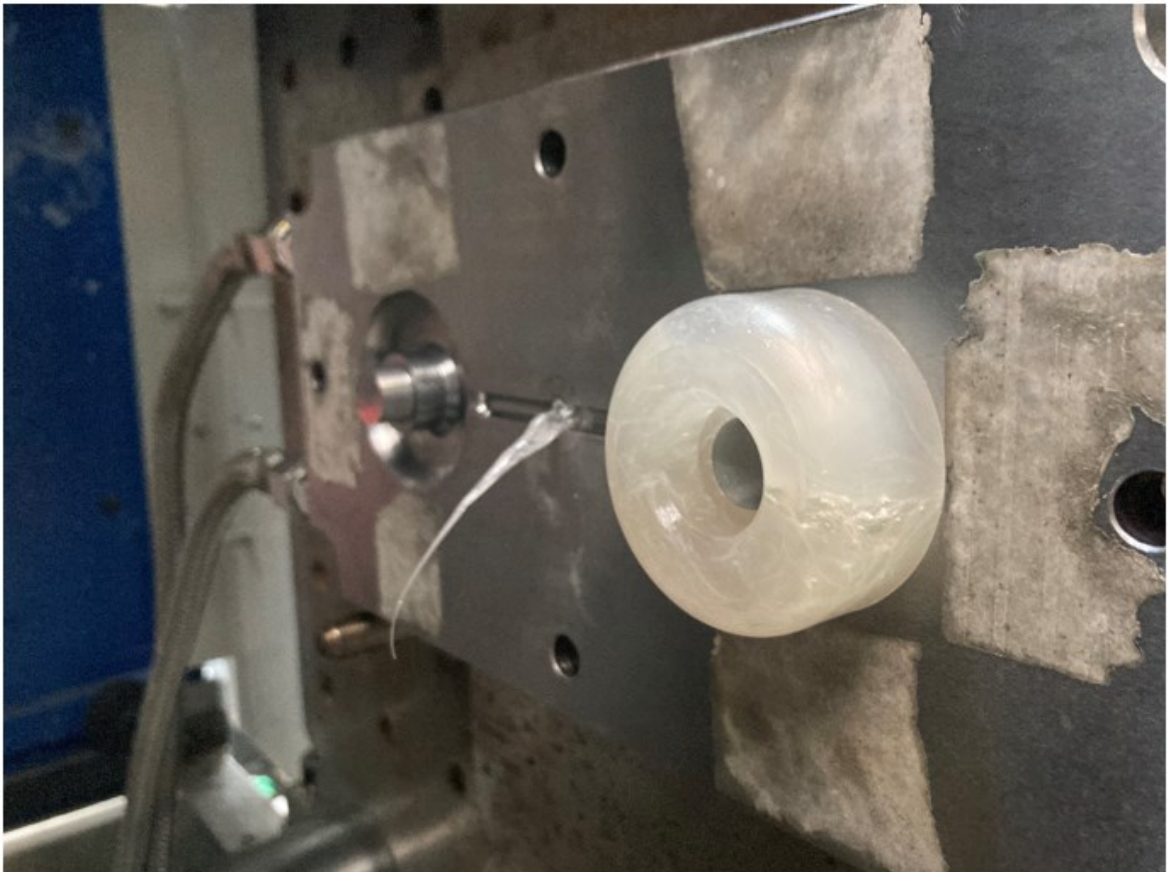
Obrázek 50 Teploty plastikační jednotky pro vstřikování PC.

Opět platí, že po vysušení materiálu a vyhřátí plastikační jednotky se přistoupilo k samotnému procesu vstřikování. Forma byla opět ošetřena za pomoci separátoru Lusin Alro OL 151. Po zkušenostech odvíjejících se z předchozí subkapitoly byly nastaveny parametry na vstřikovacím stroji s tím, že byla zvýšen čas chlazení, dle zkušeností operačního technika (viz. tabulka 11):

Tabulka 11 Nastavené parametry pro vstřikování PC.

Čas chlazení [s]	Rychlost vstřiku [mm/s]	Vstřikovací tlak [MPa]	Přidržovací tlak [MPa]	Teplota formy [°C]
270	50	50	30	80

S ohledem na experimentální charakter procesu bylo cílem ověřit především funkčnost prototypové formy s takto odlišným typem materiálu. Problematické bylo především odformování výrobků. Kolečka z PC sice zůstávala v PE, avšak jejich manuální odformování bylo problematické. Při třetím zdvihu působil výsledek z vizuálního hlediska alespoň v jedné dutině uspokojivě a z důvodu zajištění výsledku bylo rozhodnuto vyjmout PE ze vstřikovacího stroje a kolečko bezpečně odformovat. Odformování proběhlo následovně: po vyjmutí PE ze stroje bylo kolečko vytaženo i s pinem PE z formy. Vyjmutí pinu PE z kolečka bylo dosaženo za pomoci vyrážedla a kladiva. V souvislosti s časovou dotací bylo rozhodnuto, že popisovaný vzorek je dostačující pro následné vyhodnocení experimentu a ve vstřikování se nadále nepokračovalo. Na ilustraci níže je zobrazeno diskutované kolečko z PC ve formě bezprostředně po vstřiku.



*Obrázek 51 Kolečko z PC bezprostředně po odformování.*

### **9.5.1 Výsledky a úvahy**

Materiál, který byl dostupný na CPS má výrazně odlišné klíčové vlastnosti než TPU. Především tvrdost tohoto materiálu je téměř o 50 % vyšší. Dle poznatků z teoretické části práce by se tento experiment měl ideálně nadále odvíjet zkoumáním materiálových

kombinací PC tak, aby byla zajištěna nižší tvrdost a spolu s tím snadnější možnost odformování výrobku. I přes to se podařilo vytvořit alespoň jeden funkční prototyp skateboardového kolečka, který bude dále podroben srovnávacímu testování v kapitole 10. Pokud by se potvrdilo, že kolečka z PC mohou mít funkční charakter, nabízí se široká škála vývoje, která skýtá potenciál např. v disertační práci.

*Tabulka 12 Shrnutí základních parametrů vstřikování PC koleček.*

Vstřikovaný materiál	PC ET3127
Vstřikovací stroj	Mitsubishi 180MEtII
Násobnost formy	2
Čas cyklu	272 s
Teplota formy	80 °C
Teplota taveniny	300 °C
Rychlost vstřiku	50 mm/s
Vstřikovací tlak	50 MPa
Přidržovací tlak	30 MPa
Celkový počet zdvihů	3
Počet zdvihů se zajištěným výsledkem	1
Počet funkčních sad koleček	0

#### **Výsledky jsou tedy následující:**

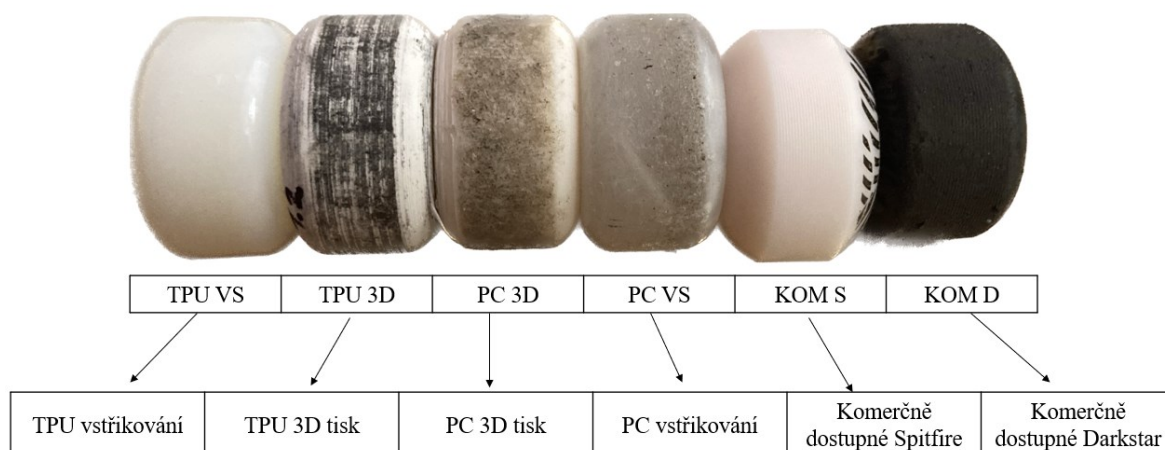
- I přes úskalí výroby se podařilo vyrobit funkční prototyp kolečka.
- Díky výše uvedenému tato práce disponuje vzorkem pro další testování.
- Pokud by měly výsledky testování kolečka funkční charakter, bylo by nutné upravit nástroj tak, aby bylo možno výrobek snadněji odformovat.

#### **Úvahy spojené s výrobou za pomoci technologie jsou následující:**

- Je zde potenciál v možnosti vyrobit kolečka s dvojitou tvrdostí – kolečka s jádrem. PC je tvrdší a lehčí materiál. Bylo by tedy možné těchto vlastností využít tak, že by jádro kolečka bylo vyrobeno z materiálu PC a následně obstříknuto TPU. Takovými kolečkům s jádrem z PC a vnějším materiálem TPU by bylo možné opakovaně vracet život. Po použití by mohlo být obrobena zbylá TPU až na jádro z PC a poté znova obstříknuto. Navíc by se z třísek z TPU dal opět vytvořit regenerulát.

## 10 TESTOVÁNÍ

S ohledem na kapitulu 3.5. bylo rozhodnuto, že vyrobené vzorky koleček budou podrobeny čtyřem druhům experimentálního měření. Konkrétně to jsou: koeficient tření, tvrdost, úbytek hmotnosti a topologie povrchu. Všechna měření byla pouze experimentálního a charakteru, a proto se neřídila žádnou oficiální normou. Téměř ve všech případech měření slouží jako srovnávací etalon komerčně dostupná kolečka. První komerčně dostupné kolečko od firmy Spitfire patří ke špičce na trhu a je o něm hovořeno v kapitole 2.4. Pořizovací cena sady těchto koleček se pohybuje okolo 1 000 Kč. Druhé komerčně dostupné kolečko od firmy Darkstar je výrazně méně kvalitní a jeho pořizovací cena je o polovinu nižší. Toto kolečko se prodává jako součást skateboardového kompletu a ten je určen spíše pro začátečníky. Kolečka byla vybrána na základě dostupnosti a co nejvyšší podobnosti ke kolečkům vyrobeným. Pro snadnější orientaci jsou všechna testovaná kolečka se svým popisem uvedena na obrázku 52.

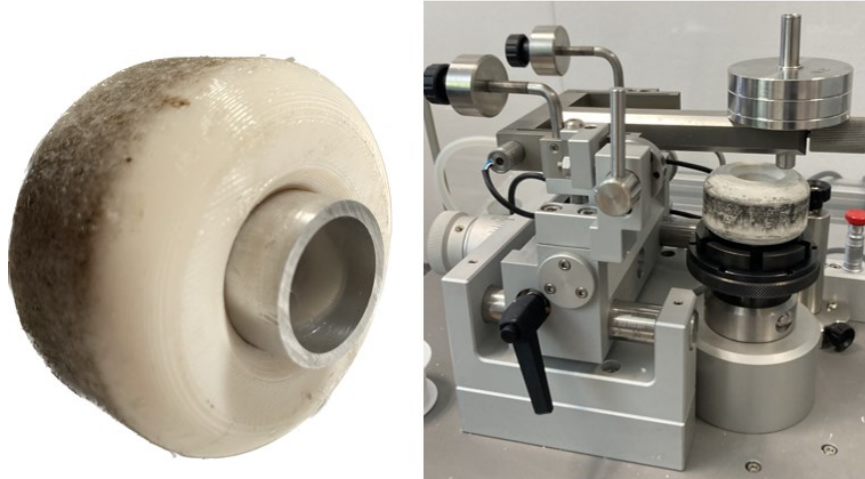


Obrázek 52 Všechna testovaná kolečka.

