

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

**VÝVOJ A PRODUKCE 3D TIŠTĚNÉHO
ELASTOMERNÍHO PNEUMATICKÉHO GRIPPERU**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Jan Dolák

Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.

Jihlava 2026

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce:	Bc. Jan Dolák
Studijní program:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu:	doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.
Název práce:	Vývoj a produkce 3D tištěného elastomerního pneumatického gripperu
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.
Cíl práce:	Cílem práce bude návrh a výroba elastomerní struktury vyrobené 3D tiskem. Cílem je uplatnit pro aplikace v oblasti pneumatické soft-robotiky a úchopové mechaniky. Bude proveden konstrukční návrh úchopového mechanismu s připojením na zdroj tlaku a jeho regulaci. Následně struktury budou vyrobeny a otestovány na reálných aplikacích. Potřebné znalosti o elastickém chování použitých materiálů budou doplněny mechanickými testy.

Abstrakt

Měkká robotika využívající 3D tisk nabízí nové možnosti pro bezpečnou manipulaci s křehkými a nepravidelnými objekty. Tato diplomová práce se zaměřuje na vývoj a výrobu elastomerního pneumatického gripperu. Hlavním cílem je komplexní návrh soft pneumatického gripperu, výroba pomocí technologie 3D tisku a následné otestování vyrobeného pneumatického gripperu. Práce zahrnuje konstrukční návrh gripperu, sestavení testovacího přípravku včetně pneumatického obvodu, mechanické testování flexibilních materiálů zkouškou tahem, simulaci pomocí metody konečných prvků v softwaru Ansys. Praktická část končí aditivní výrobou funkčního prototypu technologií FDM a jeho experimentálním otestováním. Výsledky experimentu prokázaly výraznou shodu mezi reálným ohybem a simulačním modelem MKP analýzy, což potvrzuje správnost návrhu.

Klíčová slova

Soft robotika; soft pneumatický gripper; metoda konečných prvků; 3D tisk; zkouška tahem

Abstract

Soft robotics utilizing 3D printing offers new possibilities for the safe handling of fragile and irregular objects. This thesis focuses on the development and production of an elastomeric pneumatic gripper. The main goal is a comprehensive design of a soft pneumatic gripper, manufacturing it using 3D printing technology, and subsequently testing the produced pneumatic gripper. The work includes the structural design of the gripper, assembly of the test rig including the pneumatic circuit, mechanical testing of flexible materials through tensile tests, and simulation using the finite element method in Ansys software. The practical part concludes with the additive manufacturing of a functional prototype using FDM technology and its experimental testing. The experimental results demonstrated a significant correlation between the actual bending and the finite element simulation model, confirming the accuracy of the design.

Keywords

Soft robotics; soft pneumatic gripper; finite element method; 3D print; tensile test

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 14. dubna 2026

.....

Podpis studenta/ky

Poděkování

Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování doc. Ing. Radku Kolmanovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce. Mé poděkování patří rovněž Ing. Mgr. Lucii Zárybnické, Ph.D. za pomoc při provádění experimentálních tahových zkoušek.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	9
Seznam zkratk.....	10
Úvod	11
1 Úvod do soft robotiky	12
2 Technologie gripperů	16
2.1 Podle aktuace	17
2.2 Podle řízené tuhosti.....	21
2.3 Podle řízené přilnavosti	22
3 Výrobci soft pneumatických gripperů	24
3.1 Výrobce Piab	24
3.2 Výrobce OnRobot	24
3.3 Výrobce SRT	25
3.4 Výrobce Rochu.....	26
3.5 Výrobce SoftGripping.....	27
4 Rozdělení polymerů.....	29
4.1 Termoplasty	29
4.2 Reaktoplasty.....	29
4.3 Elastomery	29
4.4 Termoplastické elastomery	30
5 Přehled aditivních technologií pro výrobu elastických dílů	31
5.1 Technologie FDM.....	31
5.2 Technologie SLA.....	33
5.3 Technologie DLP a LCD	34
6 Mechanické testování polymerů	37
6.1 Zkouška tahem.....	37
7 Analýza metodou konečných prvků.....	41
7.1 Porovnání výsledků simulace.....	42
8 Praktická část	43
8.1 Návrh gripperu.....	43
8.2 Návrh testovacího přípravku	48
8.3 Pneumatické součástky pro regulaci tlaku	51
8.4 Tahová zkouška materiálů	52
8.5 Analýza pomocí MKP	59
8.6 Experimentální ověření.....	62
Závěr	67
Seznam použité literatury	68

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj měkkých aktuátorů vyráběných pomocí 3D tisku.....	14
Obrázek 2: Rozdělení měkkých chapadel pro různé technologie úchopů a typy objektů.....	17
Obrázek 3: Princip fungování technologií pro měkké uchopování	18
Obrázek 4: Technologie granular jamming	21
Obrázek 5: Soft grippery od výrobce Piab.....	24
Obrázek 6: Soft gripper od výrobce OnRobot.....	25
Obrázek 7: Soft Finger Gripper od společnosti SRT	26
Obrázek 8: Soft Robotic Gripper pro manipulaci s potravinami	27
Obrázek 9: Modulární řady od výrobce SoftGripper.....	28
Obrázek 10: Rozdělení polymerů	29
Obrázek 11: princip metody FDM	31
Obrázek 12: filament PLA pro FDM tisk	32
Obrázek 13: FDM 3D tiskárna Original Prusa MK4S.....	32
Obrázek 14: materiály pro FDM.....	33
Obrázek 15: metoda SLA.....	33
Obrázek 16: DLP tiskárna	34
Obrázek 17: metoda DLP.....	35
Obrázek 18: Deformační křivky polymerů v tahu a detail uchycení zkušební tělesa	39
Obrázek 19: Tvary zkušebních těles	40
Obrázek 20: Deformační křivka pro semikrystalické termoplasty	40
Obrázek 21: Přehled postupu MKP analýzy pro měkké aktuátory	41
Obrázek 22: Porovnání výsledků úhlu ohybu aktuátoru v závislosti na tlaku.....	42
Obrázek 23: Porovnání FEA a výsledků experimentálního ověření měkkého chapadla	42
Obrázek 24: Rozložení sestavy gripperu	44
Obrázek 25: Pohled shora na základnu.....	44
Obrázek 26: Finální model gripperu (pohled ze strany a shora).....	45
Obrázek 27: 3D tiskárna Bambu Lab P1S s úpravou	46
Obrázek 28: Stringování na vytištěném gripperu	47
Obrázek 29: Sestava testovacího přípravku zepředu.....	49
Obrázek 30: Sestava testovacího přípravku zezadu.....	49
Obrázek 31: Sestava testovacího přípravku shora	50
Obrázek 32: Regulátor tlaku B2R-14	51
Obrázek 33: Uzavírací ventil s odvětráváním.....	52
Obrázek 34: Zkušební stroj Instron 3345	53
Obrázek 35: zkušební těleso typ 1	54
Obrázek 36: Orientace vzorku pro tisk v softwaru Bambu Studio	54
Obrázek 37: Tahový diagram materiálu Spectrum S-Flex 98A.....	57
Obrázek 38: Tahový diagram materiálu Spectrum S-Flex 90A.....	58
Obrázek 39: Tahový diagram materiálu Spectrum S-Flex 85A.....	59
Obrázek 40: Postup tvorby analýzy MKP soft pneumatického gripperu	60
Obrázek 41: MKP analýza pro Spectrum S-Flex 90A a 85A	61
Obrázek 42: Simulace uchopení objektu.....	61

Obrázek 43: Porovnání odezvy gripperů při různých tlacích (Spectrum S-Flex 98A)	63
Obrázek 44: Porovnání odezvy gripperů při různých tlacích (Spectrum S-Flex 90A)	64
Obrázek 45: Porovnání odezvy gripperů při různých tlacích (Spectrum S-Flex 85A)	65
Obrázek 46: Ukázka uchopení objektu pro různé materiály	66

Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiálové a mechanické vlastnosti materiálu Spectrum S-Flex 98A	55
Tabulka 2: Doporučení tiskové nastavení pro materiálu Spectrum S-Flex 98A	55
Tabulka 3: Materiálové a mechanické vlastnosti materiálu Spectrum S-Flex 90A	56
Tabulka 4: Doporučení tiskové nastavení pro materiálu Spectrum S-Flex 90A	56
Tabulka 5: Materiálové a mechanické vlastnosti materiálu Spectrum S-Flex 85A	56
Tabulka 6: Doporučení tiskové nastavení pro materiálu Spectrum S-Flex 85A	57
Tabulka 7: Spočtené a naměřené hodnoty z tahové zkoušky	59

Seznam zkratek

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (akrylonitrilbutadienstyren)
CAD	Computer-Aided Design (počítačem podporované projektování)
DEA	Dielectric Elastomer Actuators (dielektrické elastomerové aktuátory)
DLP	Digital Light Processing (digitální zpracování světla)
DMD	Digital Micromirror Device (digitální mikrozrcadlové zařízení)
EAP	Electroactive Polymers (elektroaktivní polymery)
EP	Epoxy Resin (epoxidová pryskyřice)
ER	Electro-Rheological (elektroreologické)
FDM	Fused Deposition Modeling (modelování nanášením taveniny)
FEA	Finite Element Analysis (analýza metodou konečných prvků)
IPMC	Ionic Polymer-Metal Composites (iontové polymer-kovové kompozity)
LMPA	Low Melting Point Alloys (slitiny s nízkým bodem tání)
MKP	Metoda konečných prvků
MR	Magneto-Rheological (magnetoreologické)
MSLA	Masked Stereolithography (maskovaná stereolitografie)
PE	Polyethylene (polyethylen)
PEI	Polyetherimide (polyetherimid)
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol (polyetylentereftalát glykol)
PF	Phenol Formaldehyde Resin (fenol-formaldehydová pryskyřice)
PLA	Polylactic Acid (kyselina polyléčná)
PMMA	Polymethyl Methacrylate (polymethylmethakrylát)
POM	Polyoxymethylene (polyoxymethylen)
PP	Polypropylene (polypropylen)
PS	Polystyrene (polystyren)
PVC	Polyvinyl Chloride (polyvinylchlorid)
SLA	Stereolithography (stereolitografie)
TPE	Thermoplastic Elastomer (termoplastický elastomer)
TPU	Thermoplastic Polyurethane (termoplastický polyuretan)
UP	Unsaturated Polyester Resin (nenasyčená polyesterová pryskyřice)
UV	Ultraviolet (ultrafialové záření)

Úvod

Tradiční robotika s tuhými mechanismy významně podpořila ekonomický růst a průmyslovou automatizaci, ale naráží na limity při interakci s lidmi nebo při pohybu v proměnlivých podmínkách. Z toho důvodu se do popředí výzkumu a praxe dostává relativně nový obor měkké robotiky. Měkké robotické systémy jsou tvořeny poddajnými materiály, které eliminují riziko zranění, umožňují bezpečnou součinnost s okolím a snadno se přizpůsobují různým tvarům objektů. Rychlý rozvoj a inovace v této oblasti jsou v současnosti spjaty s aditivní výrobou. Tento výrobní postup nabízí obrovskou volnost při navrhování složitých geometrií z měkkých materiálů, bez nutnosti vytvářet nákladné a složité formy.

Hlavní motivací pro výběr tohoto tématu je potenciál, který spojení 3D tisku a měkké robotiky přináší do oblasti úchopových mechanismů. Vývoj 3D tisku měkkých robotů je stále v počáteční fázi, což nabízí široký prostor zkoumání efektivních metody výroby a testování nových elastomerních struktur. Technologie fluidních elastomerových aktuátorů umožňuje vytvářet značné síly a dosahovat velkých rozsahů pohybu, což umožňuje manipulaci s různorodými a často také velmi křehkými předměty. Využití dostupných aditivních technologií k výrobě těchto prvku představuje atraktivní cestu, jak přenést teoretické koncepty měkké robotiky do reálné průmyslové praxe.

Hlavním cílem diplomové práce je návrh a výroba elastomerní struktury vyrobené 3D tiskem. Pro naplnění cíle byly stanoveny následující kroky. Provedení komplexního konstrukčního návrhu úchopového mechanismu. Návrh připojení mechanismu na zdroj tlaku a vyřešení jeho regulace. Výroba navržených úchopových mechanismů a jejich otestování na reálných aplikacích. Doplnění potřebných znalostí o elastickém chování použitých materiálů pomocí mechanických testů.

Předložená práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je seznámení s problematikou měkké robotiky a technologiemi měkkého uchopování. Následuje rozdělení polymerů a přehled aditivních technologií vhodných pro výrobu elastických dílů. Závěr teoretické části je věnován metodikám mechanického testování polymerů. Praktická část se pak zaměřuje na hlavní cíle a provází celým procesem od první koncepce a modelování gripperu, přes jeho 3D tisk a návrh pneumatického obvodu až po analýzu metodou konečných prvků a finální experimentální ověření.

1 Úvod do soft robotiky

Měkké roboty definujeme jako systémy schopné autonomního chování, které jsou primárně složeny z materiálů s moduly v rozsahu modulů měkkých biologických materiálů. Výhody použití materiálů s poddajností podobnou měkkým biologickým materiálům zahrnují významné snížení rizika zranění, které by mohly robotické systémy neúmyslně způsobit (jak bylo prokázáno u tuhých robotů s poddajnými klouby), což zvyšuje jejich potenciál pro interakci s lidmi. Poddajné materiály se také snadněji přizpůsobují různým objektům, což zjednodušuje úlohy, jako je uchopování a mohou také vést ke zlepšení mobility na měkkém podkladu. (Rus a Tolley, 2015)

Aby tělo měkkého robota dosáhlo svého plného potenciálu, musí být do měkkého materiálu integrovány prostředky pro snímání, pohon, výpočty, ukládání energie a komunikaci, čímž vznikají tzv. chytré materiály. Kromě toho jsou vyžadovány algoritmy, které řídí tělo tak, aby vykazovalo požadované chování. Tyto algoritmy implementují přizpůsobení impedance struktury těla. Toto těsné propojení mezi tělem a mozkiem nám umožňuje uvažovat o systémech s měkkým tělem jako o strojích s mechanickou inteligencí, kde lze na tělo pohlížet tak, že rozšiřuje mozek o tzv. morfologické výpočty. Tato schopnost těla provádět výpočty v mnoha situacích zjednodušuje řídicí algoritmy a stírá hranici mezi tělem a mozkiem. (Rus a Tolley, 2015)

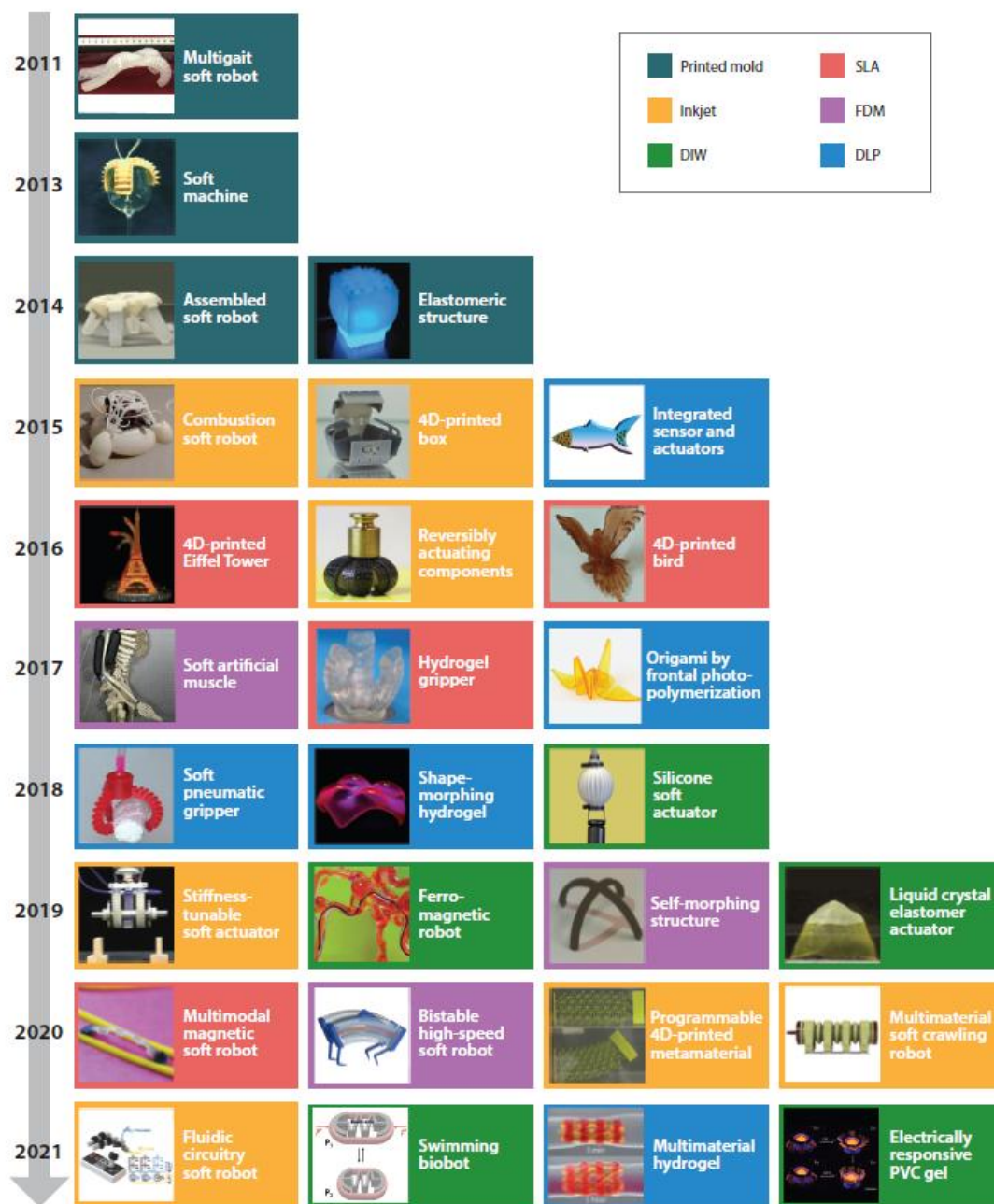
V posledních několika desetiletích vývoj tradičních robotů s tuhými pohony a převodovými mechanismy ohromně podpořil ekonomický růst, zejména v oblastech automatizované montáže a výroby ve strukturovaných prostředích. Protože jsou tyto konvenční tuhé roboty vyrobeny z tvrdých materiálů, nabízejí omezené schopnosti provádět složité pohyby s poddajností a přizpůsobivostí, což omezuje jejich využití pro interakci s lidmi nebo v nestrukturovaných prostředích. Měkké robotické systémy, které se objevily teprve nedávno, jsou vyrobeny z měkkých materiálů, jež obecně snesou velké deformace a zároveň vyvíjejí malý tlak nebo způsobují minimální poškození při manévrování ve stísněných prostorech. Díky přirozené poddajnosti měkkých materiálů jsou měkké robotické systémy bezpečné pro lidi a dokážou napodobit složité pohyby zvířat, což přináší slibný potenciál v různých aplikacích, od nových typů pohonů a nositelné elektroniky až po bio-inspirované roboty a biohybridní roboty operující v nestrukturovaných prostředích. (Wang a kol., 2023)

Zpočátku, protože funkce a struktury měkkých robotů byly jednoduché, postačovaly metody jako lití, vyztužování, výroba tenkých filmů, výroba tvarových vrstev a lepení. Jak se však funkce měkkých robotů rozšiřovaly, výzkumníci potřebovali navrhovat a vyrábět struktury z měkkých materiálů s více materiály a různými velikostmi. Nedávno se 3D tisk objevil jako nový výrobní postup, který nabízí větší svobodu při navrhování složitých geometrických tvarů ve srovnání s jinými výrobními metodami. 3D tisk je proces aditivní výroby, definovaný jako „proces spojování materiálů za účelem vytváření objektů z dat 3D modelu, obvykle vrstvu po vrstvě, na rozdíl od metod subtraktivní výroby, jako je tradiční obrábění. Dokáže vyrábět díly se sofistikovanou a složitou geometrií bez nutnosti následného opracování, vyrobené z materiálů a kompozitů na míru s téměř nulovým odpadem materiálu, přičemž je použitelný pro širokou škálu materiálů, včetně chytrých materiálů, jako jsou polymery s tvarovou pamětí a další materiály reagující na podněty. Nabízí proto rostoucí svobodu při navrhování a umožňuje designérům a inženýrům vytvářet jedinečné produkty, které lze nákladově efektivně vyrábět v malých objemech. Mezi běžné techniky 3D tisku patří modelování nanášením taveniny (FDM), přímý tisk

inkoustem (DIW), selektivní laserové spékání (SLS), inkjet a digitální zpracování světla (DLP). (Wang a kol., 2023)

Díky svým výhodám je 3D tisk slibnou výrobní metodou pro multifunkční a multimateriálové požadavky měkkých robotů. U měkkých robotů umožňuje personalizaci a přizpůsobení materiálů a struktur. V posledních několika desetiletích je patrný výrazný trend využívání technologie 3D tisku k výrobě měkkých robotů pro různé aplikace. Vzniklo několik komplexních přehledových článků o 3D tisku a měkké robotice. Existující přehledy měkké robotiky se zaměřovaly především na otázky materiálů, mechaniky a fyziky, jako jsou měkké roboty založené na origami strukturách, měkké roboty bez kabelového připojení, měkké roboty s nastavitelnou tuhostí, magneticky poháněné měkké roboty a řízení měkkých robotů s uzavřenou smyčkou. (Wang a kol., 2023)

V tomto přehledu poskytujeme pohled na výrobní metody pro různé typy měkkých robotických systémů a diskutujeme o výzvách a vyhlídkách budoucího výzkumu. Poskytujeme hloubkovou diskusi o pneumatických, elektricky aktivovaných, magneticky poháněných a 4D tištěných měkkých aktuátorech a integrovaných měkkých aktuátorech a senzorech. Obrázek 1 ukazuje časovou osu milníků ve vývoji 3D tisku měkkých robotů, počínaje pneumaticky poháněným měkkým robotem s více způsoby chůze vyrobeným pomocí tištěné formy v roce 2011, a následně se rozšiřuje na měkké roboty poháněné elektrickým, magnetickým, teplotním a chemickým polem a měkké roboty tištěné 3D tiskem pomocí metod FDM, inkjet, DLP, stereolitografie (SLA), DIW a multimateriálového 3D tisku. Obrázek 2 znázorňuje kumulativní rozdělení 3D tisku měkkých robotů v závislosti na roce a metodách tisku. Je patrné, že vývoj 3D tisku měkkých robotů je stále v počáteční fázi. (Wang a kol., 2023)



Obrázek 1: Vývoj měkkých aktuátorů vyráběných pomocí 3D tisku

zdroj: Wang a kol. (2023)

Vývoj měkkých aktuátorů a robotů vyráběných pomocí tištěné formy, SLA, SLS, FDM, inkoustového tisku, DLP, DIW a MM3D metod (viz. Obr. 1). (2011) Měkký robot s více způsoby pohybu, (2013) Měkký stroj, (2014) Sestavený měkký robot, elastomerická struktura. (2015) Spalovací měkký robot, 4D-tištěná krabíčka, integrovaný senzor a aktuátory. (2016) 4D-tištěná Eiffelova věž, reverzibilně aktivované komponenty, 4D-tištěný pták. (2017) Měkký umělý sval, hydrogelový uchopovač, origami vytvořené čelní ftopolymerizací. (2018) Měkký pneumatický uchopovač, tvarově měnící se hydrogel, silikonový měkký aktuátor. (2019) Měkký aktuátor s laditelnou tuhostí, feromagnetický robot, samomorfuující struktura, aktuátor z elastomeru s tekutými krystaly. (2020) Multimodální magnetický měkký robot,

bistabilní vysokorychlostní měkký robot, programovatelný 4D-tištěný metamateriál, multimateriáloví měkcí lezoucí roboti. (2021) Měkcí roboti s fluidními obvody, plavající biobot, multimateriálový hydrogel, elektricky responzivní PVC gel. (Wang a kol., 2023)

2 Technologie gripperů

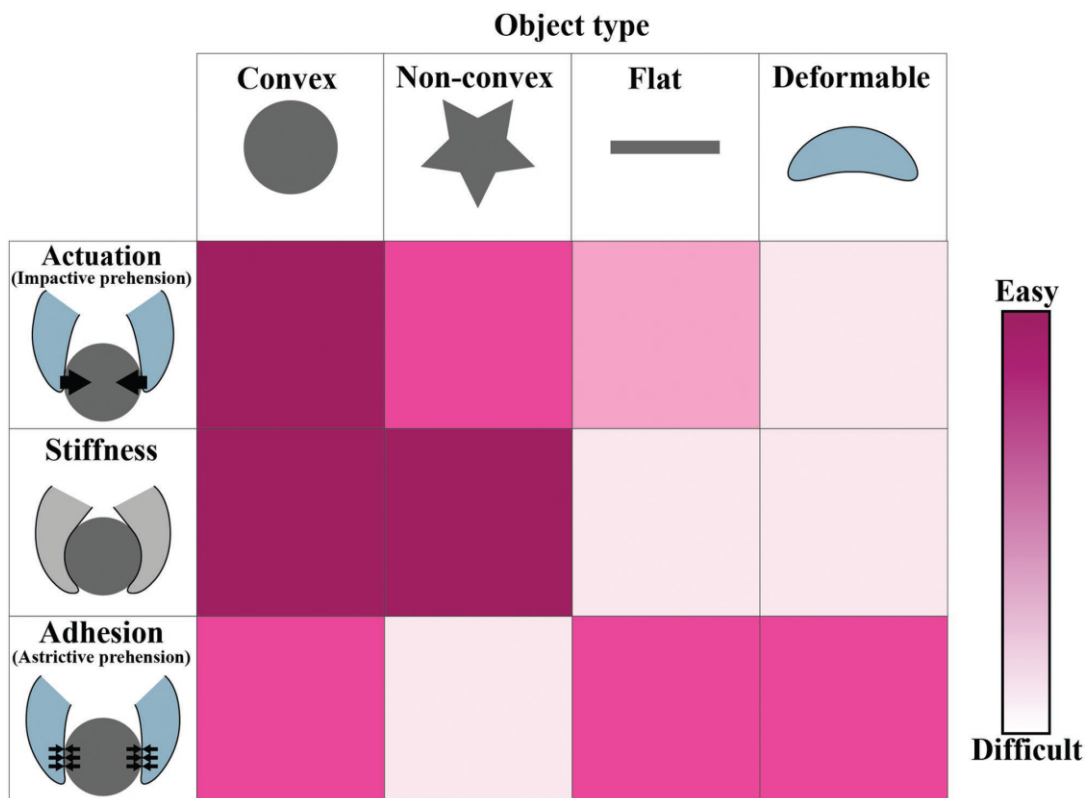
Měkké uchopování můžeme rozdělit do 3 skupin. Podle aktuace, podle řízené tuhosti a podle řízené adheze. Tyto tři kategorie se vzájemně nevyklučují a mnoho zařízení využívá kombinace dvou technologických tříd, aby dosáhlo vyšší výkonnosti. Preferovaná technologie a materiály pro daný úkol budou záviset na vlastnostech manipulovaného objektu, provozním prostředí (např. mokré, suché, čisté), požadované síle, požadované rychlosti, přípustné spotřebě energie a hmotnosti, biokompatibilitě a také na systémových omezeních, včetně integrace nebo použití externích senzorů a metod řízení. Protože měkké uchopovače poskytují vynikající přizpůsobení tvaru široké škále objektů, přistupuje se k jejich řízení jinak než u konvenčních uchopovačů založených na tuhých technologiích. *(Shintake a kol., 2018)*