### 10.1 Koeficient tření

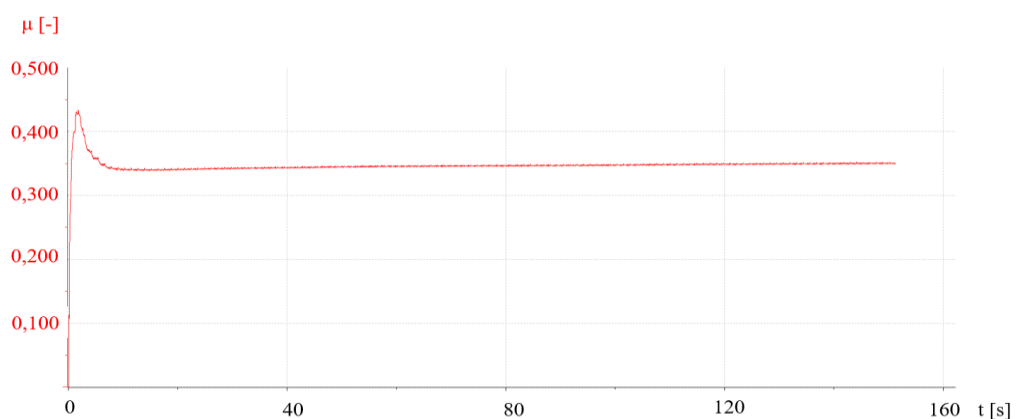
Cílem tohoto měření je, aby se hodnoty koeficientu tření co nejvíce blížily hodnotám KOM S a popř. KOM D. Koeficient tření se měřil opět na půdě univerzity, konkrétně v CEZIA – Tech (Center for Security, Information and Advanced Technologies). Měření probíhalo na rotačním tribometru Pin-On-Disk Tribometer (TRB). Tribometr byl vybaven kuličkou, která sloužila k vytvoření třecího kontaktu s kolečkem. Použitá kulička byla z oceli. Nastavená velikost zatěžovací síly se rovnala 5 N a lineární rychlost se rovnala 7 mm/s. Délka ramene tribometru byla 15,5 mm. Počet otáček, které musí tribometr vykonat, než se měření automaticky zastaví, byl nastaven na 100.

Měření mělo v rámci náročnosti projektu spíše experimentální charakter a probíhalo vždy na boční stěně kolečka, které bylo upnuto za pomoci přípravku v podobě duté tyče s vnějším průměrem odpovídajícím velkému průměru ložiska (viz obrázek 53).



*Obrázek 53 Vlevo – zobrazení přípravku zalisovaného v kolečku, vprav – zobrazení měření.*

Jelikož se měření pro všechny vzorky opakovalo, je níže pro úplnost uveden jako příklad typický průběh a výsledné hodnoty zkoušky pro kolečko KOM S (viz. obrázek 54). Ostatní grafy zobrazující průběh jednotlivých měření jsou obsahem příloh práce. Nárůst koeficientu tření na začátku měření a následný pokles na konstantní hodnotu je typicky způsoben prvním kontaktem kuličky s kolečkem. V rámci toho zde dochází ke zvýšenému tření, než se kulička s kolečkem navzájem přizpůsobí. Tento jev se nazývá adheze. Po přizpůsobení tření klesne na konstantní hodnotu. Dále jsou v tabulce 13 uvedeny souhrnné výsledky všech testovaných koleček.



*Obrázek 54 Graf znázorňující průběh měření koeficientu tření pro kolečko KOM S.*

Tabulka 13 Výsledky koeficientu tření pro všechny testovaná kolečka.

Kolečko	Koeficient tření [-]					
	KOM S	KOM D	TPU VS	TPU 3D	PC VS	PC 3D
Maximální hodnota	0,433	0,288	0,210	0,185	0,100	0,102
Průměrná hodnota	0,347	0,265	0,198	0,178	0,094	0,098
Směrodatná odchylka	0,014	0,018	0,012	0,006	0,004	0,003

Výsledky tohoto experimentálního měření ukázaly, že nejvyšší hodnotu koeficientu tření ( $0,347 \pm 0,014$ ) proti ocelové kuličce vykazuje kolečko KOM S. Toto kolečko je v rámci měření považováno za nejvyšší referenční standard. Oproti tomu kolečko KOM D se blíží spíše hodnotám u koleček TPU VS a TPU 3D. Rozdíl mezi nimi je zhruba  $0,06 \pm 0,1$  a díky tomu lze považovat kolečka z TPU za konkurence schopná. Co se koleček z PC týká, lze bezpečně konstatovat, že v rámci tohoto měření nejsou konkurence schopná.

## 10.2 Tvrdość

V práci bylo několikrát uvedeno, že tvrdost je klíčovou vlastností skateboardových koleček. Proto byly provedeny kontrolní měření. Měření probíhalo opět na CEBIA – Tech. Použitý nástroj pro měření byl ruční měřič tvrdosti PosiTector SHD, který pracuje na metodě statického zatížení na základě normy ASTM D2240. U každého vzorku bylo provedeno 10 měření – vždy na jiném místě kolečka. I přes fakt, že ve světě skateboardingu se kolečka měří v stupnici Shore A, kolečka z PC jsou výrazně tvrdší, a proto bylo pro měření využito stupnice Shore D. Výsledky jednotlivých tvrdostí koleček jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 Výsledky měření tvrdosti (ShD) pro všechny testovaná kolečka.

	ShD					
	KOM S	KOM D	TPU VS	TPU 3D	PC VS	PC 3D
1.	48	42	45	54	80	71
2.	48	36	45	54	81	70
3.	48	40	45	55	80	72
4.	47	38	45	55	80	71
5.	48	39	45	55	80	72
6.	48	38	45	54	80	70
7.	48	37	45	54	80	70
8.	47	32	46	55	81	71
9.	48	39	44	54	80	70
10.	48	39	46	54	80	71
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>47,8</b>	<b>38</b>	<b>45,1</b>	<b>54,4</b>	<b>80,2</b>	<b>70,8</b>
Směrodatná odchylka	0,4	2,7	0,6	0,5	0,4	0,8

Hodnoty koleček, které jsou měkčí jsou aproximovány do stupnice A dle zdroje 38 (obrázek 55). Výsledné hodnoty měkčích koleček v stupnici Shore A jsou tedy uvedeny v tabulce 15.

Shore stupnice	Extra měkké			Středně měkké			Středně tvrdé						Tvrdé			Extra tvrdé			
<b>Shore A</b> Guma, měkké plasty, polyuretan	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
<b>Shore B**</b> Kaučuk			6	12	17	22	27	32	37	42	47	51	56	62	66	71	76	81	85
<b>Shore C**</b> Gumy a plasty					9	12	14	17	20	24	28	32	37	42	47	52	59	70	77
<b>Shore D</b> Tvrdé gumy a plasty					6	7	8	10	12	14	16	19	22	25	29	33	39	46	58

Obrázek 55 Přibližná převodní tabulka pro stupně tvrdosti dle Shore. [38]

Tabulka 15 Aproximované hodnoty tvrdosti pro měkčí kolečka ShA.

ShA			
KOM S	KOM D	TPU VS	TPU 3D
97	90	95	98

Jelikož jsou výsledky měření pouze experimentálního charakteru, výsledné hodnoty jsou v textu diskutovány jako celá čísla bez hodnot směrodatných odchylek. Jak bylo očekáváno i toto měření ukazuje, že kolečka z PC nezapadají do standardů rozptylu tvrdosti skateboardových koleček (viz. kapitola 2.3.3). Maximální hodnota ve stupnici Shore B využívaná pro skateboarding je 84 ShB, což přibližně odpovídá hodnotě 58 ShD (viz. obrázek 55). Této mezní hodnotě tvrdosti se nejvíce přibližuje kolečko TPU 3D, jehož filament udává totožnou tvrdost jako byla změřena na prototypu kolečka. Nejvyšší tvrdost (38 ShD  $\cong$  90 ShA) odpovídá tvrdosti deklarované výrobcem a jedná se o kolečko KOM D. Tvrdost kolečka KOM S, také odpovídá garantovanému údaji od výrobce a ten je 97 ShA. Výsledná tvrdost koleček TPU VS (45 ShD  $\cong$  95 ShA) odpovídá garantované tvrdosti granulátu od výrobce. Lze tedy tvrdit, že všechny předpokládané tvrdosti odpovídají skutečnosti. S ohledem na kapitolu 2.3.3 – tvrdší kolečka jsou rychlejší, ale více kluzká, zato měkčí kolečka jsou pomalejší, ale mají větší přilnavosti:

- TPU VS jsou měkčí kolečka a jsou vhodnější spíše pro street skateboarding. Zároveň je dle výsledků v kapitole 10.1 potvrzeno, že mají lehce vyšší koeficient tření, než TPI 3D a tudíž mají vyšší přilnavost.
- TPU 3D jsou tvrdší kolečka a jsou vhodnější na hladké povrchy, jako jsou skateparky. Zároveň mají lehce nižší koeficient tření. Výroba koleček za pomoci 3D tisku není vhodnou technologií protože kolečka nejsou tak homogenní.



### 10.3 Úbytek hmotnosti

Experimentální úbytek hmotnosti se měřil za pomoci analytické váhy KERN PFB. S ohledem na fakt, že PC VS disponuje pouze jedním vzorkem, bylo v rámci tohoto testování rozhodnuto, že vzorky budou upnuty vždy jako pravé zadní kolečko ve směru jízdy skateboardisty. Zbývá tři kolečka byla vždy stejná, jednalo se o komerčně dostupná kolečka, která nejsou předmětem tohoto výzkumu. Jako první bylo vždy zváženo kolečko nové a poté následovalo jeho zvážení po 2 h používání. Po použití byly z koleček před měřením řádně odstraněny veškeré nečistoty. Zároveň byl při této dvouhodinové jízdě kladen důraz na uniformizaci přístupu tak, aby podmínky opotřebení byly vytvořeny, pokud možno co nejvíce identicky. Na základě toho prováděl tyto jízdy vždy pouze jeden jezdec. Výsledky úbytku hmotnosti jsou uvedeny níže v tabulce 16.

*Tabulka 16 Úbytek hmotnosti po 2 h používání všech vzorků.*

	Nové [g]	2 h ježděno [g]	Rozdíl [g]
KOM S	63,43	63,38	0,05
KOM DS	53,86	53,75	0,11
TPU VS	69,65	69,53	0,12
TPU 3D	73,21	73,02	0,19
PC VS	69,81	68,98	0,83
PC 3D	72,82	71,18	1,64

Z tabulky 16 lze vyčíst, že nejnižší úbytek hmotnosti nastal u kolečka KOM S, které je v tomto případě považováno opět za jakýsi nejvyšší referenční standard. Z výsledků je dále patrné, že úbytek hmotnosti kolečka TPU VS se téměř rovná úbytku hmotnosti kolečka KOM D. Lze tedy tvrdit, že vstříkovaný TPU si v rámci opotřebení vede srovnatelně dobře jako komerčně dostupná kolečka. Výsledek úbytku hmotnosti u TPU 3D je nepatrně vyšší a to kvůli zvolené výrobní technologii. Na kolečku PC VS docházelo během používání k tendenci štěpení materiálu z kolečka, a proto byl úbytek hmotnosti takto vyšší. U PC 3D měla situace podobný charakter, až na fakt, že ke štěpení materiálu docházelo ve větší míře kvůli nehomogenitě kolečka způsobené technologií výroby.

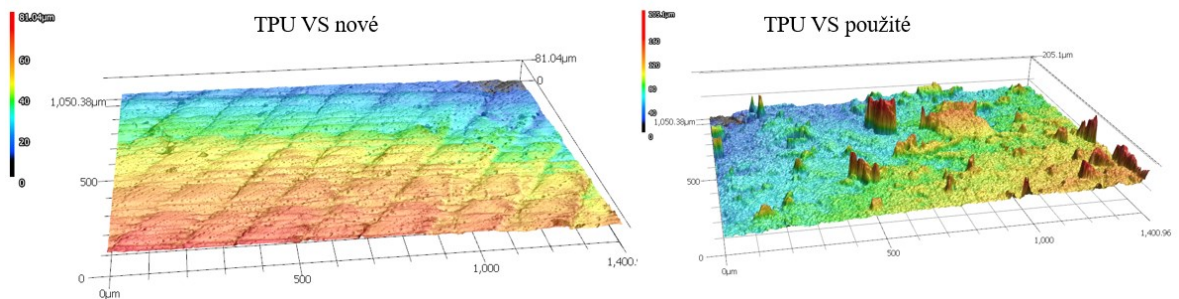


## 10.4 Topologie povrchu

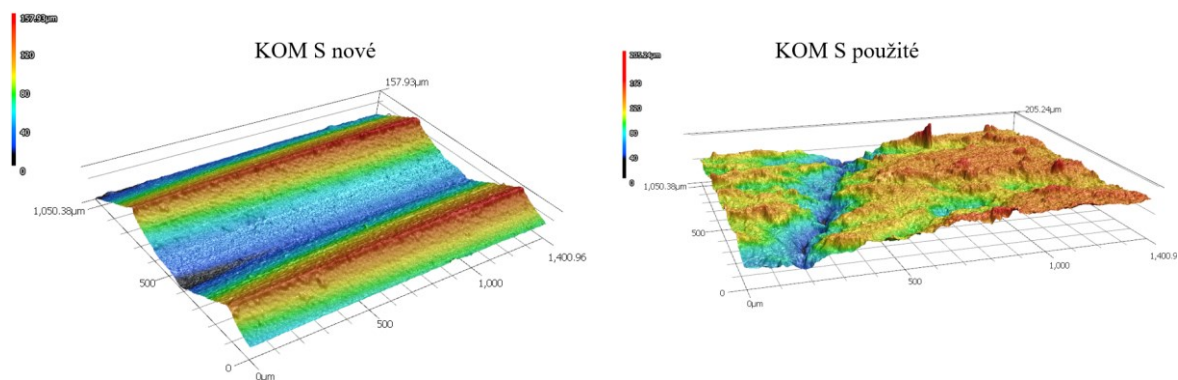
Toto měření se provádělo za cílem zkoumat rozdíl vybraných vzorků mezi topologií povrchu kolečka nového a kolečka použitého po 2 h ježdění. Pro nahlédnutí do kontextu problematiky byly vybrány následující vzorky: nové kolečko TPU VS, použité kolečko TPU VS, nové kolečko KOM S a použité kolečko KOM S. Měření probíhalo opět na CEBIA a měřilo se na stroji KEYENCE VK-X3000. Jedná se o mikroskop s 3D laserovým skenováním. V rámci toho experimentálního měření se měřila vždy kontaktní plocha (viz. obrázek 56). Plocha skenovaná strojem odpovídala zhruba 1,4 x 1 mm. Z použitých koleček byly v oblastech měření řádně odstraněny nečistoty.