Uchopování pomocí aktivace spočívá v ohýbání prstů nebo prvků uchopovače kolem objektu, podobně jako když prsty uchopujeme vejce nebo sklenici vody. Tvar ohybu může být aktivně řízen nebo lze využít kontaktu s objektem k vyvolání deformace. Z mnoha přístupů jsou nejnávštěvnější ty, které využívají externí elektromagnetické motory a fluidní elastomerní aktuátory, přičemž mnoho zařízení bylo představeno během posledních 30 let. Tyto techniky fungují dobře ve vzduchu i ve vodě a nejsou příliš citlivé na povrchové podmínky nebo povrchovou energii. Přesto existuje mnoho výzev spojených s uchopováním pomocí aktivace, včetně dosažení dostatečných sil, řízení síly a jejího rozložení, zejména při manipulaci s deformovatelnými objekty. Ploché objekty nejsou pro tuto metodu vhodné. *(Shintake a kol., 2018)*

Uchopování s řízenou tuhostí využívá velké změny tuhosti některých materiálů nebo jejich kombinací k udržení objektu. K obepnutí objektu částí uchopovače je zapotřebí aktuátor, ale protože je uchopovač v měkkém stavu, může být aktivační síla velmi nízká, což umožňuje uchopení velmi křehkých objektů. Klíčovými příklady jsou materiály s fázovou změnou, jako jsou polymery s tvarovou pamětí a slitiny s nízkým bodem tání a granulární jamming. Takové uchopovače mohou být rychlé a umožňují nastavení tuhosti na požadovanou úroveň. Omezeními jsou rozsah dosažitelné změny tuhosti a u tepelných systémů také dlouhé časové konstanty. *(Shintake a kol., 2018)*

Uchopování pomocí řízené adheze, podobně jako u měnitelné tuhosti, vyžaduje aktivační metodu pro částečné obepnutí objektu. Řízená adheze pomocí elektroadheze nebo suchých adheziv spoléhá na povrchové síly na rozhraní mezi uchopovačem a objektem. Tento princip je velkou výhodou při manipulaci s velmi křehkými objekty, protože eliminuje vysoké tlakové síly potřebné při uchopování pomocí aktivace – lze dosáhnout vysokých smykových sil, aniž by bylo nutné vyvíjet velké normálové zatížení na objekt. Řízená adheze je také ideální pro ploché objekty nebo objekty, které nelze obepnout. Omezení zahrnují požadavek na čisté, relativně hladké a suché povrchy. *(Shintake a kol., 2018)*

Mezi hlavní výzvy měkkých uchopovačů patří robustnost, rychlost, integrace senzorů a řízení. Významnou roli v budoucím zlepšování budou hrát pokročilé materiály (elastomery, materiály s fázovou změnou) a výrobní postupy. *(Shintake a kol., 2018)*



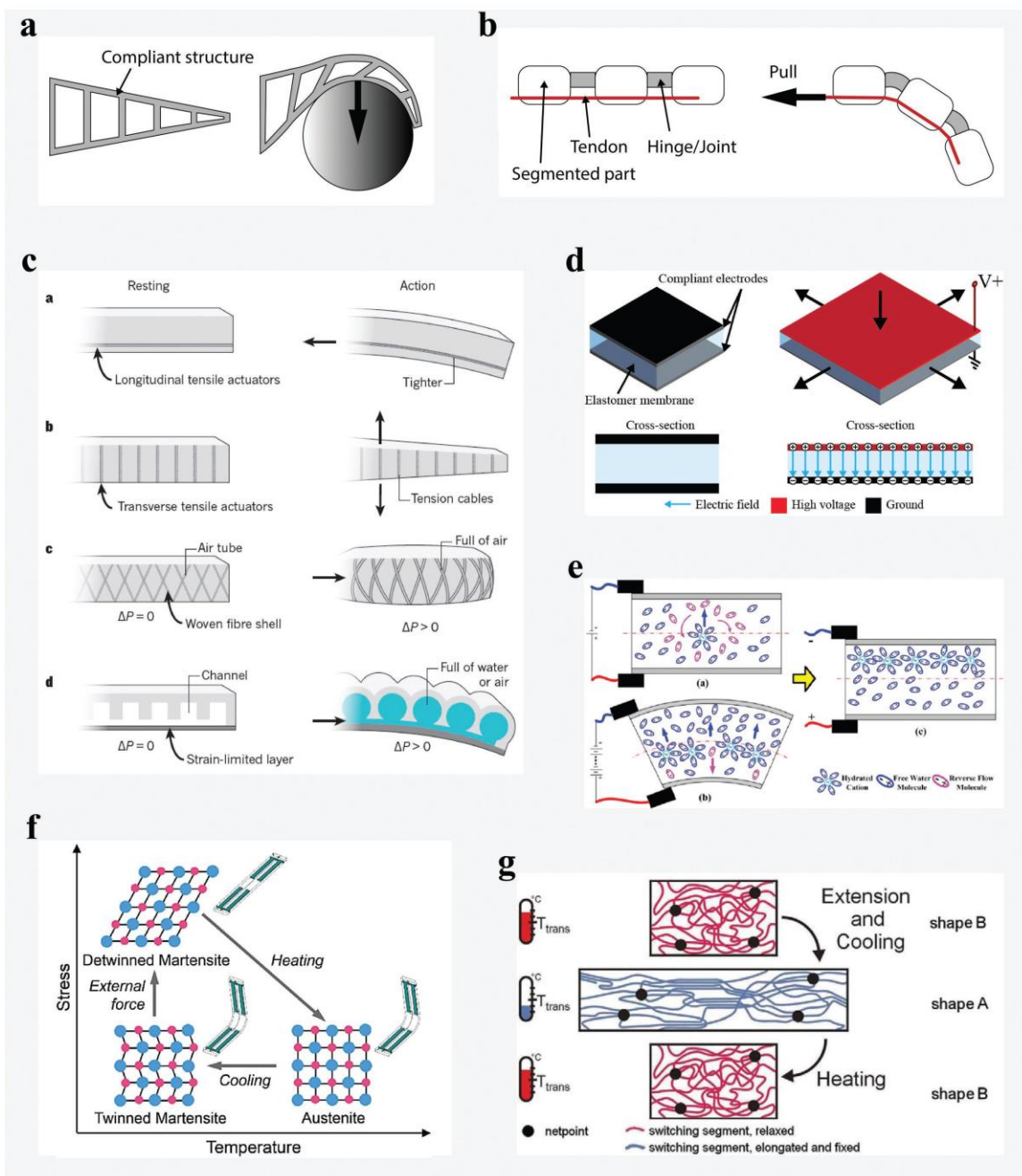
Obrázek 2: Rozdělení měkkých chapadel pro různé technologie úchopů a typy objektů

zdroj: Shintake a kol. (2018)

2.1 Podle aktuace

U měkkých chapadel lze uchopení provést pomocí adaptace poddajných struktur deformovaných vnějšími nebo integrovanými pohony. Vědci zkoumali měkké uchopení pomocí pohonu mnoha různými způsoby. Následující přehled se zaměřuje na technologie aktuátorů uvedené na obrázku 3: pasivní struktury s externími motory (část 2.1.1), fluidní elastomerové aktuátory (část 2.2.1), elektroaktivní polymery (část 2.3.1) a materiály s tvarovou pamětí (část 2.4.1). (Shintake a kol., 2018)

Deformace pasivních struktur může buď využívat reakčních sil vznikajících kontaktem s objektem (obrázek 3a) nebo vycházet z tahu zapuštěných lanek (obrázek 3b). Fluidní elastomerové aktuátory spoléhají na nafukování své elastomerové komorové struktury, jejíž deformace je formována použitím asymetrických geometrií nebo vyztužujících vláken (obrázek 3c). Elektroaktivní polymery, jako jsou dielektrické elastomerové aktuátory (obrázek 3d) a iontové polymer-kovové kompozity (obrázek 3e) se aktivně deformují v reakci na elektrické podněty. Efekt tvarové paměti u některých materiálů lze také využít jako prostředek aktuace měkkého uchopování. Mezi hlavní materiály tohoto typu patří slitiny s tvarovou pamětí (obrázek 3f) a polymery s tvarovou pamětí (obrázek 3g). (Shintake a kol., 2018)



Obrázek 3: Princip fungování technologií pro měkké uchopování

zdroj: Shintake a kol. (2018)

2.1.1 Pasivní konstrukce s externími motory

Tato kategorie měkkých chapadel využívá poddajné konstrukce, které jsou deformovány externími elektromagnetickými motory. Klíčovou vlastností je, že část přicházející do styku s objektem neobsahuje žádné aktivní prvky, to zaručuje vysokou mechanickou odolnost. Umístění motorů mimo samotné tělo chapadla přináší výhodu v nezávislosti na jejich velikosti, hmotnosti a geometrie úchopové části. To umožňuje volbu výkonných motorů s vysokým krouticím momentem pro dosažení velkých sil. Díky využití standardních elektromagnetických motorů je usnadněna integrace s elektronikou a použití osvědčených metod řízení, což podporuje jejich

široké nasazení v průmyslu. Technicky rozlišujeme dva hlavní typy těchto systémů. Prvním je deformace vyvolaná kontaktem (Obrázek 3a), kde k úchopu dochází přitlačením konstrukce na objekt. Druhým typem je ovládání šlachami (Obrázek 3b), kde je síla přenášena lanky v článkované konstrukci. (Shintake a kol., 2018)

a) Deformace vyvolaná kontaktem (Contact-Driven Deformation)

Hlavní strategií tohoto přístupu je pasivní deformace poddajné struktury vyvolaný mechanickým kontaktem. Nejznámější příkladem jsou chapadla využívající princip Fin Ray. Tato zařízení byla úspěšně testována při manipulaci s citlivými i tvarově složitými předměty (ovoce, vejce, nářadí) a našla uplatnění například při sklizni ve sklenících nebo v hračkářském průmyslu. Do těchto konstrukcí lze integrovat 3D tištěné vodivé obvody pro zajištění sensorické zpětné vazby. Pasivní prvky jsou často kombinovány s tuhými robotickými systémy ve formě koncových efektorů, například podložek, konečků prstů či vláken. (Shintake a kol., 2018)

Specifickou podskupinu představují poddajné mechanismy, které se skládají z flexibilních nosníků. Úchop vzniká pohybem základny, což vede k ohybu nebo vzpěru konstrukce. S využitím topologické optimalizace jsou tato chapadla schopna manipulovat s drobnými a plochými předměty, například mincemi nebo bateriemi. Jejich jednoduchá konstrukce je předurčuje pro využití v mikrochapadlech, přičemž do spojů lze integrovat odporové senzory pro detekci objektu. (Shintake a kol., 2018)

b) Ovládání šlachami (Tendon-Driven)

Chapadla jsou inspirována biomechanikou lidských prstů a využívají podaktuované konstrukce, v nichž jeden motor (šlacha) ovládá více článků. Na rozdíl od tradičních tuhých systémů s pružinami se moderní vývoj zaměřuje na integraci měkkých materiálů. Jedním z přístupů představuje nahrazení mechanických kloubů elastickými závěsy, které akumulují energii ohybu a následně využívají pro pasivní návrat prstu do výchozí polohy. Technologie 3D tisku umožňuje výrobu robustních prstů schopných uchopit širokou škálu předmětů a zároveň do nich integrovat taktilní senzory. (Shintake a kol., 2018)

Dalším významným směrem je antropomorfní design, který napodobuje lidskou anatomii (kosti, svaly, šlachy) s cílem dosáhnout vysoké obratnosti. Tyto systémy kombinují tuhé a elastické části a prokazují schopnost provádět komplexní úchopy definované taxonomií ruky. Alternativní přístupy nahrazují tuhé šlachy elastickými vazy v kombinaci se specifickým řízením. Pro zlepšení manipulace se na povrch aplikuje poddajná kůže, která zvyšuje tření a umožňuje integraci senzorů, například kapacitních. Informace získané před a během kontaktu pomáhají optimalizovat strategii úchopu. (Shintake a kol., 2018)

Současný vývoj směřuje k výrobě zcela měkkých systémů, v nichž jsou články a klouby nahrazeny elastomery. Lana mohou být vedena uvnitř silikonových vaků, textilií nebo origami struktur. Příkladem jsou manipulátory inspirované ramenem chobotnice nebo vaky, které se aktivně deformují tahem za střední dno. Hlavní omezení této technologie představuje obtížná miniaturizace externích motorů. (Shintake a kol., 2018)

2.1.2 Fluidní elastomerové aktuátory

Princip funkce a vlastnosti aktuaace jsou založeny na tlaku tekutiny (plynu nebo kapaliny) v komorách vyrobených z vysoce deformovatelných materiálů. Díky geometrické asymetrii nebo

materiálové anizotropii se nafouknutí komory transformuje na ohyb celého aktuátoru. Fluidní elastomerové aktuátory vynikají schopností generovat značné síly (zaznamenány hodnoty 80–112 N) a dosahovat velkých rozsahů pohybu (ohyb až 300°) s relativně rychlou odezvou (0,05–1,0 s). Výkon těchto aktuátorů je však limitován charakteristikou zdroje tlaku a vlastnostmi elastomeru. Jejich jednoduchá struktura obvykle zahrnuje prodloužené komory, často vyztužené vlákny či tkaninami, které omezují roztažnost v určitých směrech. Výroba nejčastěji spoléhá na odlévání do forem, což umožňuje snadnou integraci funkčních prvků, jako jsou senzory deformace, prvky s proměnnou tuhostí nebo porézní materiály. Studie ukázaly, že existuje široké spektrum aplikací, včetně uchopení křehkých předmětů jako vajec, žárovek a potravin jako tofu nebo ovoce, až po těžší předměty. Hlavní nevýhodou zůstává nutnost externích zdrojů tlaku (kompresory), které jsou objemné a omezují mobilitu. Problémem může být i doba odezvy při vyšších frekvencích. Ačkoliv je technologie fluidních elastomerových aktuátorů již komerčně využívána a slouží ve vzdělávání, její další rozvoj směřuje k integraci pokročilého distribuovaného snímání (senzory), škálování pro různé velikosti objektů a vývoji miniaturizovaných zdrojů stlačeného média přímo v těle robota. (Shintake a kol., 2018)

2.1.3 Elektroaktivní polymery (EAP)

Elektroaktivní polymery jsou typy polymerů, které mění tvar reverzibilním způsobem při elektrickém podnětu. V oblasti robotiky jsou nejrozšířenější technologie dielektrické elastomerové aktuátory (DEA) a iontové polymer-kovové kompozity (IPMC). (Shintake a kol., 2018)

a) Dielektrické elastomerové aktuátory (DEA)

DEA se skládají z tenké elastomerové membrány, která je obvykle tlustá asi 3–500 μm a leží mezi dvěma poddajným elektrodami. Zvýšení napětí až na kilovolty vede k elektrostatické přitažlivosti elektrod. Tato síla stlačuje membránu, což vede ke zmenšení její tloušťky a výraznému zvětšení její plochy. Takové aktuátory jsou typicky tvořeny měkkými elastomery s modulem pružnosti okolo 1 MPa, což znamená, že mohou vytvářet velké deformace. Pro dlouhodobý provoz dosahují roztažení 10 až 50 %, ale teoreticky mohou přesáhnout i 1000 %. Mezi jejich hlavní přednosti patří velmi rychlá odezva pod 200 μs , vysoká elektromechanická účinnost a schopnost vlastního snímání stavu. Omezujícím faktorem je vysoké napětí, které je však zlepšeno vrstvením aktuátorů pro dosažení vyšších sil. Vysoké napětí vyžaduje ochranu a izolaci, ale proud je malý a miniaturizace komponent umožňuje stavbu mobilních robotů již nyní. (Shintake a kol., 2018)

b) Iontové polymer-kovové kompozity (IPMC)

IPMC mají polymerovou membránu nasycenou elektrolytem s tenkou vrstvou kovu pokrytou na obou stranách. Princip fungování spočívá v migraci iontů při aplikaci nízkého napětí v rozmezí 1 až 5 V. Kationty a anionty se v elektrolytu přesouvají k opačně nabitým elektrodám, to způsobuje nerovnoměrné bobtnání membrány a následný ohyb celé struktury na jednu stranu. Tato technologie poskytuje velké ohybové deformace a tuhost v rozmezí 0,6 až 21 GPa. Hlavní nevýhodou je pomalá odezva, která se může pohybovat v řádu minut pro dosažení velkých úhlů ohybu, dále hystereze a nízká generovaná síla. Díky svému principu ohybu jsou IPMC vhodné pro konstrukci prstových chapadel, zejména v mikroměřítku. Byly vyvinuty různé mikro-uchopovače dlouhé milimetry, schopné manipulace s objekty o hmotnosti v miligramech, ačkoli existují také větší verze schopné několika desítek gramů hmotnosti. Výše uvedená omezení v rychlosti a síle vedou k pomalejšímu vývoji IPMC ve srovnání s DEA. Hlavní potenciál této technologie tak

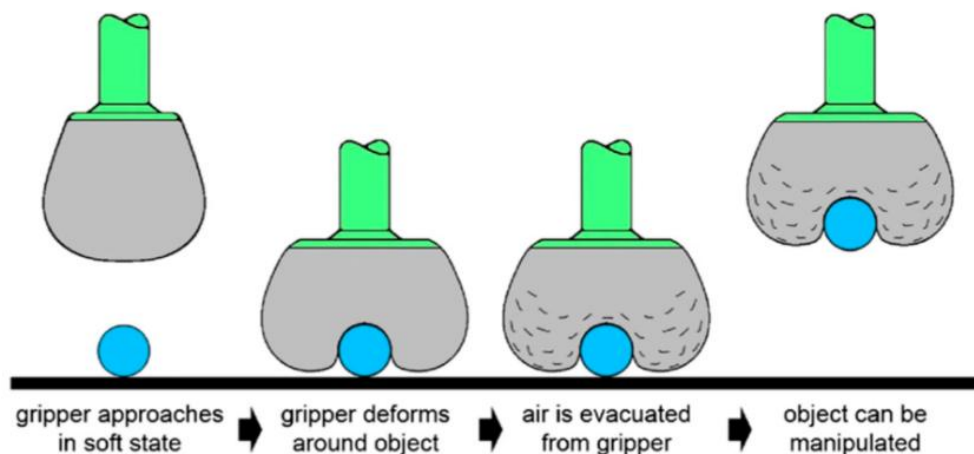
spočívá především v aplikacích ve vodním prostředí, jako je mořský průzkum či odběr vzorků nebo v biomedicině pro chirurgické zákroky a doručování léčiv v tělních tekutinách. (Shintake a kol., 2018)

2.2 Podle řízené tuhosti

Chapadla založená na materiálech a strukturách s proměnnou tuhostí využívají odlišný mechanismus oproti uchopování pomocí aktuace (pohonu) prezentované předchozí částí. Obecná metoda zahrnuje nastavení struktury uchopovače do jeho "měkké" konfigurace, přiblížení a obalení objektu, který má být uchopen, a následné ztuhnutí struktury k jeho udržení pomocí uzavření tvaru. Tato metoda může vést k vysokým přídržným silám při minimálním stlačení působícím na objekt. Navíc lze strategie úchopu rozšířit využitím lokálního zvyšování tuhosti struktury, což umožňuje změnu tvaru s více stupni volnosti pomocí jediného akčního vstupu. V následující části budou shrnuty technologie proměnné tuhosti používané u měkkých chapadel, jako je granular jamming, slitiny s nízkým bodem tání, elektroeologické a magnetoreologické kapaliny. (Shintake a kol., 2018)

2.2.1 Granular Jamming

Tato technologie (viz obr. 4) využívá fyzikálního jevu zvaného granulární přechod, při kterém se sypký materiál (skleněné či plastové kuličky) v elastickém obalu mění z kapalného chování na pevné těleso. Princip spočívá v odsátí vzduchu, čímž se vytvoří vakuum, které zvyšuje tření mezi zrny a brání jim v pohybu vůči sobě navzájem. Opětovným vpuštěním vzduchu se struktura vrátí do měkkého a poddajného stavu. Hlavními výhodami jsou jednoduchost konstrukce a vysoká rychlost změny tuhosti (1 s). Materiál dokáže zvýšit svou tuhost až 24násobně. Jedním příkladem je univerzální měkké chapadlo, které se v měkkém stavu přizpůsobí tvaru objektu a po odsátí vzduchu jej pevně sevře. Tato metoda je ideální pro manipulaci s různorodými předměty (žárovky, potraviny), ale ne pro objekt, který je plochý. (Shintake a kol., 2018)



Obrázek 4: Technologie granular jamming

Zdroj: Brown a kol. (2010)

2.2.2 Slitiny s nízkým bodem tání (LMPA)

LMPA jsou materiály, které tají při nízkých teplotách (typicky 47–62 °C). V robotice jsou zapouzdřeny v elastomerech a fungují na principu fázové změny, při zahřátí slitina taje a struktura změkne, při ochlazení slitina tuhne a zpevňuje se. Klíčovou vlastností LMPA je extrémní rozsah změny tuhosti (od 25krát až přes 9000krát) a schopnost dosáhnout vysoké nosnosti v pevném stavu (Youngův modul 3–9 GPa). To umožňuje konstruovat chapadla, která unesou mnohonásobek vlastní váhy (např. 1 g prst zvedne 780 g zátěž) při minimální aktivní síle aktuátoru. Často se kombinují s DEA. Hlavním limitem této technologie je časová náročnost fázového přechodu, zejména tuhnutí (chlazení), které může trvat přes 60 sekund, což zpomaluje manipulační cykly. Výzkum se proto soustředí na zrychlení odvodu tepla pomocí vodivějších materiálů, aktivního chlazení (např. vodou) nebo optimalizací povrchu a vnitřních kanálků. (Shintake a kol., 2018)

2.2.3 Elektroeologické a magnetoeologické kapaliny

Tyto kapaliny mění svou viskozitu v reakci na vnější pole. ER (elektroeologické) kapaliny reagují na elektrické pole a MR (magnetoeologické) na magnetické pole. Částice rozptýlené v kapalině se vlivem pole zřetězí ve směru siločar, čímž kapalina získá viskoelastické vlastnosti a celá struktura ztuhne. Výhodou je extrémně rychlá odezva (< 10 ms). MR kapaliny mají tendenci mít vyšší změny tuhosti, ale vyžadují cívky a velký proud, a proto mají vyšší spotřebu a zahřívání. ER kapaliny pracují s vysokým napětím, ale mají nižší energetické nároky. V robotice se využívají například pro hmatové senzory, které po kontaktu s objektem ztuhnou nebo v kombinaci s elektromagnety pro fixaci úchopu. Zásadním omezením je nízká absolutní tuhost (mez kluzu do 250 kPa), což limituje sílu úchopu. (Shintake a kol., 2018)

2.3 Podle řízené přilnavosti

Adheze je přitažlivost na rozhraní dvou povrchů, která vede ke smykovému napětí vytvořené normálovým tlakem. V oblasti měkké robotiky mohou chapadla s integrovanou adhezí generovat vysoké přídržné síly díky velkému smykovému tření, které na kontaktním rozhraní vzniká. Zásadní výhodou tohoto přístupu je skutečnost, že uzavírací síla působící kolmo k povrchu objektu je mnohem menší než v případě tradičního uchopování pomocí mechanické aktuace. Taková vlastnost pomáhá zajistit bezpečné zacházení s křehkými objekty. Vysoký poměr mezi generovanou smykovou silou a nutnou uzavírací silou je slibnou vlastností pro vývoj lehkých přenosných chapadel, protože zajišťuje vysoký poměr nosnosti k hmotnosti samotného zařízení. Vzhledem k tomu, že adhezní síla působí kolmo k povrchu objektu, otevírá tento princip cestu k dalším strategiím manipulace, jako je jednobodové uchopení, které je pro chapadla založená na aktivní smykové síle nebo obepnutí nemožné. Tyto vlastnosti výrazně zlepšují celkovou obratnost a všestrannost měkkých chapadel. Adheze je účinná pro manipulaci s měkkými objekty, protože přitažlivost na rozhraní automaticky sleduje deformace objektu, pokud je konstrukce chapadla dostatečně poddajná. V současných měkkých chapadlech se využívají dvě hlavní technologie: Elektroadheze a Geckoadheze. (Shintake a kol., 2018)

2.3.1 Elektroadheze

Elektrostatická přitažlivost mezi náboji je známá jako Coulombova síla a je základem elektroadheze. Technologie využívá tento jev tím, že kontroluje množství elektrických nábojů na rozhraní mezi zařízením a objektem. Elektroadheze je účinná na hladkých i drsných površích, vyžaduje však vysoká napětí v řádu několika kV. Naměřený adhezní tlak dosahuje až 13 kPa v normálovém a 62 kPa ve smykovém směru. Výkon může být zlepšen optimalizací geometrie (struktury) elektrod a změnou tloušťky izolace. Pro měkké uchopovače je elektroadheze realizována s aktuální jednotkou, která způsobuje deformaci, například prostřednictvím elektromagnetických motorů, fluidních aktuátorů nebo polymerů s tvarovou pamětí. Příkladem je chapadlo s flexibilními elektrodami pohybovanými motory schopné manipulovat s krabicemi či ovocem. Jiný přístup kombinuje elektroadhezi a elektrostatickou aktuaci v jediném prvku, kde elektrody DEA zajišťují pohyb i adhezi. Takové chapadlo je extrémně lehké a unese více než padesátinásobek vlastní váhy. Výzvou zůstává malá hystereze adhezní síly způsobená zbytkovými náboji, kterou lze řešit střídavým napětím nebo samočisticími mechanismy proti prachu a vlhkosti. (Shintake a kol., 2018)

2.3.2 Geckoadheze (Suchá adheze)

Tato technologie se inspirovává mikrovláknami na nohou gekonů, která využívají Van der Waalsovy síly. Adheze se aktivuje přitlačením mikrovláken k povrchu a deaktivuje se odstraněním síly. Nastavením úhlu vláken lze realizovat směrovou smykovou sílu. Gecko adheziva jsou účinná na hladkých i drsných površích, ale mohou být náročná u materiálů s nízkou povrchovou energií. Unikátní vlastností je schopnost samočištění a s povrchovou úpravou fungují i na mokru. Uváděný tlak je až 23,5 kPa v normálovém a 120 kPa ve smykovém směru. V měkkých chapadlech jsou používány pasivní mechanismy, kdy podpůrná fólie se deformuje při kontaktu a předpíná vlákna. Tato zařízení jsou velmi lehká a unesou stovky násobků své váhy. Geckoadheze se také kombinuje s aktivními prvky, jako jsou nafukovací membrány, které řízením tlaku mění kontaktní plochu pro uchopení a uvolnění. Další možností jsou víceprstá chapadla z polymerů tekutých krystalů, kde je přilnutí řízeno magneticky a odlepení tepelnou deformací. Konečným problémem je, že může mít drsné kontaktní povrchy, což lze řešit optimalizací morfologie vláken nebo mikrovýstupků. Je důležité vyřešit strategii uvolnění pro velmi měkké objekty, aby nedošlo k poškození předmětu. (Shintake a kol., 2018)

3 Výrobci soft pneumatických gripperů

Cílem této části bude přehled vybraných výrobců soft pneumatických gripperů. U každého z nich bude rozebrán profil společnosti a její aktuální produktová nabídka.