*Obrázek 56 Znárodnění měření topologie povrchu kolečka.*



*Obrázek 57 Topologie povrchu nového a použitého kolečka TPU VS.*



Obrázek 58 Topologie povrchu nového a použitého kolečka KOM S.

V rámci topologie povrchu je zapotřebí si uvědomit, že hodnoty výškového profilu na použitých kolečkách nemohou mít po celé kontaktní ploše konstantní hodnotu, protože opotřebení koleček probíhá nahodile. Jinými slovy, nelze ovlivnit, kde na kolečku bude větší, či menší stopa po vrypu, například od kamínku. V rámci opotřebení tedy nejsou hodnoty lokálního výškového profilu (v případě měření použitých koleček) objektivní, protože se měřila pouze jedna plocha o rozměru 1,4 x 1 mm na celém kolečku. U nových koleček to však v rámci experimentálního měření smysl mít může. Kolečka jsou nepoužitá a jejich kontaktní plocha by tedy teoreticky měla vykazovat konstantní hodnotu výškového profilu po celé ploše kolečka. Z ilustrace 57 lze vyčíst, že maximální hodnota lokálního výškového profilu u nového TPU VS kolečka je zhruba 81 μm. Plocha kolečka je po celém obvodu hladká a je negativem dutiny formy. Kdežto u komerčně dostupných koleček se často po vytažení z formy soustruží finální tvar profilu a díky tomu jsou na kontaktní ploše kolečka KOM S drážky (viz. obrázek 58). Ilustrace znázorňující lokální výškový profil použitých koleček poukazuje na individualitu prohloubených míst. U kolečka TPU VS jsou tyto lokální extrémy spíše individuálnějšího charakteru, kdežto u KOM S jsou spíše více sjednoceny. Toto sjednocení narušuje prohlubeň znázorněná modrou barvou, která mohla být v kolečku způsobena právě drobným kamínkem (viz. obrázek 58 vpravo).

## 10.5 Subjektivní hodnocení uživatelů

V rámci cílů práce tato kapitola zohledňuje subjektivní hodnocení uživatelů. Toto hodnocení je přínosné ve smyslu získávání zpětné vazby od jedinců, kteří jsou v přímém kontaktu s produktem. Nejvíce funkčních vzorků skateboardových koleček se podařilo vyrobit z materiálu TPU za pomoci technologie vstřikování. Zároveň lze konstatovat, že kolečka

z PC se nejeví jako dostatečná pro skateboarding. Z toho důvodu bude toto hodnocení soustředěno pouze na kolečka TPU VS. Metodika hodnocení je následující:

- Hodnotit budou tři uživatelé, kteří mají dostatečné zkušenosti v oblasti této problematiky.
- Způsob hodnocení bude probíhat za pomoci vyplnění tabulky s osmi klíčovými vlastnostmi koleček. Systém hodnocení bude formou škálování od 1 (nejméně) po 10 (nejvíce). Hodnotit se budou kolečka TPU VS a pro srovnání kolečko komerčně dostupné dražší (KOM S) a kolečko komerčně dostupné levnější (KOM D). Na posledním řádku tabulky pak bude vždy uveden součet bodů pro všechny tři kolečka.
- Autoři hodnocení napíší stručný souhrn subjektivních dojmů z koleček TPU VS s ohledem na porovnání s kolečky komerčně dostupnými. V rámci hodnocení musí být zohledněn charakter této práce.

### **10.5.1 Hodnocení majitele skateshopu**

Jmenuji se Jan Rafaj a pohybuji se ve světě skateboardingu 30 let jako aktivní jezdec a přes dvacet let vlastním specializovaný obchod s tímto druhem zboží. Skateboardová kolečka jsou pro jízdu naprosto zásadní a na dnešním přesyceném trhu jich najdeme nepřehledné množství, jak ve velikosti, tvrdosti, dezénu i kvalitě. S velkým zájmem jsem proto sledoval Ondřejův experiment, který mne do jisté míry obohatil z odborně-technologického pohledu.

U levných skateboardů v supermarketech, které většinou pořizují rodiče dětem jako jejich první, je problém, že jsou kolečka často měkká a ztrácejí rychlost nebo naopak příliš tvrdá a ty pak kloužou. Přesně tyto problémy jsou patrné z výsledků, které jsou ve studii popisovány (bubliny uprostřed koleček nebo použití 3D tiskárny). Kvalitní výrobci si svou technologii pečlivě chrání a přesné složení je tak součástí výrobního tajemství. Vytvořit kolečka, která nebudou ztrácet jízdní vlastnosti budou vyhovovat náročným požadavkům moderního skateboardingu a zároveň budou konkurenceschopná, rozhodně není jednoduchý úkol.

Výsledná kolečka, které jsme měli na testování na první pohled předčily očekávání. Vzhledově není co vytknout. Kupodivu nebyly marné ani jízdní vlastnosti. Velký potenciál

však vidím v možnostech recyklace. Pokud vím, touto problematikou se zatím nikdo z výrobců nezabývá a vzhledem k cílové skupině uživatelů, kteří kladou velký důraz na ekologii, má tato přidaná hodnota značný marketingový potenciál. Otázkou samozřejmě zůstává cena, na kterou jsou zákazníci nejvíce orientováni.

Pokud by se přece jen nepodařilo docílit kvality jedněch z nejlepších skateboardových koleček na trhu, je zde rozhodně velký prostor využití recyklovaných koleček u jiných výrobců, které nejsou na přesnost jízdních vlastností tolik náročné (nákupní vozíky, cestovní zavazadla, kancelářské židle, aj.).

Recyklace skateboardových koleček pro jejich další využití si rozhodně zaslouží větší pozornost. Na Eco-friendly výrobky dnes nastupující generace slyší mnohem více, než jejich předchůdci a marketingové možnosti takového výrobku jsou z mého pohledu velice zajímavé téma.

*Tabulka 17 Bodové subjektivní hodnocení majitele skateshopu.*

<b>Specifické kritérium kolečka</b>	<b>TPU VS</b>	<b>KOM S</b>	<b>KOM D</b>
Rychlost koleček	5	10	6
Zrychlení koleček	6	10	5
Celkový komfort jízdy s ohledem na tvrdost koleček	6	10	5
Funkčnost při provádění tricků	4	9	4
Design koleček	5	9	7
Kvalita zpracování	5	9	6
Odolnost proti opotřebení	3	9	2
Ekologická šetrnost	8	5	5
	42	71	40

### **10.5.2 Hodnocení profesionálního skateboardisty**

Jmenuji se Pavel Vyroubal a skateboardingu se věnuji 25 let. Na profesionální scéně se jako jezdec pohybuji již 15 let a jako trenér 5 let. Testování probíhalo v různých skateboardových areálech (skateparky) na Moravě. Skateparky měly různé druhy povrchů (beton, asfalt, plech, dřevo). Testy probíhaly během jara, kdy ve skateparcích teploty dosahují asi 15 °C.

Nápad na výrobu skateboardových koleček (valivých profilů) mne od začátku velmi zaujal. Jako dlouholetý skateboardista jsem byl zvědav, jestli tímto způsobem výroby může být dosaženo podobné kvality, jako u komerčně vyráběných skateboardových koleček.

Z hlediska kvality zpracování, nebyly patrné velké rozdíly mezi kolečky z diplomové práce a komerčně dostupnými. Chyběl design, označení velikosti a tvrdosti. Tyto informace jsou na komerčních kolech jasně viditelné. Svou barvou připomínají levné varianty, které jsou běžně k dostání na trhu.

Co se vlastností koleček týká, rychlost a zrychlení je na úrovni, která dostačuje pro rekreačního jezdce. Kolečka neměla tak dobré vlastnosti, jako dražší varianty na trhu, avšak měla jednoznačně lepší vlastnosti, než u levných koleček pro děti a začátečníky. Kolečka nedosahovala tvrdosti, kterou mají profesionální jezdci. Je obtížné na nich dosáhnout vysoké rychlosti, kterou je třeba vyvinout pro složité závodní triky. Nicméně jejich funkčnost byla při nižších rychlostech výborná a bylo na nich možno provádět středně obtížné triky, které jsou typické pro zkušené rekreační jezdce.

Největší nevýhodou koleček byla jejich rychlá degradace. Opatření bylo znát již po pár trénincích. To bylo způsobeno velkou zátěží, která byla na kolečka při testu vystavena. Zajímavá myšlenka je ovšem možnost jejich recyklace, což by zrychlený cyklus opotřebení mohlo vyvážit. Bohužel si myslím, že v případě jakékoliv vratné „eko zálohy“ by budoucí výroba nebyla rentabilní, ale mohl by s tím dobře pracovat marketingový odborník a muselo by to být založeno na dobrovolnosti zákazníků, kteří chtějí šetřit naši planetu a podpořit ekologicky udržitelný výrobek.

Pokud shrnu celkové testování, tak kolečka, která byla vyrobena Bc. Ondřejem Vašků nedosahují kvalit profesionálních skateboardových koleček. Na druhou stranu bych se nebál je doporučit začátečníkům a středně pokročilým jezdčům. V tomto segmentu jasně dominují nad levnou variantou, jenž je na trhu běžně dostupná.

*Tabulka 18 Bodové subjektivní hodnocení profesionálního skateboardisty.*

<b>Specifické kritérium kolečka</b>	<b>TPU VS</b>	<b>KOM S</b>	<b>KOM D</b>
Rychlost koleček	7	10	5
Zrychlení koleček	6	9	4
Celkový komfort jízdy s ohledem na tvrdost koleček	7	10	5
Funkčnost při provádění tricků	8	10	3
Design koleček	2	8	7
Kvalita zpracování	8	10	4
Odolnost proti opotřebení	3	8	4
Ekologická šetrnost	10	5	5
	51	70	37

### 10.5.3 Hodnocení amatérského skateboardisty

Jmenuji se Vojtěch Vašků a skateboardingu se věnuji dvanáct let. Za tu dobu jsem vystřídal velké množství koleček různých výrobců, velikostí a tvrdostí. Kolečka jsem testoval ve vsetínském skateparku po dobu dvou hodin. Ze začátku mě překvapila svými jízdními vlastnostmi, které byly podobné jako u komerčních koleček nižších řad v cenovém rozptylu kolem sedmi set korun za balení a nenašel bych mezi nimi rozdíl. Po necelé hodině testování se začaly lehce opotřebovávat, objevily se odtržky materiálu z hran koleček a jízdní vlastnosti byly stále dobré. Ke konci testu se začaly objevovat rovné plochy a kolečko ztrácelo rovnoměrný tvar. Díky tomu byly jízdní vlastnosti horší a bylo čím dál těžší nabrat dostatečnou rychlost na překážky, úbytek materiálu byl znát. Celkově hodnotím kolečka kladně, svými vlastnostmi by byly dostačující alternativou pro nenáročného uživatele a začátečníky při nízké ceně. Příčinu ubývání materiálu z hran koleček a ztracení rovnoměrného tvaru, bych přisoudil hrubému asfaltovému povrchu ve skateparku a také náročností triků při testování. V porovnání s kolečkem značky Spitfire (KOM S), na kterých momentálně jezdím, vidím velké nedostatky. Testovaná kolečka bych musel vyměnit do dvou týdnů za nová, protože by už nesplňovala podmínky ke komfortní jízdě. U koleček Spitfire je to otázka jednoho roku.

*Tabulka 19 Bodové subjektivní hodnocení amatérského skateboardisty.*

<b>Specifické kritérium kolečka</b>	<b>TPU VS</b>	<b>KOM S</b>	<b>KOM D</b>
Rychlost koleček	5	9	6
Zrychlení koleček	6	10	5
Celkový komfort jízdy s ohledem na tvrdost koleček	5	10	5
Funkčnost při provádění tricků	7	9	5
Design koleček	7	9	7
Kvalita zpracování	5	9	6
Odolnost proti opotřebení	3	9	3
Ekologická šetrnost	10	5	5
	48	70	42

## 11 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V rámci tohoto experimentu byla úspěšně navrhnutá a otestována alternativní cesta produkce skateboardových koleček. Tato cesta produkce má ve srovnání s komerční produkcí své klady i zápory, které jsou diskutovány níže. Experiment se opírá o poznatky z předchozího výzkumu a poznatky z teoretické části práce. Díky tomu je zvolenou technologií pro produkci finálních výrobků vstřikování. Jelikož touto technologií nelze zpracovávat materiál komerčně dostupných koleček, jsou navrženy dva materiály – TPU a PC. Než se začal navrhovat nástroj, byly vyrobeny první prototypy koleček z těchto materiálů za pomoci 3D tisku. Díky těmto prototypům se potvrdil potenciál výroby koleček za pomoci vstřikování a zároveň se rozrostla skupina vzorků pro testování. V programu Moldex 3D byla vytvořena simulace vstřikování a poté byl navržen a vyroben nástroj – dvojnásobná prototypová vstřikovací forma se studeným vtokovým systémem.

Jelikož byla očekávána větší jistota výsledku u materiálu TPU, vstřikoval se jako první. Po optimalizaci typických komplikací, které provázejí vstřikování profilů s tlustou stěnou se podařilo vyrobit 7 totožných funkčních sad skateboardových koleček z TPU.

U vstřikování PC k takovému úspěchu nedošlo. Kolečka nebylo téměř možné odformovat, a tak se ohledem na časovou dotaci a náročnost projektu podařilo vyrobit alespoň jeden vzorek kolečka. V kapitole 9.5.1 jsou diskutovány cesty, kterými by se tento materiál v rámci výroby skateboardových koleček mohl dále odvíjet.

Výsledné vzorky koleček byly podrobeny následujícím testům: koeficient tření, tvrdosti, úbytek hmotnosti a topologie povrchu. Na základě výsledků těchto měření bylo rozhodnuto, že subjektivnímu zhodnocení uživatelů budou podrobena pouze kolečka TPU VS. Byla tedy stanovena metodika subjektivního hodnocení se společným aspektem – tabulkou pro posouzení specifických kritérií skateboardových koleček. Níže jsou uvedeny souhrnné výsledky pro kolečka TPU VS, KOM S a KOM D.

*Tabulka 20 Souhrnné výsledky.*

	<b>KOM S</b>	<b>KOM D</b>	<b>TPU VS</b>	<b>TPU 3D</b>	<b>PC VS</b>	<b>PC 3D</b>
Koeficient tření [-]	0,347	0,265	0,198	0,178	0,098	0,094
Úbytek hmotnosti [g]	0,05	0,11	0,12	0,19	0,83	1,64
Tvrdość kolečka ShD	47,8	38	45,1	54,4	80,2	70,8
Tvrdość kolečka ShA	97	90	95	98	-	-
Průměr hodnocení uživ. (max 80 b)	70	40	47	-	-	-

Z důvodu nízkého počtu vyrobených vzorků a z výsledků v tabulce 17 vyplývá, že kolečka vyrobená v rámci toho experimentu z PC bohužel nejsou konkurence schopné oproti kolečkům komerčně dostupným. S ohledem na zdroje 14 a 21 se v rámci tohoto materiálu nabízí potenciál dalšího výzkumu. Z PC by bylo možné vyrábět například kolečka s jádry a po skončení životnosti jejich jádra mohla opakovaně obštrikovat. Nabízejí se také možnosti kombinace různých materiálů s PC tak, aby byla zaručena funkčnost procesu a výrobku.

Skateboardová kolečka z TPU vyrobená během tohoto experimentu se vůči komerčně dostupným kolečkům jeví jako konkurence schopná. V rámci získání co nejobektivnějšího výsledku jsou kolečka porovnávána s levnějšími (KOM D) a s dražšími (KOM S) komerčně dostupnými variantami koleček. Je zapotřebí konstatovat, že kolečka TPU VS se svými výsledky testování podobají spíše kolečkům KOM D. Dle subjektivního hodnocení uživatelů jsou kolečka TPU vhodná jako možná alternativa pro začátečníky a z bodového vyhodnocení vyplývá, že kolečka TPU VS jsou o sedm bodů lepší než kolečka KOM DS. Respondenti ocenili především potenciální možnost recyklace a odlišnost výrobního procesu.

Na základě předešlého výzkumu, kdy se uvažovalo o dvojnásobné formě s SVS určenou pro sériovou výrobu (80 000 ks), byla vypočtena výrobní cena za jedno kolečko 45 Kč. Dle kvalifikovaného odhadu od firmy ZP se sídlem na Přílukách ve Zlíně je cena jednoho kolečka TPU VS (při výrobní sérii 2 000 ks) 35 Kč. Cena je výrazně nižší, především z důvodu, že forma je jako prototypová koncipována velmi jednoduše a tudíž je i výrazně levnější.

Výroba koleček TPU VS se může jevit v rámci počtu využitých technologií jako úspornější. Obě kolečka KOM se při svém výrobním procesu dle kapitoly 5.1.1 vytvrzují v pecích po dobu 40 min. Poté musí být upraven jejich tvar na soustruhu a v poslední řadě, před samotným balením, je natisknut design. Pokud by se do dutiny formy vygravíroval popis kolečka (velikost + tvrdost), nemusela by už teoreticky kolečka procházet další úpravou, a tím pádem by se kolečka nemusela soustružit ani potiskovat designem. Lze však konstatovat, že v rámci energetické náročnosti je úspornější udržovat v provozu pec, než celý vstřikovací stroj.

Největší potenciál se však jeví v možnosti regranulace. V případě, že by se kolečka přece jen po vyjmutí z formy soustružila, vzniklý odpad (a odpad z vtoků) by mohl být znovu využit. Jak už bylo uvedeno nejednou, týká se to i použitých koleček. Tato problematika v sobě skýtá široký potenciál dalšího výzkumu.



## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vyrobit funkční vzorky valivého profilu – skateboardového kolečka a následně testovat jeho klíčové vlastnosti. S ohledem na předešlý výzkum autora bylo zvolenou výrobní technologií vstřikování. Na základě teoretické části práce byly vybrány dva materiály TPU a PC, které nabízejí ekologicky šetrnější přístup v rámci možnosti recyklace.

Jako první byly vytvořeny prototypy koleček za pomoci 3D tisku tak, aby byla ověřena funkčnost návrhu a materiálů. Výsledky se setkaly s kladnou odezvou, až na fakt, že se kolečka nejevila tak homogenní, v důsledku čehož se více zahřívala a klouzala. V rámci toho se přistoupilo k pokračování v plánovaném procesu výroby. Jelikož je vstřikování profilů s tlustou stěnou problematické, byla před výrobou formy vyhotovena analýza vstřikování. Diskutovaly se především výsledky podstatné pro takto ojedinělý typ vstřikování jako jsou: teplota studeného spoje, smrštění výrobku, tloušťka stěny a potřebná doba pro vyhození výrobku. Následně byla navržena prototypová dvojnásobná vstřikovací forma se studeným vtokovým systémem. Při návrhu formy bylo zapotřebí zohlednit smrštění, odformovací úkosy a především postup manuálního odformování. To je založeno na principu vyměnitelných pinů, které určují vnitřní rozměry kolečka. Forma byla vyrobena na půdě univerzity za pomoci kombinace CAM a dílenského programování. Samotné vstřikování probíhalo v Centru Polymerních Systémů ve Zlíně a z důvodu vyššího potenciálu zajištění vzorků byl prvním vstřikovaným materiálem TPU. V rámci optimalizace procesu bylo provedeno sedmáct zdvihů, při kterých byly řešeny komplikace jako – Dieselův efekt, výrazný studený spoj a vzduchové kapsy uvnitř výrobku. Po optimalizaci procesu se zajistila jeho stálost díky teplotě formy a bylo vyrobeno sedm stejných sad koleček z TPU (TPU VS). S ohledem na experimentální charakter procesu vstřikování

PC, bylo cílem ověřit především funkčnost prototypové formy s takto odlišným typem materiálu. Jako problematické se ukázalo odformování výrobků. Při třetím zdvihu působil výsledek z vizuálního hlediska alespoň v jedné dutině uspokojivě a z důvodů časové náročnosti experimentu a zajištění výsledku bylo rozhodnuto vyjmout formu ze vstřikovacího stroje, kolečko bezpečně odformovat a ve vstřikování dále nepokračovat.

Po výrobě vzorků skateboardových koleček se přistoupilo k jejich testování. Měřily se klíčové parametry jako koeficient tření, úbytek hmotnosti nebo tvrdost. Jako porovnávací etalony sloužily komerčně dostupná kolečka z obou konců cenového rozptylu.

Výsledky koleček z PC se natolik lišily od porovnávacích etalonů, až byly vyhodnoceny jako konkurence neschopné. Naopak výsledky koleček z TPU se jeví uspokojivě, a tak se s těmito vzorky přistoupilo ke subjektivnímu hodnocení uživatelů. Byla stanovena metodika hodnocení a souhrnné výsledky ukázaly, že kolečka TPU VS se přibližují kolečkům komerčně dostupným ze spodního konce cenového rozptylu.

Konkrétní závěry jsou tedy následující:

- Byla vypracována literární rešerše na dané téma.
- Po všech předprodukčních procesech byl navržen a vyroben nástroj.
- Bylo vyrobeno dostatečné množství funkčních vozků k testování.
- Vzorky byly úspěšně testovány a kolečka TPU VS se jeví jako konkurence schopná alternativa především pro nižší cenovou třídu koleček.
- Celý proces výroby by bylo možné zautomatizovat a docílit tak úsporu finančních, časových a lidských zdrojů.
- V předešlém výzkumu autora byla kalkulována výrobní cena sady koleček (z automatizované vstřikovací formy při plánovaném objemu výroby 80 000 ks) na 180 Kč. Sada nejlevnějších koleček na trhu se pohybuje okolo 500 Kč. Dle kvalifikovaného odhadu od společnosti ZP ze Zlína je cena za jedno kolečko TPU VS z dvojnásobné prototypové vstřikovací formy (při výrobním objemu 2 000 ks) 35 Kč. To odpovídá výrobní ceně za sadu koleček (TPU VS) 140 Kč.
- I když předmětem této práce není navrhnout ekologicky šetrnější variantu procesu výroby a finálního produktu, lze konstatovat, že tato práce otevřela dveře pro tuto cestu. Vzhledem k dnešním recyklačním trendům má v sobě tato problematika široký potenciál dalšího výzkumu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Skateboarding. In: *britannica.com* [online] 2023. [cit. 03-30-2023] Dostupné z: <https://www.britannica.com/sports/skateboarding>
- [2] How Many Skateboarders are There in the World? In: *SurferToday* [online]. 2021. [cit. 01-19-2022]. Dostupné z: <https://www.surfertoday.com/skateboarding/how-many-skateboarders-are-there-in-the-world>
- [3] Co aktuálně dělají kluci z Robotix? In: *skaterock.cz* [online] 2021. [cit.03-30-2023] Dostupné z: <https://skaterock.cz/clanky/galerie/video/co-aktualne-delaji-kluci-z-robotix>
- [4] KANE, S. *Skateboard: průvodce základními technikami skateboardingu: jak se zdokonalit v jízdě na skateboardu*. Praha: Ottovo nakladatelství, 1998. ISBN 80-718-1212-9.
- [5] MARCUS, B. *The Skateboard: The Good, the Rad, and the Gnarly: An Illustrated History*. Ilustrované vydání. Minneapolis: MVP Books, 2011. ISBN 9780760338056.
- [6] Czech skateboarding [online]. 2020. [cit. 10-20-2022]. Dostupné z: <https://www.czechskateboarding.cz/skateboarding/historie-skateboardingu>.
- [7] Skatedelux [online]. [cit. 10-26-2022]. Dostupné z: <https://www.skatedeluxe.com/en>.
- [8] Skateboarding In 1970s California During The Golden Age of Shate Culture. In: *boredpanda.com* [online]. 2016. [cit. 03-30-2023]. Dostupné z: [https://www.boredpanda.com/1970-skateboarding-culture-skater-california-locals-only-hugh-holland/?utm\\_source=google&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=organic](https://www.boredpanda.com/1970-skateboarding-culture-skater-california-locals-only-hugh-holland/?utm_source=google&utm_medium=organic&utm_campaign=organic)
- [9] PILEGGI, S. (1975): *Wheeling and Dealing*. Sports Illustrated Magazine. Volume 43, Issue 9.
- [10] Skate Design Wheel. In: *exploratorium.com* [online]. [cit. 10-26-2022]. Dostupné z: <https://www.exploratorium.edu/skateboarding/skatedesignwheel.html>.
- [11] Skateboard Wheels Guide. In: *skatepro.com* [online]. [cit. 04-10-2023]. Dostupné z: <https://www.skatepro.com/en-us/a536.htm>
- [12] How to Choose the Right Skateboard wheel. In: *warehouseskateboards.com* [online]. [cit. 04-10-2023]. Dostupné z: <https://www.warehouseskateboards.com/help/Skateboard-Wheels-Buying-Guide>