3.1 Výrobce Piab

Společnost Piab je světovým dodavatelem inovativních řešení v oblasti automatizace a vakuové technologie. Jejich hlavním cílem je rozvoj automatizace a přinášet do výroby větší přesnost, bezpečnost a výkon. Nacházejí uplatnění v širokém spektru odvětví, od automobilového průmyslu a logistiky až po potravinářství. (PIAB GROUP, b.r.)

3.1.1 Nabízené produkty

Společnost má široké portfolio zahrnující vakuové pumpy, dopravníky či klasické přísavky pro robotická ramena, v oblasti jemné manipulace hrají klíčovou roli jejich měkké pneumatické grippery z řady piSOFTGRIP.

Gripper řady piSOFTGRIP (viz obr. 5) používají technologie podtlaku. Zásadní provozní výhodou tohoto řešení je možnost přesné a plynulé regulace síly úchopu výhradně prostřednictvím změny úrovně přivedeného podtlaku. Tím se minimalizuje riziko poškození manipulovaného předmětu. Zařízení je vyrobeno ze silikonu, který splňuje přísné legislativní požadavky pro přímý styk s potravinami. Z tohoto důvodu nachází uchopovač primární uplatnění v automatizovaných procesech potravinářského průmyslu. Z hlediska integrace do robotických systémů je montáž a řízení tohoto uchopovače technologicky srovnatelné s instalací standardních vakuových přísavek. (PIAB AB, 2026)



Obrázek 5: Soft grippery od výrobce Piab

Zdroj: PIAB AB (2026)

3.2 Výrobce OnRobot

Společnost OnRobot byla založena v roce 2018 s cílem překonávat bariéry v automatizaci a přinášet výhody robotické automatizace. Společnost je předním světovým poskytovatelem

hardwarových a softwarových řešení pro kolaborativní aplikace. Veškerá nabídka je založena na jednotné platformě, která přináší sjednocené uživatelské prostředí napříč všemi značkami robotu. (OnRobot A/S, 2026a)

3.2.1 Nabízené produkty

Společnost OnRobot nabízí komplexní portfolio koncových efektorů pro kolaborativní a lehké průmyslové roboty. Veškeré uchopovače využívají jednotné mechanické rozhraní a sjednocená softwarově což umožňuje rychlou integraci. Nabídku lze rozdělit do několika skupin: (OnRobot A/S, 2026b)

- Elektrické prstové úchopové (řada RG a FG) zahrnují dvourstvé nebo tříprstvé varianty s různým zdvihem a nosností. Jsou určeny především pro obsluhu CNC strojů, montáž a manipulaci s materiálem.
- Vakuové uchopovače (řada VG a VGP) využívají k úchopu podtlak. Jsou ideální pro paletizaci, balení a manipulaci s plochými objekty.
- Magnetické uchopovače jsou určeny pro běžnou manipulaci s feromagnetickými materiály v automobilovém nebo leteckém průmyslu.
- Adhezivní uchopovače (Gecko Gripper) využívají technologie principu suché adheze, která umožňuje zvedat objekty s hladkým povrchem bez použití podtlaku.
- Soft gripper (viz obr. 6) jsou měkké chapadla s certifikací pro potravinářský průmysl. Jsou navržena na manipulaci s křehkými a nepravidelně tvarovanými předměty. Silikonové nástavce splňují normy pro kontakt s potravinami. Rozsah úchopů podle nástavce je od 11mm až 118mm. Nosnost těchto soft gripperů je až 2,2kg. (OnRobot A/S, 2026c)



Obrázek 6: Soft gripper od výrobce OnRobot

Zdroj: OnRobot A/S (2026c)

3.3 Výrobce SRT

Společnost Soft Robot Tech Co., LTD, založená v roce 2016 v Pekingu je čínským průmyslovým průkopníkem v oblasti soft robotiky, který se specializuje na vývoj inovativních chapadel schopných s vysokou přesností manipulovat s tvarově nepravidelnými a křehkými materiály.

Díky vlastnímu výzkum a portfoliu poskytuje komplexní automatizační řešení pro odvětví jako potravinářství, elektronika, polovodiče či zdravotnictví. (SOFT ROBOT TECH, 2026a)

3.3.1 Nabízené produkty

Portfolio společnosti SRT v oblasti soft robotiky je velmi rozsáhlé. Stručný přehled jejich produktů v oblasti gripperů:

- SRT SFG (Soft Finger Gripper) – gripper, který simuluje lidský úchop. Ideální pro potraviny, křehkou elektroniku a nepravidelné tvary. Maximální nosnost v závislosti na zvoleném modelu až 10,5 kg a maximální tlak 100kPa (SOFT ROBOT TECH, 2026b)
- SRT ISC (Inner Soft Clamp) – používá se pro uchopení předmětů zevnitř (např. za hrdla lahví), čímž se chrání vnější povrch produktu. Maximální nosnost v závislosti na zvoleném modelu až 1984 g a maximální pracovní tlak 85kPa. (SOFT ROBOT TECH, 2026c)
- SRT MVG (Mini Vacuum Gripper) miniaturní vakuové chapadlo, který napodobuje kleště typu kraba. Poháněno vakuem, má malé rozměry, lehké a snadno se ovládají. Mají flexibilní úchop a regulovatelnou sílu. Maximální nosnost v závislosti na zvoleném modelu až 267 g a maximální pracovní tlak až 80kPa. (SOFT ROBOT TECH, 2026d)
- SRT NBM (Nimble Bubble Module) speciální modul navržený pro extrémně jemný dotyk a fixaci předmětů. Maximální nosnost v závislosti na zvoleném modelu až 250 g a maximální pracovní tlak až 50kPa. (SOFT ROBOT TECH, 2026e)



Obrázek 7: Soft Finger Gripper od společnosti SRT
Zdroj: SOFT ROBOT TECH (2026b)

3.4 Výrobce Rochu

Společnost Rochu se specializuje na vývoj měkkých robotických chapadel, která díky pokročilé technologii měkkým materiálům a adaptivnímu designu umožňují bezpečnou manipulaci s nepravidelnými předměty. Jejich produktové portfolio zahrnuje prstové a zobákové moduly, také poskytují inteligentní řešení pro odvětví od elektroniky po potravinářství, přičemž technologie je ověřena spoluprací se společnostmi jako Apple, Samsung či Foxconn. Díky rozsáhlé nabídce nabízí Rochu flexibilní systémy s vysokou přesností kontroly síly, které eliminují riziko poškození součástí. (ROCHU, 2026a)

3.4.1 Nabízené produkty

Společnost Rochu nabízí několik druhů o oblasti soft gripperů. Soft Robotic Gripper pro zpracování potravin (viz obr. 8), pro manipulaci látkou, pro manipulaci s elektronikou, pro manipulaci s automobilovými díly. Každý druh je speciálně navržen pro manipulaci, na kterou jsou určeny. (ROCHU, 2026b)



Obrázek 8: Soft Robotic Gripper pro manipulaci s potravinami

Zdroj: ROCHU (2026b)

3.5 Výrobce SoftGripping

Německá společnost SoftGripping, která vyvíjí a vyrábí modulární systémy měkkého uchopování, které jsou speciálně navrženy pro šetrnou manipulaci s křehkými produkty. Kombinují flexibilitu, hygienu a snadnou integraci do stávajících robotických a automatizačních zařízení. Společnost nedodává pouze komponenty, ale řeší konkrétní výrobní výzvy. Výsledkem je řešení, které spolehlivě funguje v produkčním prostředí.

3.5.1 Nabízené produkty

Portfolio SoftGripping se skládá ze dvou vzájemně doplňujících se modulárních produktových řad (viz obr. 9). Jsou to řady:

- SoftActuator je modulární stavebnice, která se přizpůsobí téměř všem koncovým nástrojům robotů. Je vhodná pro průmyslové aplikace a výrobní linky s často měnícími produkty, protože umožňují rychlé nastavení poloh prstů a jejich rozmístění.
- SoftGripper je modulární uchopovač připravený k okamžitému použití pro stabilní a produkční aplikace Pick-and-place. Je navržen pro hygienicky náročné prostředí, kde se kombinuje hygienický design s šetrnou manipulací. (SOFTGRIPPING, 2024)

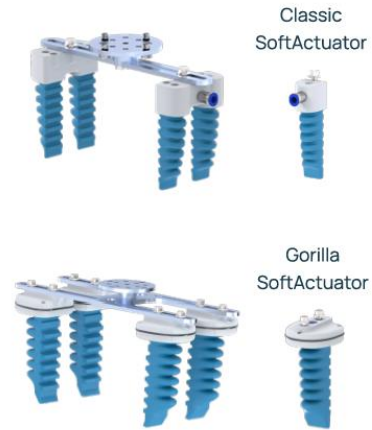
The SoftGripper

The ready-to-use gripper



The SoftActuator

The modular kit for custom EOAT

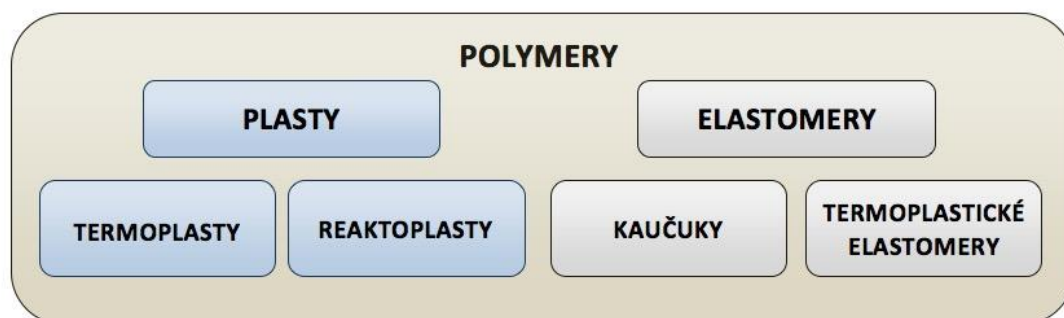


Obrázek 9: Modulární řady od výrobce SoftGripper

Zdroj: SOFTGRIPPING (2024)

4 Rozdělení polymerů

Jedno ze základních rozdělení polymerů je na elastomery a plasty viz obrázek 10.



Obrázek 10: Rozdělení polymerů

Zdroj: Běhálek (2015)

4.1 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které vlivem zahřívání měknou, přecházejí do plastického stavu a lze je tvářet. Zahřátím nad teplotu tání se materiál dostává do oblasti taveniny, zatímco zpětným ochlazením pod tuto teplotu přechází opět do stavu tuhého. Jelikož při zahřívání neprobíhá chemická reakce a nemění se chemická struktura polymeru, mají změny, kterými materiál prochází, pouze fyzikální charakter. Celý proces měknutí a tuhnutí je tedy vratný a lze jej teoreticky opakovat do nekonečna. Z hlediska struktury mohou být termoplasty amorfni i semikrystalické. Mezi typické představitele patří polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polymethylmethakrylát (PMMA) či polyoxymethylen (POM). (Běhálek, 2015)

4.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou materiály, které vykazují tavitelnost a tvarovatelnost pouze po určitou dobu po zahřátí. Následným působením tepla nebo katalyzátorů u nich dochází k chemické změně zvané vytvrzování, při níž původní molekuly zesítují. Vzniklá zesíťovaná struktura je amorfni a od tohoto okamžiku se materiál stává netavitelným a nerozpustným. Jelikož je tento proces nevratný, nelze již vytvrzený reaktoplast znovu tvarovat, svařovat ani převést do taveniny. Výsledné produkty se vyznačují tvrdostí, tuhostí a vysokou chemickou i tepelnou odolností. V nevytvrzeném stavu se tento materiál obvykle označuje jako pryskyřice; mezi typické zástupce patří fenol-formaldehydová (PF), epoxidová (EP) či polyesterová (UP) pryskyřice. (Běhálek, 2015)

4.3 Elastomery

Elastomery jsou materiály charakteristické svou nízkou tuhostí a vysokou elasticitou. I působením malé síly u nich za běžných podmínek dochází k výrazné, avšak převážně vratné deformaci, aniž by došlo k porušení materiálu. Základní surovinou jsou kaučuky, které se procesem vulkanizace (řidkým zesíťováním, obvykle sírou) transformují na pryže. Pryž je tedy vulkanizovaný elastomer s prostorovou sítí tvořenou příčnými chemickými vazbami mezi

makromolekulami. Díky této struktuře jde o amorfní polymer, který je vysoce pružný a odolává trvalé deformaci. (Běhálek, 2015)