- [13] THOMAS, B. & MARTINEZ, S. & HADFIELD, M. (2012): *Potential application of recycled plastic materials as a replacement for polyurethane wheels*. 99-111. DOI:10.2495/TD120091.
- [14] CHANDA, Manas. *Plastics technology handbook*. Fifth edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, xxx, 1012 s. Plastics engineering series. ISBN 9781498786218.
- [15] DATTA, J., WŁOCH, M. *Recycling of Polyurethanes*. Blends and Interpenetrating Polymer Networks, 2017. 323-358. ISBN 9780128040393
- [16] KADHIM, L. F. (2017): *Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Chromium Trioxide under Ultraviolet Rays*. International Journal of Applied engineering Research. Volume 12, Issue 10, 2517–2526.
- [17] BĚHÁLEK, L. *Polymery* [online]. Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 02-20-2023]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>.
- [18] MASSEY, K. L. *The effects of UV light and weather on plastics and elastomers*. 2nd edition. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2007. ISBN 9780815519256.
- [19] HARE, J. Trade secrets...Skateboarding [online]. Royal Society of Chemistry. [cit. 10-12-2022]. Dostupné z: <https://edu.rsc.org/feature/trade-secrets-skateboarding/3007413.article>.
- [20] TZANAKIS, I., HADFIELD, M., THOMAS, B., NOYA, S.M. , HENSHAW, I., AUSTEN, S. (2012): *Future perspectives on sustainable tribology, Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 16, Issue 6, 4126-4140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.064>.
- [21] THOMAS, B. & MARTINEZ, S. & HADFIELD, M.. (2012): *Potential application of recycled plastic materials as a replacement for polyurethane wheels*. 99-111. DOI:10.2495/TD120091.
- [22] LIANG, Ch., GRACIDA-ALVAREZ, U., GALLANT, U. R., GALLANT, E. T., GILLIS, P. A., MARQUES, Y. A., ABRAMO, G. P., HAWKINS, T. R., DUNN, J. B. (2021): *Material Flows of Polyurethane in the United States*. ACS Publications. Volume 55, 14215–14224. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03654>.
- [23] The science of longboard wheels. In: *surfertoday.com* [online]. 2022 [cit.03-20-2023]. Dostupné z: <https://www.surfertoday.com/skateboarding/the-science-of-longboard-wheels>

- [24] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 03-20-2023]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Impresum.html>
- [25] LENFELD, Petr. *Technologie II. - Technologie zpracování plastů* [online]. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní. [cit.03-20-2023]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/uvod.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm).
- [26] Sciencechannel.com. *Sciencechannel.com*. [online]. Copyright © 2021 [cit.03-20-2023]. Dostupné z: <http://www.sciencechannel.com/tv-shows/how-its-made/videos/roller-skate-assembly>.
- [27] HYOJEONG, L., RAN-I, E. YEJIN, L. (2019): *Evaluation of the Mechanical Properties of Porous Thermoplastic Polyurethane Obtained by 3D Printing for Protective Gear*. *Advances in Materials Sciences and Engineering*. Volume 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/5838361>
- [28] Ministerstvo průmyslu a obchodu [online] [cit. 01-30-2023] Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/energeticka-ucinnost/strategicke-dokumenty/kombinovana-vyroba-elektřiny-a-tepla-v-ceske-republice--10372/>
- [29] DROBNY, Jiri George. *Handbook of Thermoplastic Elastomers*. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, 2014. *Plastics Design Library*. ISBN 9780323221689.
- [30] Prototype Injection molding. In: *injection-molded-plastics.net* [online]. [cit. 04-12-2023]. Dostupné z: <https://www.injection-molded-plastics.net/prototype-injection-molding/>
- [31] Plastic Injection Molding: Process, Prototypes, Advantages and Cost. In: *xometry.com* [online]. 2022. [cit.04-12-2023] Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/injection-molding/plastic-injection-molding/>
- [32] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 9788070807880.
- [33] HUANG, M., CHEN, J., XIAO, Y. (2022): *Quality Monitoring of Micro-shrinkage Defects in Thick-walled Injection Molded Components*. *Injection Molded Components, Measurement*, Volume 201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111733>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224122009381>

- [34] KAMAL, Musa R., Avraam I. ISAYEV a Shih-Jung LIU, ed. *Injection molding: technology and fundamentals*. Munich: Hanser, c2009, xxviii, 926 s. Progress in polymer processing. ISBN 9781569904343.
- [35] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 04-20-2023]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
- [36] Ellastolan. In: *campusplastics.com* [online]. [cit.04-30-2023] Dostupné z: <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Elastollan%C2%AE+C+95+A/BASF+Polyurethanes+GmbH/59/5750d793>
- [37] Covestro Makrolon, Polycarbonate. In: *lookpolymers.com* [online]. [cit.04-30-2023] Dostupné z: [http://www.lookpolymers.com/polymer\\_Covestro-Makrolon-ET3127-Polycarbonate.php](http://www.lookpolymers.com/polymer_Covestro-Makrolon-ET3127-Polycarbonate.php)
- [38] Měření tvrdosti. In: *merenitvrdosti.cz* [online]. 2017. [cit.04-30-2023] Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/piblina-pevodni-tabulka-pro-durometry-shore.html>
- [39] Tool steel. In: *toolsteel.cz* [online]. 2019. [cit.05-05-2023] Dostupné z: <HTTP://TOOLSTEEL.CZ/1-2343-X37CRMO5-1-X38CRMV5-1-19552/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	Jednotka teploty – stupeň Celsia
μm	Jednotka délky – mikrometr
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CEBIA	Center for Security, Information and Advanced Technologies
cm <sup>3</sup>	Jednotka objemu – centimetr krychlový
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
CPS	Centrum polymerních systémů
g/cm <sup>3</sup>	Jednotka objemu – gram na centimetr krychlový
HDPE	Vysokohustotní polyethylen
HVS	Horký vtokový systém
Hz	Jednotka frekvence – Hertz
Kč	Jednotka měny – koruna česká
kg	Jednotka hmotnosti – kilogram
kg/cm <sup>2</sup>	Jednotka objemu – kilogram na centimetr krychlový
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Jednotka objemu – kilogram na metr krychlový
kg/mol <sup>-1</sup>	Jednotka molární hmotnosti – kilogramech na mol
KOM D	Komerčně dostupné kolečko od firmy Darkstar
KOM S	Komerčně dostupné kolečko od firmy Spitfire
L	Délka
m	Hmotnost
m/s	Jednotka rychlosti – metr za sekundu
M5	Označení metrického závitu o průměru 5 mm
M6	Označení metrického závitu o průměru 6 mm
mg	Jednotka hmotnosti – miligram
min	Jednotka času – minuta
MJ	Jednotka energie – megajoul
mm	Jednotka délky – milimetr
mm/s	Jednotka rychlosti – milimetr za sekundu
MPa	Jednotka tlaku – Megapascal
N	Jednotka síly – Newton
PA	Polyamid

PC	Polykarbonát
PC 3D	Kolečko vyrobené za pomoci 3D tisku z polykarbonátu
PC VS	Kolečko vyrobené za pomoci vstřikování z polykarbonátu
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethakrylát
PO	Pohyblivá strana formy
PP	Polypropylen
PS	Polyester
PU	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
pVT	Tlak, objem a teplota
s	Jednotka času – sekunda
SAN	Styren-akrylonitrilový kopolymer
ShA	Stupnice Shore řady A
ShB	Stupnice Shore řady B
ShD	Stupnice Shore řady D
SVS	Studený vtokový systém
t	Čas
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$T_m$	Teplota tání
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretan
TPU 3D	Kolečko vyrobené za pomoci 3D tisku z termoplastického polyuretanu
TPU VS	Kolečko vyrobené za pomoci vstřikování z termoplastického polyuretanu
W	Objem opotřebení



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Ukázka skateboardingu – Mistr ČR ve skateboardingu z roku 2009 – Adam Lukas [3]</i> .....	14
<i>Obrázek 2 Skateboarding v 70. letech v Kalifornii [8]</i> .....	15
<i>Obrázek 3 Podomácky vyrobené skateboardové kolečko za dob socialismu v Československu. [zdroj – vlastní]</i> .....	16
<i>Obrázek 4 Rozdělení skateboardových koleček dle velikosti průměru [12]</i> .....	17
<i>Obrázek 5 Rozdělení skateboardových koleček dle šířky [7]</i> .....	18
<i>Obrázek 6 Rozdělení skateboardových koleček dle tvrdosti [12]</i> .....	19
<i>Obrázek 7 Rozdělení skateboardových koleček dle jader [7]</i> .....	20
<i>Obrázek 8 Dva zástupci skateboardových koleček z řady Formula Four Spitfire [7]</i> .....	20
<i>Obrázek 9 Vlevo – typické výrobky z termoplastů. Napravo typické výrobky z TPE [17]</i> ..	28
<i>Obrázek 10 Průměrné hodnoty koeficientu tření – 5 a 20 Hz [13]</i> .....	30
<i>Obrázek 11 Hodnocení stopy CO<sub>2</sub> pro různé recyklovatelné polymery [20]</i> .....	32
<i>Obrázek 12 Hodnocení spotřeby energie pro různé recyklovatelné polymerní materiály [20]</i> .....	34
<i>Obrázek 13 Schematické znázornění TPU složené z diizokyanátu, diolu s dlouhým řetězcem a prodlužovače řetězce. [29]</i> .....	37
<i>Obrázek 14 TPU překlenující mezeru mezi elastomery a plasty [29]</i> .....	37
<i>Obrázek 15 Křivky napětí-deformace tří TPU s různými hodnotami tvrdosti. [29]</i> .....	38
<i>Obrázek 16 Příčný řez typickým šnekovým vstřikovacím strojem, znázorňující šnek (a) v zasunuté poloze a (b) v přední poloze. [14]</i> .....	43
<i>Obrázek 17 Navržený model valivého profilu s ložiskem. ....</i>	49
<i>Obrázek 18 Vizualizace tisku kolečka z TPU s vybranými informacemi o tisku. ....</i>	50
<i>Obrázek 19 Vlevo – upnutá prototypová kolečka na skateboardu, vpravo – detail kolečka. ....</i>	51
<i>Obrázek 20 Vizualizace tisku kolečka z PC s vybranými informacemi o tisku. ....</i>	52
<i>Obrázek 21 Vlevo – upnutá prototypová kolečka na skateboardu, vpravo – detail kolečka. ....</i>	53
<i>Obrázek 22 Rozvržení dutin vtoku a temperančních kanálů ve formě. ....</i>	54
<i>Obrázek 23 Výsledek analýzy zobrazující tloušťku stěny profilu. ....</i>	55
<i>Obrázek 24 Výsledek analýzy zobrazující celkové smrštění profilu. ....</i>	56
<i>Obrázek 25 Výsledek analýzy zobrazující průběh plnicího tlaku se začátkem plnění dutiny. ....</i>	57
<i>Obrázek 26 Výsledek analýzy zobrazující průběh plnicího tlaku s kompletně zaplněnou dutinou. ....</i>	57
<i>Obrázek 27 Výsledek analýzy zobrazující čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty. .</i>	58

<i>Obrázek 28 Výsledek analýzy zobrazující studené spoje a jejich teplotu.</i>	59
<i>Obrázek 29 Výsledek analýzy zobrazující rozložení Von Misesova napětí v řezu.</i>	59
<i>Obrázek 30 Sestava nástroje – vstříkovací formy a pohled do jejího řezu.</i>	60
<i>Obrázek 31 PE bez osazených komponent.</i>	61
<i>Obrázek 32 Vlevo – PE osazená komponenty, vpravo – řez zobrazující temperační kanály.</i>	61
<i>Obrázek 33 Pin PE.</i>	62
<i>Obrázek 34 PO bez osazených komponent.</i>	63
<i>Obrázek 35 Vlevo – PO osazená komponenty, vpravo – řez zobrazující temperační kanály.</i>	63
<i>Obrázek 36 Pin PO.</i>	64
<i>Obrázek 37 Normalizované komponenty sestavy formy.</i>	64
<i>Obrázek 38 Obrobené desky PO a PE s piny.</i>	65
<i>Obrázek 39 Forma upnutá ve stroji.</i>	66
<i>Obrázek 40 Teploty plastikační jednotky pro vstříkování TPU.</i>	67
<i>Obrázek 41 Výsledek 1. – 2. zdvihu.</i>	67
<i>Obrázek 42 Výsledek 3. – 5. zdvihu.</i>	68
<i>Obrázek 43 Výsledek 3. – 5. zdvihu.</i>	68
<i>Obrázek 44 Výsledek 10. zdvihu – znázornění postupu vyjmutí ze PO formy.</i>	68
<i>Obrázek 45 Výsledek 11. – 15. zdvihu – vzduchové kapsy uvnitř kolečka.</i>	69
<i>Obrázek 46 Výsledek 16. – 17. zdvihu.</i>	69
<i>Obrázek 47 Forma s vyvrtanými temperačními kanály a příslušenstvím.</i>	70
<i>Obrázek 48 Finální podoba koleček po odladění procesu s uloženým ložiskem.</i>	70
<i>Obrázek 49 Kolečka z TPU upnuté na skateboardu.</i>	71
<i>Obrázek 50 Teploty plastikační jednotky pro vstříkování PC.</i>	73
<i>Obrázek 51 Kolečko z PC bezprostředně po odformování.</i>	74
<i>Obrázek 52 Všechna testovaná kolečka.</i>	76
<i>Obrázek 53 Vlevo – zobrazení přípravku zalisovaného v kolečku, vpravo – zobrazení měření.</i>	77
<i>Obrázek 54 Graf znázorňující průběh měření koeficientu tření pro kolečko KOM S.</i>	77
<i>Obrázek 55 Přibližná převodní tabulka pro stupně tvrdosti dle Shore. [38]</i>	79
<i>Obrázek 56 Znázornění měření topologie povrchu kolečka.</i>	81
<i>Obrázek 57 Topologie povrchu nového a použitého kolečka TPU VS.</i>	81
<i>Obrázek 58 Topologie povrchu nového a použitého kolečka KOM S.</i>	82

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Dělení skateboardových koleček dle tvrdosti [12]</i> .....	19
<i>Tabulka 2 Vybrané vlastnosti materiálů [13]</i> .....	29
<i>Tabulka 3 Vybrané vlastnosti materiálu zvoleného na základě předešlého výzkumu [27]</i> .	29
<i>Tabulka 4 Výsledky koeficientu opotřebení [13]</i> .....	31
<i>Tabulka 5 Náklady na různé plasty za rok 2011. Roční náklady a úspory. [20]</i> .....	34
<i>Tabulka 6 Odolnost různých polymerů proti oděru [29]</i> .....	39
<i>Tabulka 7 Základní parametry skateboardového kolečka.</i> .....	49
<i>Tabulka 8 Technický list nastavených parametrů pro analýzu.</i> .....	55
<i>Tabulka 9 Zoptimalizované parametry vstřikování TPU.</i> .....	69
<i>Tabulka 10 Shrnutí základních parametrů vstřikování koleček z TPU.</i> .....	71
<i>Tabulka 11 Nastavené parametry pro vstřikování PC.</i> .....	73
<i>Tabulka 12 Shrnutí základních parametrů vstřikování PC koleček.</i> .....	75
<i>Tabulka 13 Výsledky koeficientu tření pro všechny testovaná kolečka.</i> .....	78
<i>Tabulka 14 Výsledky měření tvrdosti (ShD) pro všechny testovaná kolečka.</i> .....	78
<i>Tabulka 15 Aproximované hodnoty tvrdosti pro měkká kolečka ShA.</i> .....	79
<i>Tabulka 16 Úbytek hmotnosti po 2 h používání všech vzorků.</i> .....	80
<i>Tabulka 17 Bodové subjektivní hodnocení majitele skateshopu.</i> .....	84
<i>Tabulka 18 Bodové subjektivní hodnocení profesionálního skateboardisty.</i> .....	85
<i>Tabulka 19 Bodové subjektivní hodnocení amatérského skateboardisty.</i> .....	86
<i>Tabulka 20 Souhrnné výsledky.</i> .....	87

## SEZNAM PŘÍLOH

Diplomová práce obsahuje několik důležitých příloh, dle kterých byl vyroben nástroj – prototypová vstřikovací forma a výrobek – skateboardové kolečko. Přílohy jsou součástí elektronického balíčku v systému STAG v rámci odevzdání této diplomové práce.

Příloha P I: Materiálový list termoplastického polyuretanu

Příloha P II: Materiálový list polykarbonátu

Příloha P III: Kořenová data měření koeficientu tření všech vzorků

Příloha P IV: Výkresová dokumentace

- Výrobní výkresy skateboardového kolečka (číslo výkresu D\_10)
- Výrobní výkres pevné strany formy (číslo výkresu D\_1000)
- Výrobní výkres pinu pevné strany formy (číslo výkresu D\_100)
- Výrobní výkres pohyblivé strany formy (číslo výkresu D\_2000)
- Výrobní výkres pinu pohyblivé strany formy (číslo výkresu D\_200)
- Výkres sestavy vstřikovací formy (číslo výkresu D\_1)

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST TERMOPLASTICKÉHO POLYURETANU

## CAMPUS® Datasheet

Elastollan® C 95 A - TPU  
BASF Polyurethanes GmbH



### Product Texts

#### DESCRIPTION

Elastollan C 95 A is a polyester based TPU

#### SPECIAL PROPERTIES

high tensile strength, excellent tear strength,  
very good damping behavior, good rebound elasticity,  
very good wear performance, good flexibility at low temperature  
and resistance to hydrolysis

#### TYPICAL APPLICATIONS

technical parts, hoses, profiles, screen elements

#### OTHER HINTS

predrying: 2-3h at 100-110°C (air circulating oven)  
or 90-100°C (dehumidified air dryer),  
max. content of humidity before processing: 0,02%  
annealing: 20 h at 100°C in order to get optimum properties

#### CHEMICAL RESISTANCE

For detailed information on the chemical resistance of our  
materials refer to this [list of chemical resistance](#)

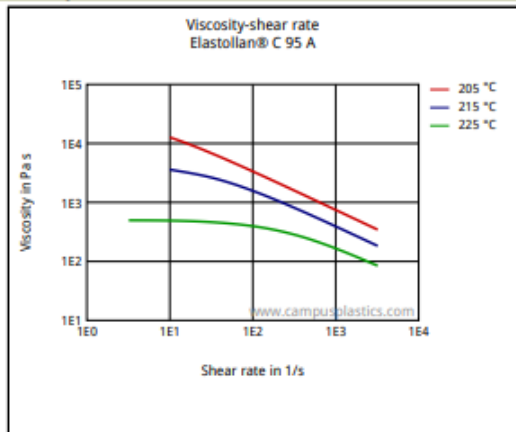
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus	140	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at 50% strain	9	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at 100% elongation	11	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at 300% elongation	22	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break TPE	55	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	>50	%	ISO 527-1/-2
Strain at break TPE	>300	%	ISO 527-1/-2
Charpy notched impact strength, +23°C	N	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -30°C	N	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Tensile notched impact strength, +23°C	650	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 8256/1
Compression set at 23 °C, 24h	30	%	ISO 815
Compression set at 70 °C, 24h	45	%	ISO 815
Tear strength, parallel	120	kN/m	ISO 34-1
Abrasion resistance	30	mm <sup>3</sup>	ISO 4649
Shore A hardness	96	-	ISO 48-4
Shore D hardness	45	-	ISO 48-4
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Glass transition temperature, 10°C/min	-28	°C	ISO 11357-1/-2
Burning behavior at 1.5 mm nominal thickness	V-2	class	IEC 60695-11-10
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Dissipation factor, 100Hz	560	E-4	IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 1MHz	700	E-4	IEC 62631-2-1
Volume resistivity	1E9	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Surface resistivity	1E15	Ohm	IEC 62631-3-2
Electric strength	26	kV/mm	IEC 60243-1

**Elastollan® C 95 A - TPU**  
**BASF Polyurethanes GmbH**

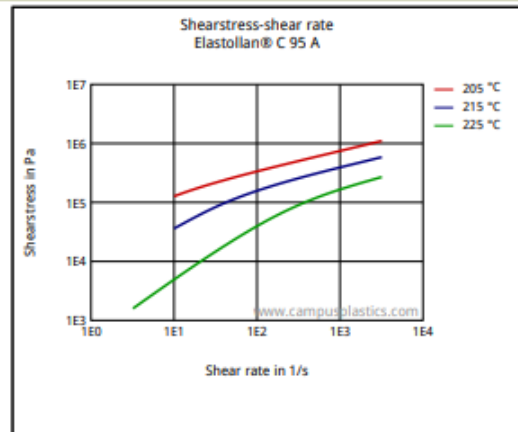
Comparative tracking index	600	-	IEC 60112
<b>Other properties</b>			
Density	1210	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
<b>Test specimen production</b>			
Injection molding, melt temperature	220	°C	ISO 294
Injection molding, mold temperature	60	°C	ISO 294

**Diagrams**

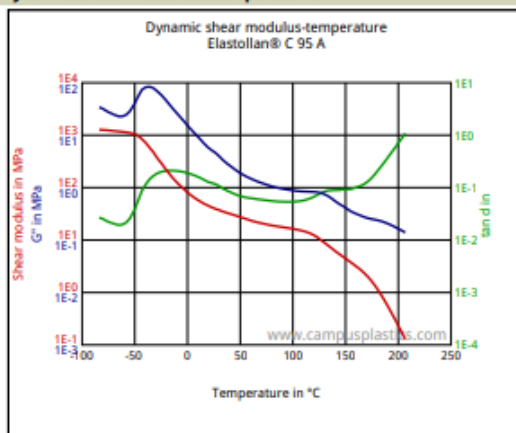
**Viscosity-shear rate**



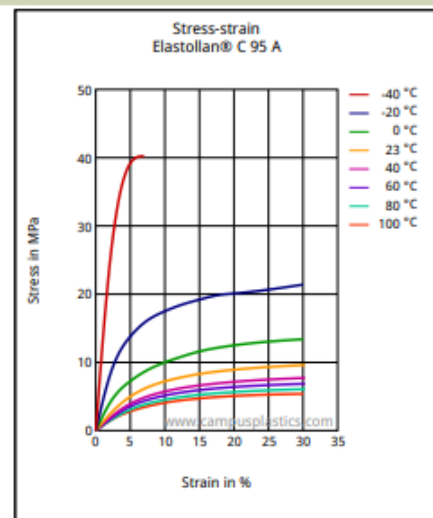
**Shearstress-shear rate**



**Dynamic shear modulus-temperature**

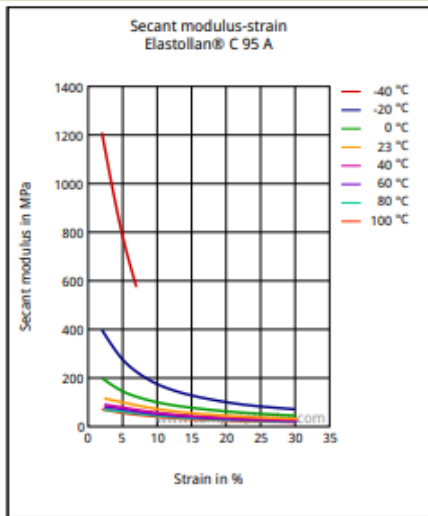


**Stress-strain**

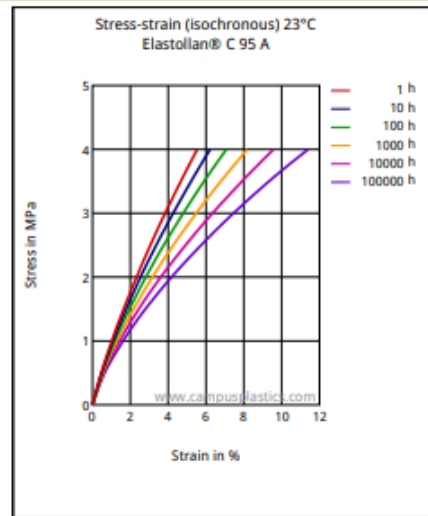


**Elastollan® C 95 A - TPU**  
**BASF Polyurethanes GmbH**

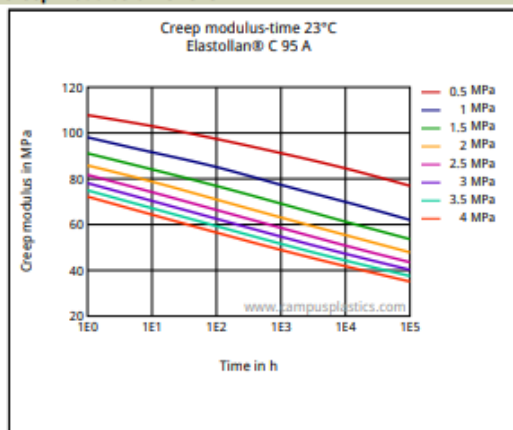
**Secant modulus-strain**



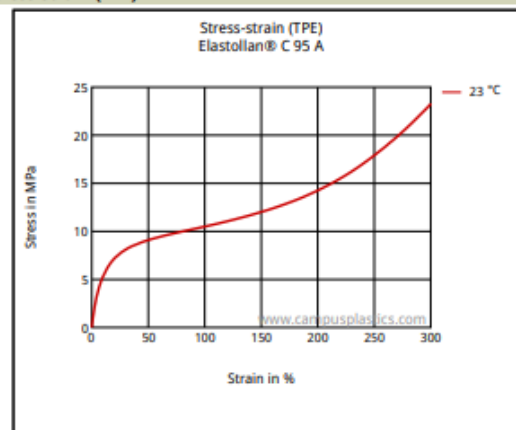
**Stress-strain (isochronous) 23°C**



**Creep modulus-time 23°C**



**Stress-strain (TPE)**



**Characteristics**

**Processing**

Injection Molding, Profile Extrusion

**Delivery form**

Pellets

**Other text information**

**Injection molding**

Barrel temperature : 205 - 225 °C  
Melt temperature : 225 °C  
Mold temperature: 25 - 40 °C