4.4 Termoplastické elastomery

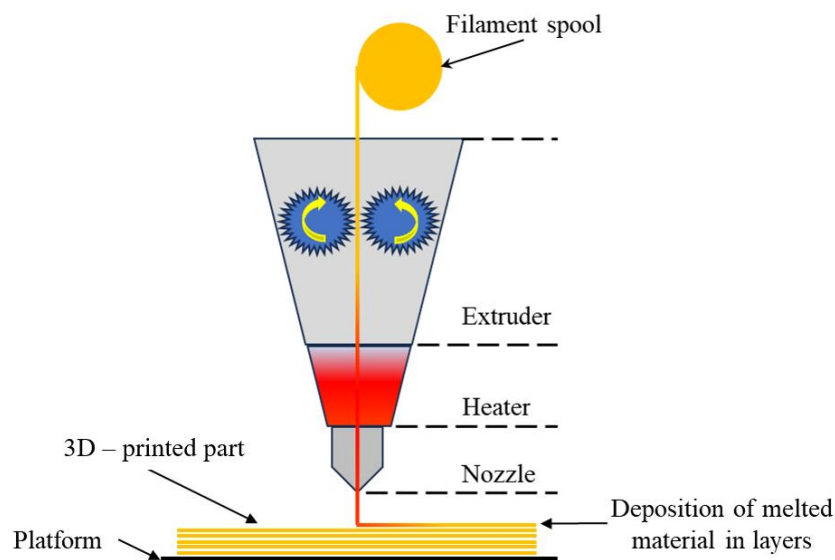
Termoplastické elastomery (TPE) jsou materiály, které svými vlastnostmi vykazují značnou podobnost s pryží. Jejich zesíťovaná struktura je tvořena kombinací měkkých segmentů (elastomery) a tvrdých segmentů (termoplasty), přičemž právě tvrdé termoplastické segmenty vytvářejí uzly sítě. Na rozdíl od pryží však TPE vlivem zvyšování teploty přecházejí do tekutého stavu, což umožňuje jejich zpracování technologiemi běžnými pro termoplasty. Hlavní rozdíl mezi těmito materiály spočívá v charakteru uzlů sítě. Zatímco u pryží (po vulkanizaci kaučuku) jsou uzly chemické povahy, u TPE mají povahu fyzikální a jsou obvykle tvořeny určitým množstvím nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. Ačkoliv TPE nedosahují takových elastických vlastností jako pryže, jejich výhodou je možnost opětovného zpracování a možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty. (Běhálek, 2015)

5 Přehled aditivních technologií pro výrobu elastických dílů

Aditivní výrobní technologie prošly od svého vzniku v 80. letech 20. století zásadní evolucí. Původně byly v průmyslovém sektoru využívány primárně pro účely rychlého prototypování (*Rapid Prototyping*), avšak současné trendy směřují k jejich přímému nasazení ve finální výrobě. V kontextu měkké robotiky představuje 3D tisk klíčový nástroj, který umožňuje realizaci geometricky komplexních struktur, jež jsou tradičními metodami obrábění či odlévání jen obtížně vyrobitelné. Následující kapitoly předkládají systematický přehled metod aditivní výroby a analýzu materiálů využívaných v těchto procesech. Práce se specificky zaměřuje na technologie zpracovávající polymery a organické sloučeniny, které představují klíčové substráty pro vývoj měkkých robotických struktur. (Xin a kol., 2023)

5.1 Technologie FDM

Výroba taveným vláknem patří mezi nejrozšířenější metody aditivní výroby založené na zpracování polymerních materiálů. Tato technologie se běžně využívá k výrobě různých typů součástí, a to jak ve fázi prototypování, tak i pro tvorbu funkčních dílů určených k finálnímu použití. Základním vstupním materiálem jsou termoplastická vlákna (filament), která slouží jako extruzní médium. Princip metody (viz obr. 11) spočívá v postupném zahřívání vlákna až do roztaveného stavu, načež je materiál pomocí válců otáčejících se v opačných směrech vytlačován skrz trysku tiskárny. Tisková hlava se pohybuje ve třech stupních volnosti a ukládá roztavený polymer na tiskovou podložku. Tímto způsobem dochází k postupnému vytváření dílu po jednotlivých vrstvách, přičemž přesná trajektorie pohybu a ukládání materiálu je řízena souřadnicemi a instrukcemi obsaženými v souboru vytvořeném ve sliceru. (Pelín a Ficaí, 2023)



Obrázek 11: princip metody FDM

zdroj: Pelín a Ficaí (2023)

Obecně platí, že technologie FDM na spotřebitelské úrovni poskytuje ve srovnání s jinými metodami 3D tisku plastů nižší rozlišení a přesnost, přičemž tyto dvě charakteristiky jsou výrazně ovlivněny vlastnostmi použitého termoplastického filamentu a výsledné komponenty obvykle vyžadují dodatečné povrchové úpravy, jako je chemické nebo mechanické leštění. Během nanášení jednotlivých vrstev je navíc běžným problémem vznik kavit mezi nimi, což u součástí způsobuje vysokou uzavřenou pórovitost a negativně ovlivňuje jejich schopnost odolávat mechanickému zatížení. Z toho důvodu není tato technika při využití běžně dostupného vybavení vhodná pro komplexní designy nebo vysoce detailní prvky, avšak představuje velmi atraktivní alternativu pro hobby segment, kutilskou sféru a základní laboratorní výzkum, kde slouží studentům, vědeckým pracovníkům, inženýrům i technikům. Při nasazení této technologie v průmyslovém měřítku sice dostupná zařízení nabízejí řešení zmíněných nedostatků a umožňují zpracování širší škály termoplastů i kompozitních materiálů, ale pořizovací cena plně odpovídá těmto rozšířeným funkcím a vlastnostem. (Pelín a Fica, 2023)



Obrázek 13: FDM 3D tiskárna Original Prusa MK4S
Zdroj: PRUSA RESEARCH a.s.(2026)

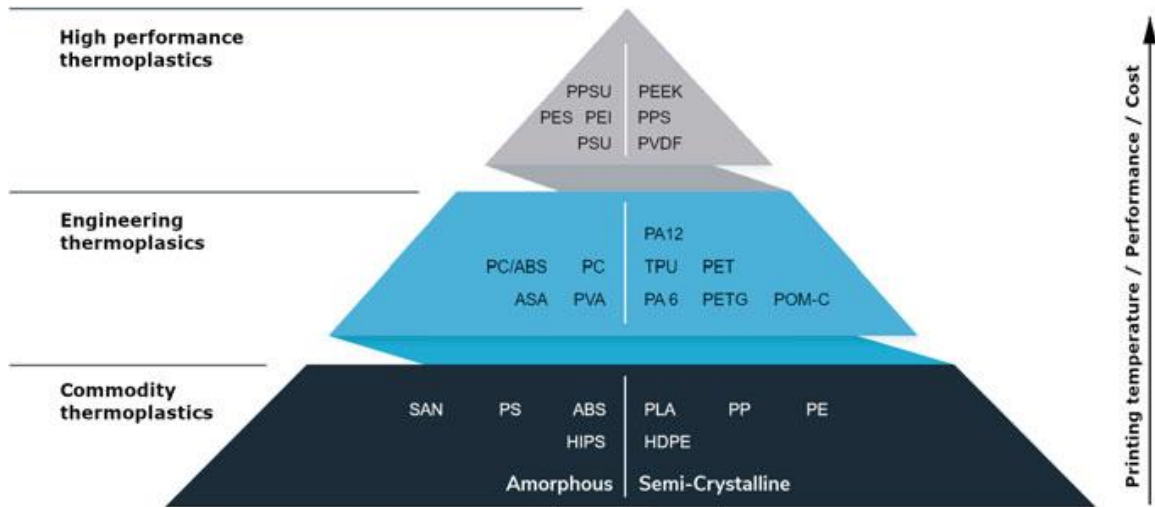


Obrázek 12: filament PLA pro FDM tisk
Zdroj: Aurapol (2026)

5.1.1 Materiály pro tisk metodou FDM

Vstupním materiálem pro FDM je pevná tisková struna (filament, viz obr. 13), obvykle vyrobená z termoplastu. Filament se vyznačuje značnou délkou v poměru ke svému stálému průřezu. Nejčastěji dostupné průměry filamentů jsou 1,75 mm a 2,85 mm. Na výběr je z široké škály materiálů a na trhu 3D tisku se pravidelně objevují materiály zcela nové. Vstupní materiály jsou k dispozici ze všech kategorií pyramid termoplastů, včetně běžných, konstrukčních a vysoce výkonných termoplastů, jak ukazuje obrázek 14. Jelikož materiál přímo ovlivňuje fyzikální vlastnosti a chování výtisku během tisku, je důležité zvážit výběr materiálu ještě před zahájením CAD modelování. Filamenty pro FDM tiskárny jsou k dispozici v různých variantách polymerních materiálů i kompozitů na bázi polymerů, které obsahují vláknové nebo částicové vyztužení. S termoplastem lze za účelem výroby filamentu smíchat celou řadu vyztužujících přísad,

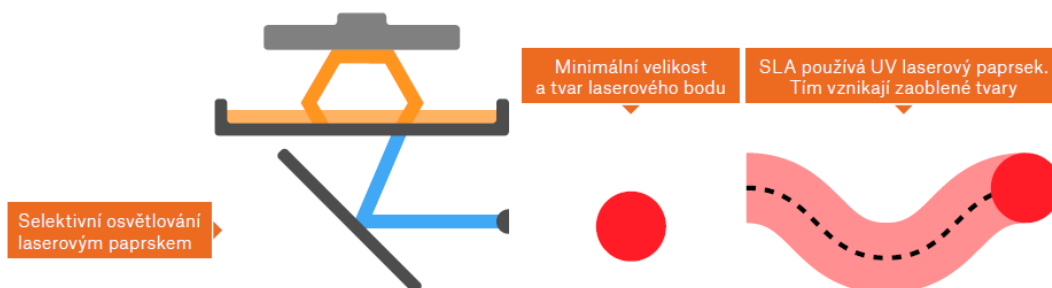
například uhlíková vlákna, skelná vlákna, kevlar, dřevo, kovový prášek atd. Různé podobné technologie rovněž umožňují vyztužení pomocí spojitých vláken. (Dave a Davim, 2021)



Obrázek 14: materiály pro FDM
zdroj: Dave a Davim (2021)

5.2 Technologie SLA

Proces stereolitografie (viz obr. 15) spočívá v selektivním vytvrzování fotocitlivých pryskyřic působením ultrafialového (UV) záření. Základní konfigurace systému zahrnuje nádobu s fotocitlivým polymerem, pohyblivou stavební platformu a zdroj laserového záření. Směrování paprsku je v současnosti nejčastěji realizováno pomocí systému dynamických zrcadel. Řídicí systém na základě dat z modelu rozřezaného na vrstvy ovládá zrcadla, která navádějí laserový paprsek po povrchu polymeru. Tím dochází k polymeraci. Po vytvrzení jedné vrstvy se stavební platforma posune směrem dolů do nádoby s polymerem, čímž se vytvoří prostor pro nanesení nového tenkého filmu materiálu, ze kterého bude formována následující vrstva. (Bártolo, 2011)



Obrázek 15: metoda SLA
zdroj: Střítěský a kol. (2019)

Z hlediska mechanických vlastností výsledných produktů je zásadním specifickým technologií SLA izotropie tištěných dílů. Na rozdíl od technologie FDM, kde často vznikají anizotropní struktury s

oslabenou pevností v ose Z v důsledku nedokonalé fúze vrstev, SLA vytváří homogenní materiál. Přestože je tisk realizován po vrstvách, polymerační reakce není po dokončení jedné vrstvy zcela ukončena. Na povrchu zůstávají nevytvrzené monomery, které chemicky reagují s následující vrstvou, čímž vznikají kovalentní vazby napříč celým objemem modelu. Výsledkem je struktura s konzistentními mechanickými vlastnostmi ve všech třech osách. Vysoká přesnost tisku a kvalita povrchu jsou u SLA definovány parametry optického systému, nikoliv mechanickou tryskou jako u extruzních metod. Minimální velikost prvku v rovině XY je závislá na průměru laserového paprsku, což umožňuje reprodukci vysoce detailních geometrií s ostrými hranami a hladkým povrchem bez viditelného vrstvení. Díky těmto vlastnostem a širokému spektru dostupných fotopolymerů, od standardních přes konstrukční materiály simulující termoplasty (ABS, PP) až po biokompatibilní dentální pryskyřice – nachází SLA uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Pro dosažení finálních vlastností materiálu je však u technologie SLA nezbytné specifické následné zpracování. Po dokončení tisku musí být model nejprve zbaven zbytků nevytvrzené pryskyřice v lázni s rozpouštědlem, obvykle isopropylalkoholem. Následně probíhá proces dotvrzování v UV komoře, kde je model vystaven kombinaci intenzivního světla a tepla. Tento krok je kritický pro dokončení polymerace, stabilizaci chemických vazeb a dosažení maximální pevnosti i tepelné odolnosti materiálu. (Formlabs, b.r.)