**Regional Availability**

North America, Europe, Asia Pacific, South and Central America, Near East/Africa

**Elastollan® C 95 A - TPU**  
**BASF Polyurethanes GmbH**

**Profile extrusion**

Barrel temperature : 170 - 205 °C

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESIGNS, DATA OR INFORMATION MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS.

In order to check the availability of products please contact us or our sales agency.

For more information about our products contact your local BASF representative or

BASF Polyurethanes GmbH  
European Business Management  
Thermoplastische Polyurethane  
Elastogranstraße 60  
D-49448 Lemförde  
Deutschland  
Telefon +49 5443 12 3456

Telefax +49 5443 12 2555  
e-mail: [elastollan-infopoint@basf.com](mailto:elastollan-infopoint@basf.com)

[www.pu.basf.de](http://www.pu.basf.de)

CAMPUS® is a registered trademark of CWFG (Chemie Wirtschaftsfoerderungsgesellschaft GmbH, Frankfurt)



# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST POLYKARBOANÁTU

**SONGHAN**

Plastic Technology Co., Ltd.

[www.lookpolymers.com](http://www.lookpolymers.com) email : [sales@lookpolymers.com](mailto:sales@lookpolymers.com)

## Covestro Makrolon® ET3127 Polycarbonate

Category : Polymer , Thermoplastic , Polycarbonate (PC) , Polycarbonate, Extruded , Polycarbonate, UV Stabilized

### Material Notes:

Makrolon® polycarbonate resin Main characteristics: • High toughness • Good heat resistance • Glass-like transparency, optical quality • High dimensional accuracy and stability Grade characteristics: • Extrusion • High viscosity, easy release • UV stabilized Formerly Makrolon 1243 MAS157As of 1 September 2015, Bayer Material Science was separated from Bayer AG and officially adopted its new name – Covestro.

Order this product through the following link:

[http://www.lookpolymers.com/polymer\\_Covestro-Makrolon-ET3127-Polycarbonate.php](http://www.lookpolymers.com/polymer_Covestro-Makrolon-ET3127-Polycarbonate.php)

Physical Properties	Metric	English	Comments
Bulk Density	0.660 g/cc	0.0238 lb/in <sup>3</sup>	pellets; ISO 60
Density	1.20 g/cc	0.0434 lb/in <sup>3</sup>	ISO 1183-1
Moisture Absorption at Equilibrium	0.12 %	0.12 %	ISO 62, 50% RH
Water Absorption at Saturation	0.30 %	0.30 %	ISO 62
Water Vapor Transmission	15.0 g/m <sup>2</sup> /day @Thickness 0.100 mm	0.966 g/100 in <sup>2</sup> /day @Thickness 0.00394 in	85% RH, film; ISO 15106-1
Oxygen Transmission	65.0 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.100 mm	165 cc-mil/100 in <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.00394 in	650 cc/m <sup>2</sup> -24hr-bar; film; b.o. ISO 2556
	70.0 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.0254 mm	178 cc-mil/100 in <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.00100 in	2760 cc/m <sup>2</sup> -24hr-bar; film; b.o. ISO 2556
Nitrogen Transmission	12.0 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.100 mm	30.5 cc-mil/100 in <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.00394 in	120 cc/m <sup>2</sup> -24hr-bar; film; b.o. ISO 2556
	13.0 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.0254 mm	33.0 cc-mil/100 in <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.00100 in	510 cc/m <sup>2</sup> -24hr-bar; film; b.o. ISO 2556
Carbon Dioxide Transmission	380 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.100 mm	965 cc-mil/100 in <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.00394 in	3800 cc/m <sup>2</sup> -24hr-bar; film; b.o. ISO 2556
	429 cc-mm/m <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.0254 mm	1090 cc-mil/100 in <sup>2</sup> -24hr-atm @Thickness 0.00100 in	16900 cc/m <sup>2</sup> -24hr-bar; film; b.o. ISO 2556

Physical Properties	Metric	English	Comments
Linear Mold Shrinkage, Flow	0.0075 cm/cm	0.0075 in/in	60x60x2 mm; 500 bar; ISO 294-4
	@Thickness 2.00 mm	@Thickness 0.0787 in	
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.0075 cm/cm	0.0075 in/in	60x60x2 mm; 500 bar; ISO 294-4
	@Thickness 2.00 mm	@Thickness 0.0787 in	
Melt Flow	7.0 g/10 min	7.0 g/10 min	ISO 1133
	@Load 1.20 kg, Temperature 300 °C	@Load 2.65 lb, Temperature 572 °F	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Puncture Resistance	5500 N	1240 lb (f)	ISO 6603-2
	@Temperature 23.0 °C	@Temperature 73.4 °F	
	6400 N	1440 lb (f)	ISO 6603-2
	@Temperature -30.0 °C	@Temperature -22.0 °F	
Ball Indentation Hardness	115 MPa	16700 psi	ISO 2039-1
Tensile Strength at Break	65.0 MPa	9430 psi	50 mm/min; ISO 527-1,-2
Tensile Strength, Yield	67.0 MPa	9720 psi	50 mm/min; ISO 527-1,-2
Elongation at Break	>= 50 %	>= 50 %	Nominal, 50 mm/min; ISO 527-1,-2
	110 %	110 %	50 mm/min; b.o. ISO 527-1,-2
Elongation at Yield	6.2 %	6.2 %	50 mm/min; ISO 527-1,-2
Tensile Modulus	2.40 GPa	348 ksi	1 mm/min; ISO 527-1,-2
Flexural Strength	100 MPa	14500 psi	2 mm/min; ISO 178
Flexural Yield Strength	74.0 MPa	10700 psi	2 mm/min; ISO 178
	@Strain 3.50 %	@Strain 3.50 %	
Flexural Modulus	2.40 GPa	348 ksi	2 mm/min; ISO 178
Izod Impact, Notched (ISO)	12.0 kJ/m <sup>2</sup>	5.71 ft-lb/in <sup>2</sup>	complete break; b.o. ISO 180-A
	@Thickness 3.20 mm, Temperature -30.0 °C	@Thickness 0.126 in, Temperature -22.0 °F	
	80.0 kJ/m <sup>2</sup>	38.1 ft-lb/in <sup>2</sup>	partial break; b.o. ISO 180-A
	@Thickness 3.20 mm, Temperature 23.0 °C	@Thickness 0.126 in, Temperature 73.4 °F	
Charpy Impact Unnotched	NB	NB	ISO 179-1eU
	@Temperature 23.0 °C	@Temperature 73.4 °F	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
	@Temperature -30.0 °C	@Temperature -22.0 °F	
	NB	NB	ISO 179-1eU
	@Temperature -60.0 °C	@Temperature -76.0 °F	
Charpy Impact, Notched	1.40 J/cm <sup>2</sup>	6.66 ft-lb/in <sup>2</sup>	complete break; ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA
	@Thickness 3.00 mm, Temperature -30.0 °C	@Thickness 0.118 in, Temperature -22.0 °F	
Puncture Energy	7.00 J/cm <sup>2</sup>	33.3 ft-lb/in <sup>2</sup>	partial break; ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA
	@Thickness 3.00 mm, Temperature 23.0 °C	@Thickness 0.118 in, Temperature 73.4 °F	
Puncture Energy	60.0 J	44.3 ft-lb	ISO 6603-2
	@Temperature 23.0 °C	@Temperature 73.4 °F	
Tensile Creep Modulus, 1 hour	65.0 J	47.9 ft-lb	ISO 6603-2
	@Temperature -30.0 °C	@Temperature -22.0 °F	
Tensile Creep Modulus, 1000 hours	1900 MPa	276000 psi	ISO 899-1

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear, Parallel to Flow	65.0 µm/m-°C	36.1 µin/in-°F	ISO 11359-1,-2
	@Temperature 23.0 - 55.0 °C	@Temperature 73.4 - 131 °F	
CTE, linear, Transverse to Flow	65.0 µm/m-°C	36.1 µin/in-°F	ISO 11359-1,-2
	@Temperature 23.0 - 55.0 °C	@Temperature 73.4 - 131 °F	
Thermal Conductivity	0.200 W/m-K	1.39 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	cross-flow; ISO 8302
Hot Ball Pressure Test	136 °C	277 °F	IEC 60695-10-2
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	140 °C	284 °F	ISO 75-1,-2
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	128 °C	262 °F	ISO 75-1,-2
Vicat Softening Point	145 °C	293 °F	120°C/h; ISO 306
	@Load 5.10 kg	@Load 11.2 lb	
Vicat Softening Point	146 °C	295 °F	50°C/h; ISO 306
	@Load 5.10 kg	@Load 11.2 lb	

Class Transition Temp, Tg Thermal Properties	140 °C Metric	295 °F English	10 °C/min; ISO 11357-1,-2 Comments
UL RTI, Electrical	80.0 °C	176 °F	UL 746B
UL RTI, Mechanical with Impact	80.0 °C	176 °F	UL 746B
UL RTI, Mechanical without Impact	80.0 °C	176 °F	UL 746B
Flammability, UL94	HB	HB	
	@Thickness 0.750 mm	@Thickness 0.0295 in	
Flash Point	480 °C	896 °F	ASTM D 1929
	560 °C	1040 °F	self ignition; ASTM D 1929
Oxygen Index	28 %	28 %	Method A; ISO 4589-2
Glow Wire Test	875 °C	1610 °F	GWFI; IEC 60695-2-12
	@Thickness 0.750 mm	@Thickness 0.0295 in	
	875 °C	1610 °F	GWFI; IEC 60695-2-12
	@Thickness 1.50 mm	@Thickness 0.0591 in	
	875 °C	1610 °F	GWIT; IEC 60695-2-13
	@Thickness 0.750 mm	@Thickness 0.0295 in	
	875 °C	1610 °F	GWIT; IEC 60695-2-13
	@Thickness 1.50 mm	@Thickness 0.0591 in	
	900 °C	1650 °F	GWIT; IEC 60695-2-13
	@Thickness 3.00 mm	@Thickness 0.118 in	
	960 °C	1760 °F	GWFI; IEC 60695-2-12
	@Thickness 3.00 mm	@Thickness 0.118 in	
Optical Properties	Metric	English	Comments
Refractive Index	1.586	1.586	Procedure A; ISO 489
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Volume Resistivity	1.00e+16 ohm-cm	1.00e+16 ohm-cm	IEC 60093
Surface Resistance	1.00e+16 ohm	1.00e+16 ohm	IEC 60093
Dielectric Constant	3.0	3.0	IEC 60250
	@Frequency 1.00e+6 Hz	@Frequency 1.00e+6 Hz	

Electrical Properties	Metric	English	Comments
	@Frequency 100 Hz	@Frequency 100 Hz	
Dielectric Strength	34.0 kV/mm @Thickness 1.00 mm	864 kV/in @Thickness 0.0394 in	IEC 60243-1
Dissipation Factor	0.00080 @Frequency 100 Hz	0.00080 @Frequency 100 Hz	IEC 60250
	0.0095 @Frequency 1.00e+6 Hz	0.0095 @Frequency 1.00e+6 Hz	IEC 60250
Comparative Tracking Index	100 V	100 V	CTIM; Solution B; IEC 60112
	250 V	250 V	Solution A; IEC 60112