5.3 Technologie DLP a LCD

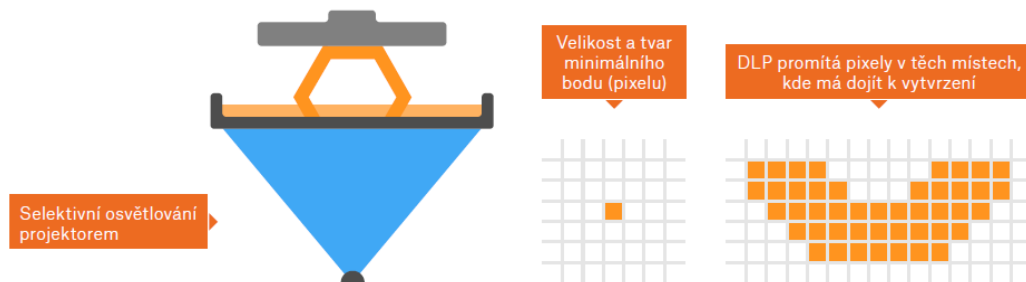
V rámci aditivní výroby spadají technologie digitálního zpracování světla (DLP – Digital Light Processing) a maskované stereolitografie (LCD/MSLA) do kategorie fotopolymerace v lázni definované normou ISO/ASTM 52900. Na rozdíl od bodové stereolitografie (SLA), která využívá laserový paprsek k vykreslování vrstvy po jednotlivých vektorech, technologie DLP a LCD exponují celou vrstvu současně. Tento přístup výrazně zkracuje dobu tisku, která se stává nezávislou na počtu tištěných objektů a je ovlivněna pouze výškou modelu v ose Z. (Gibson a kol., 2021)



Obrázek 16: DLP tiskárna
zdroj: Phrozen (2026)

5.3.1 Technologie DLP

Technologie DLP (viz obr. 17) využívá k vytvrzování fotocitlivé pryskyřice digitální projektor. Jádrem systému je čip DMD (Digital Micromirror Device), který obsahuje miliony mikroskopických zrcadel. Tato zrcadla se mechanicky naklápějí, čímž směřují světlo buď do optiky tiskárny (vytvrzení pixelu), nebo do pohlcovače tepla (tmavý pixel). Výhodou DLP je vysoká intenzita světelného toku a dlouhá životnost projektoru. Protože je obraz tvořen čtvercovou mřížkou pixelů, může na šikmých plochách docházet k jevu zvanému „aliasing“ (schodovitost). Moderní DLP tiskárny však využívají algoritmy anti-aliasingu (vyhlazování hran pomocí stupňů šedi), které tento jev efektivně potlačují a umožňují dosahovat povrchů srovnatelných s laserovou SLA. (Pagac a kol., 2021)



Obrázek 17: metoda DLP

zdroj: Stříteský a kol. (2019, s. 17)

5.3.2 Technologie LCD

Technologie LCD, často označovaná také jako MSLA (Masked Stereolithography), představuje novější a nákladově efektivnější variantu plošné expozice. Zdroj UV světla (pole LED diod) je zde umístěn pod LCD displejem, který funguje jako maska. Tekuté krystaly v displeji se stávají průhlednými nebo neprůhlednými podle požadovaného tvaru vrstvy, čímž propouštějí světlo pouze do míst, kde má dojít k polymeraci. (Quan a kol., 2020)

Zásadním parametrem kvality tisku u této technologie je rozlišení LCD panelu (označované jako 4K, 8K atd.) a velikost jednotlivých pixelů, která se dnes pohybuje v řádu desítek mikrometrů. Oproti DLP, kde je rozlišení limitováno projektorem a optikou, umožňuje LCD technologie snazší škálování stavebního prostoru při zachování vysokého rozlišení. (Pagac a kol., 2021)

5.3.3 Materiály pro tisk metodou SLA, DLP a LCD

Materiály pro technologie využívající vytvrzování světlem (SLA, DLP, LCD) se obecně nazývají fotopolymery. Rozdíl od běžných plastů používaných při FDM tisku (jako jsou cívky strun), jsou tyto materiály v tekutém stavu. Jejich klíčovou vlastností je schopnost ztuhnout do pevného tvaru v řádu sekund, jakmile jsou vystaveny UV záření. Díky tomu, že materiál vzniká z kapaliny, mají výsledné modely velmi hladký povrch a dokážou vykreslit i extrémně jemné detaily, které by jiné technologie nezvládly. (Redwood a kol., 2017)

Tyto pryskyřice můžeme rozdělit do několika kategorií, podle užitečných vlastností. Základní "standardní" pryskyřice jsou ideální pro vizuální modely, ale jsou poměrně křehké a náchylné k

prasknutí při pádu. Pro funkční díly se proto používají inženýrské pryskyřice (Engineering Resins). Ty jsou chemicky upraveny tak, aby napodobovaly vlastnosti známých plastů – mohou být vysoce odolné (typ Tough), pružné jako guma (typ Flexible) nebo odolné vůči vysokým teplotám (typ High Temp), což umožňuje jejich využití i při testování funkčních prototypů. (Ngo a kol., 2018)

Další sada zahrnuje materiály používané pro specifické aplikace, zejména ve stomatologii a šperkařství. Pro tyto účely existují odlévací pryskyřice (Castable resins), které se používají k výrobě modelů pro lití kovů a po vypálení v peci nezanechávají žádný popel. Biokompatibilní materiály se používají v medicíně a mohou mít krátkodobý nebo dlouhodobý kontakt s lidskou tkání (např. při výrobě chirurgických šablon nebo dočasných zubních protéz). (Redwood a kol., 2017)

6 Mechanické testování polymerů

Základní mechanické vlastnosti materiálů lze rozdělit do čtyř hlavních skupin: pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. V praxi a v materiálových listech se uvádí mnohem širší spektrum mechanických charakteristik, které poskytují důležité informace pro správné využití. Mechanické charakteristiky nejsou konstantou, ale jsou to veličiny, které závisí na vnějších faktorech jako jsou například podmínky zkoušky, tvaru zkušebních těles, způsob přípravy apod. Mechanické charakteristiky jsou získávány experimentálně na normalizovaných zkušebních tělesech za předepsaných podmínek. Zkušební tělesa se vyrábějí předepsanými postupy z výchozího prášku či granulátu, nejčastěji vstřikováním, lisováním nebo odléváním. Ve specifických případech je možné testování provádět i na vzorcích, které jsou mechanicky obrobena přímo z hotových výrobků nebo polotovarů. (Běhálek, 2015)

Při působení vnějšího napětí dochází u zkušebních těles k jejich deformaci, kterou lze rozdělit na 2 druhy deformace. Elastickou (pružnou) deformaci, kdy se těleso vrátí do původního stavu nebo na plastickou (trvalou) deformaci, kdy se tvar tělesa po odstranění působící síly nevrátí do původního stavu. V reálných aplikacích se oba druhy deformace objevují současně. U polymerních materiálů je deformační chování komplexnější, což vyplývá z jejich makromolekulární struktury. Odezva polymerů na vnější zatížení v sobě zahrnuje kromě elastické a plastické deformace, také deformaci viskoelastickou (zpožděně elastickou). Tato skutečnost se projevuje při dlouhém statické zatížení. Pokud je zkušební těleso vystaveno působení konstantní síly, jeho celková deformace s časem narůstá, přičemž rychlost deformace s časem klesá. Dochází k tzv. tečení (creep). Celková deformace polymerů je časově závislá. Z uvedeného vyplývá, že zatímco při krátkodobém či dynamickém zatížení vykazuje polymer charakter poměrně tuhého materiálu, při dlouhodobém statickém napětí nabývá jeho poddajnost a materiál se chová jako tvárný. (Běhálek, 2015)

6.1 Zkouška tahem

Nezákladnější mechanické charakteristiky jsou tahové charakteristiky. Při jednoosém namáhání zkušebního tělesa v tahu je výstupem tahový diagram (viz. Obr. 11), který popisuje závislost poměrného prodloužení na normálovém napětí. Deformační křivka v tahovém diagramu poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu, tato závislost je určována experimentálně. Zkouška probíhá na zkušebním stroji, kdy je zkušební těleso umístěno do čelistí. Dochází k zaznamenávání působící síly (F), resp. napětí na poměrném prodloužení zkušebního tělesa, případně na jmenovitém poměrném prodloužení. Pro výpočty slouží rovnice: pro smluvní napětí (σ) rovnice (1), pro poměrné prodloužení (ε) rovnice (2), pro jmenovité poměrné prodloužení rovnice (3). (Běhálek, 2015)

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} * 100 [\%] \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{L_t}{L} * 100 [\%] \quad (3)$$

kde:

F je velikost působící síly [N]

S_0 je původní průřez zkušební tělesa [mm²]

L_0 je počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm]

ΔL_0 je zvětšení počáteční měřené délky [mm]

L je upínací vzdálenost mezi čelistmi [mm]

L_t je zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi [mm]

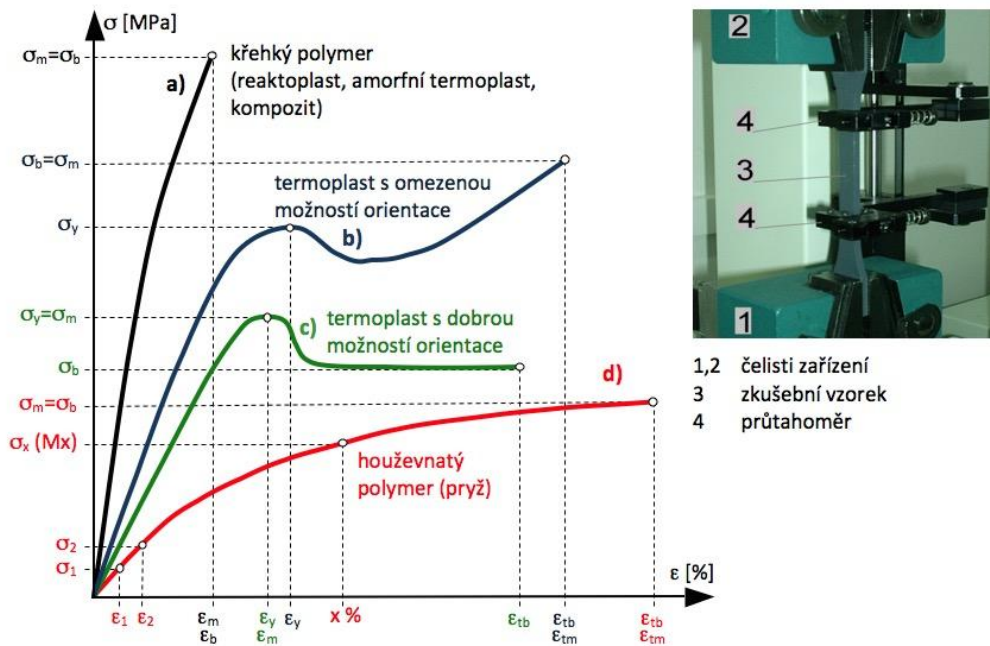
Rozměry a geometrie zkušebních těles jsou definovány normou pro konkrétní materiál. V praxi se nejčastěji pro tahové zkoušky uplatňují normalizovaná tělesa ve tvaru oboustranných lopatek. Tento tvar zajišťuje spolehlivé upnutí v čelistech trhacího stroje a primárně zaručuje, že se tahové napětí koncentruje výhradně do zúžené části vzorku (viz obr. 12). Při testování elastomerních materiálů se alternativně využívají zkušební tělesa v podobě tvaru kroužků, zatímco pro hodnocení mechanických vlastností folií a desek jsou preferována tělesa ve formě pásků. Analýzou získané deformační křivky se následně vyhodnocují pevnostní charakteristiky materiálu jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení. Značení těchto charakteristik, které jsou použité v textu jsou plasty. Pro elastomery se používají jiná značení, ale význam charakteristik je totožný. (Běhálek, 2015)

Mez pevnosti v tahu (σ_m) je maximální tahové napětí dosažené při nejvyšší zaznamenané zatěžující síle F_{max} během tahové zkoušky. Výpočet tohoto parametru je stanovena na základě rovnice (4). Mez pevnosti u polymerů se nemusí nutně shodovat s hodnotou napětí v okamžiku samotného porušení zkušební tělesa (viz Obr 18). Za standardních laboratorních podmínek se hodnoty meze pevnosti pohybují v intervalu od 15 MPa do 100 MPa, u vyztužených plastů až do 170 MPa. U běžných elastomerů je rozmezí hodnot od 7 MPa do 28 MPa. (Běhálek, 2015)

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Napětí na mezi kluzu (σ_y) je napětí, které definuje kritickou hranici, při které dochází v materiálu k iniciaci a rozvoji plastické deformace. Během tahové zkoušky je tento jev charakteristický vznikem krčku, tedy lokálnímu zúžení průřezu zkušební tělesa, které se s pokračující deformací a narůstajícím napětím postupně rozšiřuje. Specifické chování vykazují semikrystalické polymery, kde je napětí na mezi kluzu shodné s mezí pevností (viz Obr. 18, křivka c). (Běhálek, 2015)

Napětí při přetržení (σ_b) je napětí, kdy dojde k přetržení. U polymerů vykazující křehké lomové chování může být shodné s napětím na mezi pevnosti (viz Obr. 18, křivka a). (Běhálek, 2015)



Obrázek 18: Deformační křivky polymerů v tahu a detail uchycení zkušební tělesa
zdroj: Běhálek (2015)