### Contact Songhan Plastic Technology Co.,Ltd.

Website : [www.lookpolymers.com](http://www.lookpolymers.com)

Email : [sales@lookpolymers.com](mailto:sales@lookpolymers.com)

Tel : +86 021-51131842

Mobile : +86 13061808058

Skype : lookpolymers

Address : United North Road 215,Fengxian District, Shanghai City,China

# PŘÍLOHA P III: KOŘENOVÁ DATA MĚŘENÍ KOEFICIENTU TŘENÍ VŠECH VZORKŮ

## TPU VS

### Standard parameters

#### Instrument

- Standard tribometer
- Serial number: 1000022948
- Tribometer / Version 7.0.10
- Date of measure: 4.5.2023 9:31:24

#### Static partner

- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

#### Environment

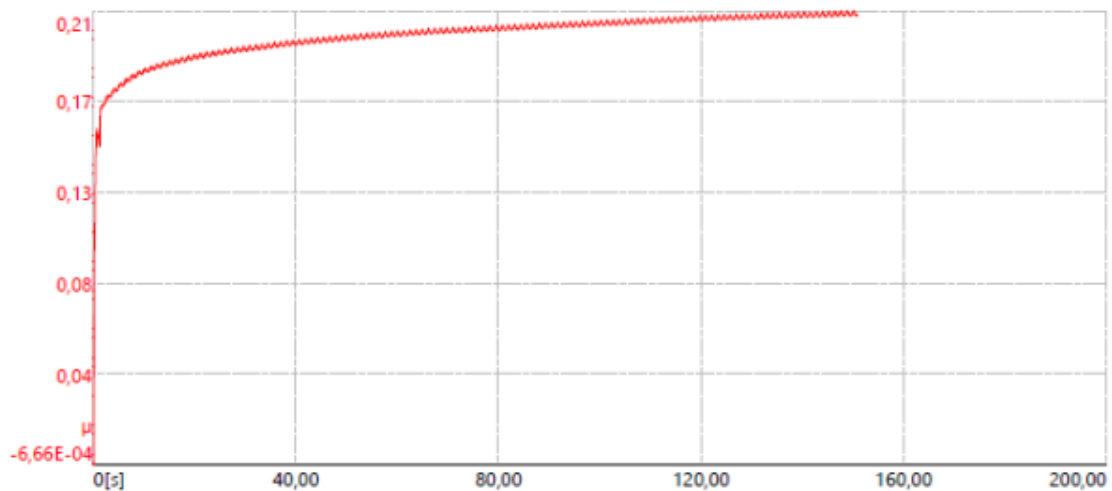
- Temperature: 35,00 [°C]
- Atmosphere: Air
- Humidity: 53,00 [%]

#### Sequence

- Sequence count: 1
- Single-way mode
- Radius: 15,50 [mm]
- Lin. Speed: 6,98 [cm/s]
- Acquisition rate: 80,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 5,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 100,0 [lap]
- Effective Stop: laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn track section: 0,0 [µm <sup>2</sup> ]	Worn cap diameter: 0,0 [µm]	Sample Wear Rate: 0 [mm <sup>3</sup> /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm <sup>3</sup> /N/m]
Poisson ratio: 0,000	Poisson ratio: 0,000	Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : 0,000 min : -0,001 max : 0,210 mean : 0,198 std. dev. : 0,012



Friction coef.

## PC VS

### Standard parameters

#### Instrument

- Standard tribometer
- Serial number: 1000022948
- Tribometer / Version 7.0.10
- Date of measure: 4.5.2023 9:37:38

#### Static partner

- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

#### Environment

- Temperature: 35,00 [°C]
- Atmosphere: Air
- Humidity: 53,00 [%]

#### Sequence

- Sequence count: 1
- Single-way mode
- Radius: 15,50 [mm]
- Lin. Speed: 6,98 [cm/s]
- Acquisition rate: 80,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 5,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 100,0 [lap]
- Effective Stop: laps

#### Sample

Worn track section: 0,0 [ $\mu\text{m}^2$ ]  
Young's Modulus: 0,0 [GPa]  
Poisson ratio: 0,000

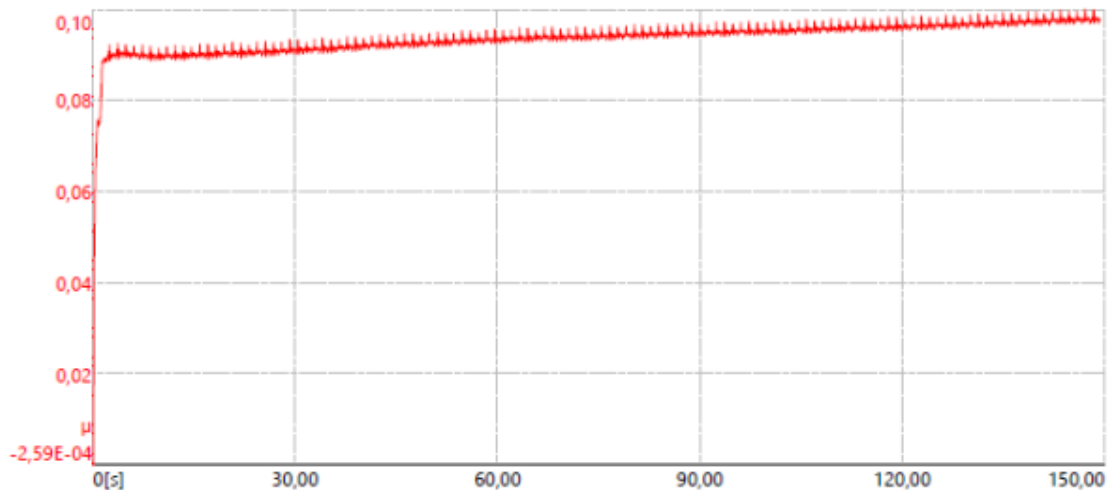
#### Static partner

Worn cap diameter: 0,0 [ $\mu\text{m}$ ]  
Young's Modulus: 0,0 [GPa]  
Poisson ratio: 0,000

#### Calculations

Sample Wear Rate: 0 [ $\text{mm}^3/\text{N/m}$ ]  
Partner Wear Rate: 0 [ $\text{mm}^3/\text{N/m}$ ]  
Max Herzian Stress: 0 [GPa]

Start : 0,000 min : 0,000 max : 0,100 mean : 0,094 std. dev. : 0,004



Friction coef.

## KOM D

### Standard parameters

#### Instrument

- Standard tribometer
- Serial number: 1000022948
- Tribometer / Version 7.0.10
- Date of measure: 4.5.2023 10:03:43

#### Static partner

- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

#### Environment

- Temperature: 35,00 [°C]
- Atmosphere: Air
- Humidity: 53,00 [%]

#### Sequence

- Sequence count: 1
- Single-way mode
- Radius: 15,50 [mm]
- Lin. Speed: 6,98 [cm/s]
- Acquisition rate: 80,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 5,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 100,0 [lap]
- Effective Stop: laps

#### Sample

Worn track section: 0,0 [μm<sup>2</sup>]  
Young's Modulus: 0,0 [GPa]  
Poisson ratio: 0,000

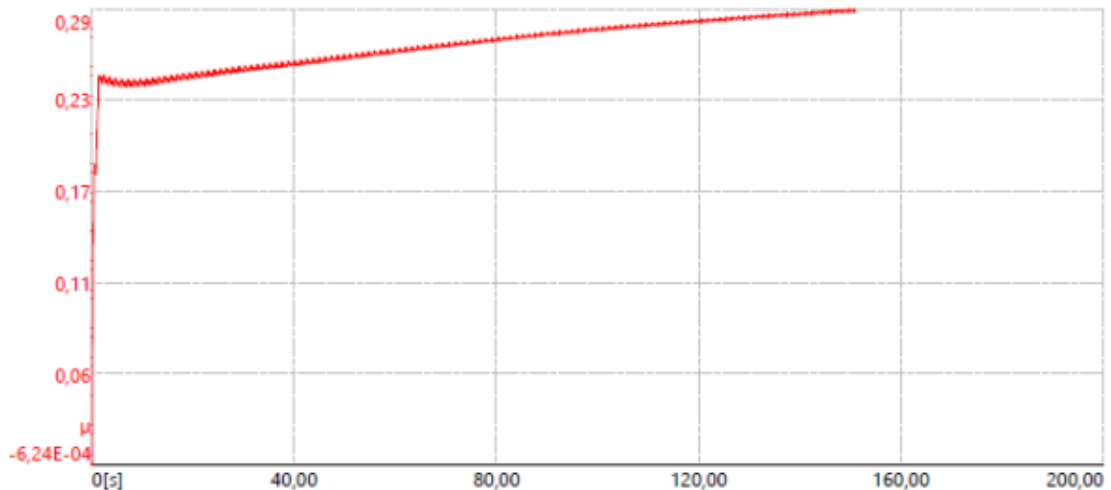
#### Static partner

Worn cap diameter: 0,0 [μm]  
Young's Modulus: 0,0 [GPa]  
Poisson ratio: 0,000

#### Calculations

Sample Wear Rate: 0 [mm<sup>3</sup>/N/m]  
Partner Wear Rate: 0 [mm<sup>3</sup>/N/m]  
Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : 0,000 min : -0,001 max : 0,288 mean : 0,265 std. dev. : 0,018



Friction coef.



## KOM S

### Standard parameters

#### Instrument

- Standard tribometer
- Serial number: 1000022948
- Tribometer / Version 7.0.10
- Date of measure: 4.5.2023 10:13:21

#### Static partner

- Dimension: 6,00 [mm]
- Geometry: Ball

#### Environment

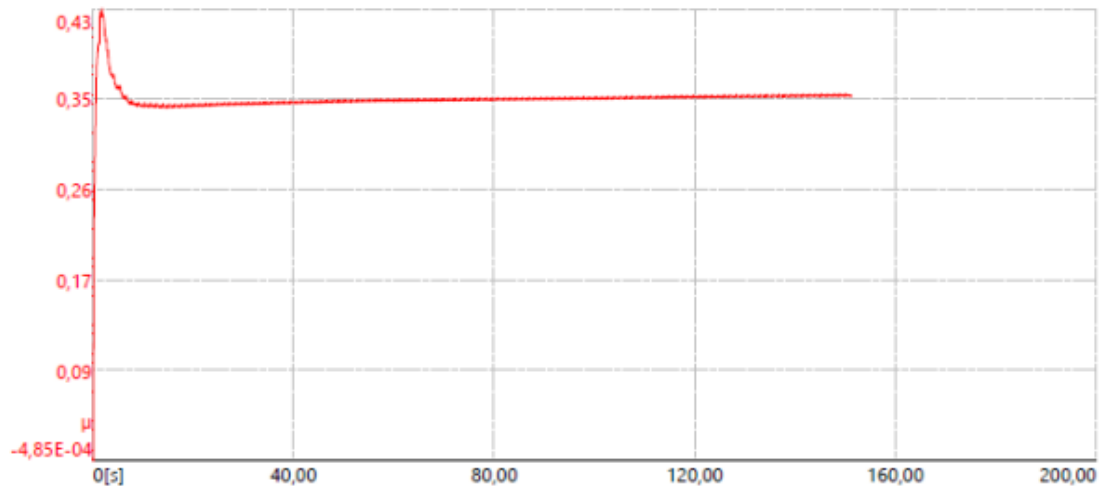
- Temperature: 35,00 [°C]
- Atmosphere: Air
- Humidity: 53,00 [%]

#### Sequence

- Sequence count: 1
- Single-way mode
- Radius: 15,50 [mm]
- Lin. Speed: 6,98 [cm/s]
- Acquisition rate: 80,0 [Hz]
- Cycles sampled: 1/1
- Pause: 0 [s]
- Homing at begin: Yes
- Normal load: 5,00 [N]
- Unload at end: No
- Stop condit.: 100,0 [lap]
- Effective Stop: laps

Sample	Static partner	Calculations
Worn track section: 0,0 [µm <sup>2</sup> ]	Worn cap diameter: 0,0 [µm]	Sample Wear Rate: 0 [mm <sup>3</sup> /N/m]
Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Young's Modulus: 0,0 [GPa]	Partner Wear Rate: 0 [mm <sup>3</sup> /N/m]
Poisson ratio: 0,000	Poisson ratio: 0,000	Max Hertzian Stress: 0 [GPa]

Start : 0,000 min : 0,000 max : 0,433 mean : 0,347 std. dev. : 0,014



Friction coef.