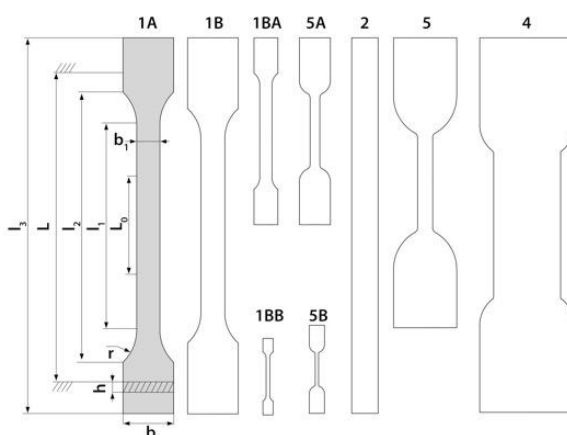
Další klíčovým parametrem popisující tuhost materiálu je modul pružnosti E . Platí zde přímá úměra, čím vyšší je hodnota modulu pružnosti, tím větší je tuhost materiálu. Tato charakteristika se z tahového diagramu vyhodnocuje v počáteční fázi zatěžování, kde se projevuje lineární závislost normálového napětí (σ) na poměrném prodloužení (ϵ). V tomto úseku deformační křivky se materiál řídí Hookovým zákonem (viz Rovnice 5), jenž definuje přímou úměru mezi deformací a napětím. Tento stav popisuje elastickou deformaci vyvolanou malými silami, která po odlehčení vzorku zmizí. Bod, ve kterém končí oblast hookovského chování, se označuje jako mez úměrnosti. Při dalším nárůstu zatížení se vedle pružné složky začíná uplatňovat i složka plastická, což se graficky projevuje zakřivením tahové křivky. Mezním bodem, do kterého je deformace ještě plně vratná, je mez pružnosti. Její překročení vede k tomu, že i při nepatrném zvýšení napětí dochází k výrazné plastické deformaci a nastává tzv. mez kluzu. Pokud za tímto bodem napětí poklesne, hovoříme o horní mez kluzu, zatímco následné minimum na křivce představuje dolní mez kluzu. (Běhálek, 2015)

$$\sigma = E * \epsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

Výpočet modulu pružnosti lze formálně odvodit příslušnou úpravou Hookova zákona (viz rovnice 6). V grafické reprezentaci tahového diagramu odpovídá tato charakteristika směrnici počáteční lineární části deformační křivky, respektive tangente úhlu α (viz Obr. 20). Specifikem polymerních materiálů je ovšem jejich viskoelastická povaha, která zapříčiňuje nelineární průběh deformační křivky již v samotném počátku zatěžování. Tento efekt se obzvláště výrazně projevuje u skupiny houževnatých polymerů. Z tohoto důvodu je určení směrnice metodicky ztíženo, a proto se stanovení modulu pružnosti v tahu (E_t) u plastů standardně provádí

dvoubodovou metodou. Výpočet (viz rovnice 7) tak vychází ze dvou hodnot normálového napětí (σ_1 a σ_2), jež jsou na deformační křivce odečteny při přesně definovaných hladinách poměrného prodloužení $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ a $\varepsilon_2 = 0,25 \%$ (viz rovnice 7). Takto definovaná materiálová charakteristika je nejčastěji označována jako sečný modul pružnosti. Elastomery se nechovají od počátku lineárně, proto je stanovení modulu pružnosti obtížné. Zkoušený vzorek se protáhne na smluvní hodnotu, například o 100 % a odečte se smluvní napětí, které se následně označuje jako modul protažení (gumárenský modul): M100, charakterizuje tuhost elastomeru v počátečních fázích deformace. Má jiný význam než modul pružnosti stanovený u plastů. (Běhálek, 2015)

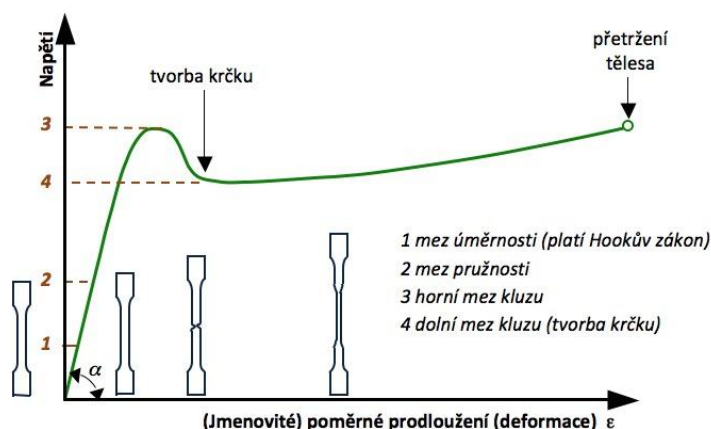
$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (7)$$



Obrázek 19: Tvary zkušebních těles

Zdroj: Běhálek (2015)

Z deformačních křivek lze stanovit další mechanické charakteristiky (viz obr. 20), jsou to poměrné prodloužení na mezi kluzu (ε_y), poměrné prodloužení na mezi pevnosti (ε_m) a poměrné prodloužení při přetržení (ε_b), které vyjadřuje celkovou tažnost polymeru. Z analýzy deformačního chování lze určit další materiálovou charakteristiku, kterou je Poissonův poměr (μ), ten vyjadřuje poměr příčného zúžení k podélnému protažení při deformaci. (Běhálek, 2015)



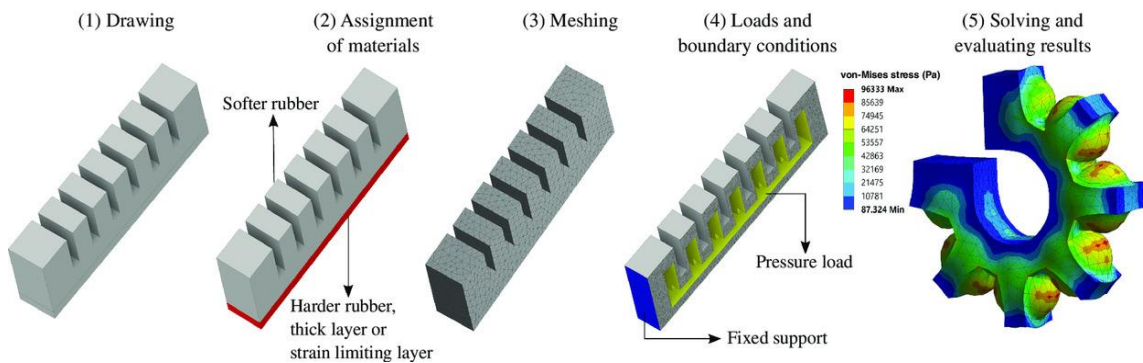
Obrázek 20: Deformační křivka pro semikrystalické termoplasty

Zdroj: Běhálek (2015)

7 Analýza metodou konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP, v anglické literatuře FEM) je v současnosti nejefektivnější a nejvyužívanější nástroj pro řešení problémů s aktuátory, které jsou vyráběny z vysoce flexibilních materiálů. Zásadním problémem při návrhu je silná materiálová nelinearita (hyperelastická) v kombinaci s komplexní vnitřní geometrií. Metoda MKP umožňuje numericky aproximovat a predikovat deformaci a pnutí před jejich samotnou výrobou. Poskytuje tak nezbytný rámec pro optimalizaci designu (např. tloušťky stěn nebo tvar komor) s cílem maximalizovat požadovaný úhel ohybu nebo sílu úchopu. (Xavier a kol., 2021)

Nejrozšířenější software pro MKP analýzu jsou Abaqus, Ansys a COMSOL. Všechny 3 softwarové balíky nabízejí funkce pro kreslení, ale modely lze importovat z jiných 3D programů. Při kreslení geometrie aktuátoru je dobré se vyhnout malým prvkům, které vyžadují jemnou síť pro zajištění adekvátní konvergence. Postup MKP pro měkké aktuátory se skládá z 5 kroků (viz obr. 21). Nejprve nakreslení 3D modelu (obr. 21.1), další krok je přiřazení materiálových vlastností (obr. 21.2). Třetí krok je vytvoření sítě (obr. 21.3), další krok je vytvoření okrajových podmínek a zatížení (obr. 21.4). Poslední krok je analýza výsledků (obr. 21.5). (Xavier a kol., 2021)



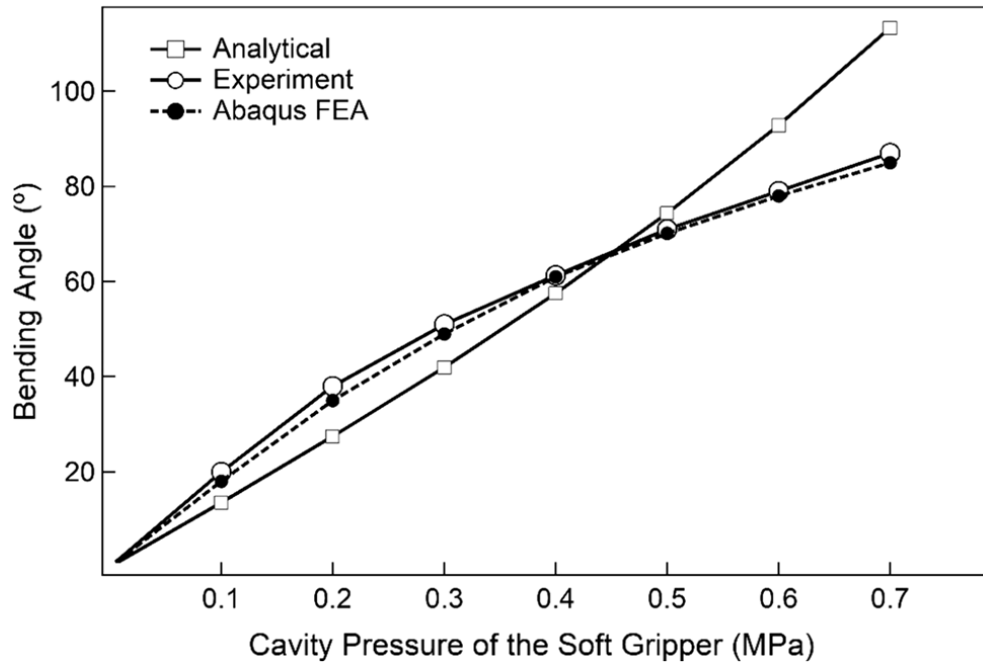
Obrázek 21: Přehled postupu MKP analýzy pro měkké aktuátory

zdroj: Xavier a kol. (2021)

Po dokončení fáze návrhu a následné optimalizaci geometrických parametrů i materiálových vlastností lze přistoupit k fyzické výrobě modelu za účelem experimentální ověření výsledků. Výroba požadovaného tvaru je realizována buď metodou přímého 3D tisku modelu nebo nepřímou cestou prostřednictvím 3D tisku odlévacích forem. Následné experimentální ověření měkkých fluidních aktuátorů se provádí za využití vhodného zdroje tlaku, kterým mohou být systémy se stlačeným vzduchem, laboratorní injekční pumpy, hydraulické pohonné válce nebo případně manuálně ovládané injekční stříkačky. Pro vyhodnocení kinematické odezvy aktuátoru – konkrétně míry jeho ohybu, prodloužení či zkroucení – se využívá post procesní analýza pořízených videozáznamů nebo přímé snímání pomocí pohybových senzorů. Získaná kinematická data jsou následně přiřazena k odpovídajícím hodnotám vstupního tlaku. Takto sestavené experimentální závislosti slouží k finálnímu porovnání s výsledky získanými z numerických simulací. (Xavier a kol., 2021)

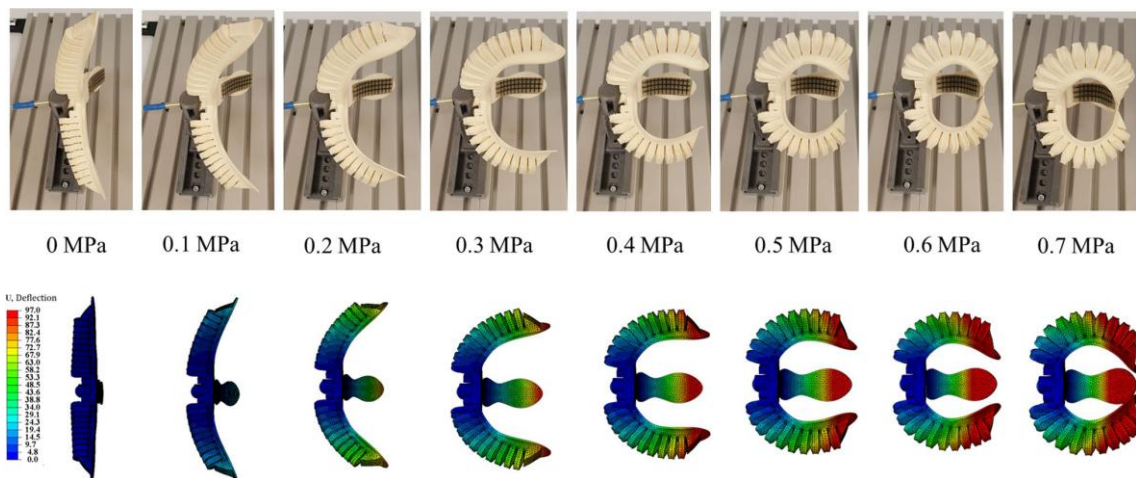
7.1 Porovnání výsledků simulace

Změny úhlu ohybu v závislosti na tlaku získané z experimentálních, numerických a simulací metodou konečných prvků jsou znázorněny na obrázku 22. Z obrázku 22 je patrné, že jak numerické výpočty i analýza konečných prvků (FEA) dokážou zachytit deformaci prstu při zvyšování vnitřního tlaku. (Dilibal a kol.,2021)



Obrázek 22: Porovnání výsledků úhlu ohybu aktuátoru v závislosti na tlaku
Zdroj: Dilibal a kol. (2021)

Reálné ohybové deformace, které vznikají při tlacích v rozmezí 0-0,7 MPa jsou vyobrazeny na obrázku 23 a to jak pro experimentální výsledky, tak pro výsledky FEA. Přímé srovnání FEA výsledků a experimentálního ověření jsou při stejném tlaku podobné. (Dilibal a kol.,2021)



Obrázek 23: Porovnání FEA a výsledků experimentálního ověření měkkého chapadla
Zdroj: Dilibal a kol. (2021)

8 Praktická část

Praktická část této diplomové práce navazuje na poznatky získané v teoretické části. Cílem v praktické části je kompletní vývoj, výroba a otestování soft pneumatického gripperu. Hlavní výzvou je využití 3D tisku pro zpracování elastomerních materiálů. Postup práce je rozdělen do několika částí. Před samotným tiskem finálního tisku je pozornost věnována zjištění mechanických vlastností použitých materiálů pomocí mechanický zkoušek. Získaná experimentální data jsou následně importovaná do softwaru pro analýzu pomocí MKP. Tato simulace slouží k předpovídání chování soft pneumatického gripperu. Optimalizace modelu pomocí MKP tak umožňuje minimalizovat počet výrobních prototypů.

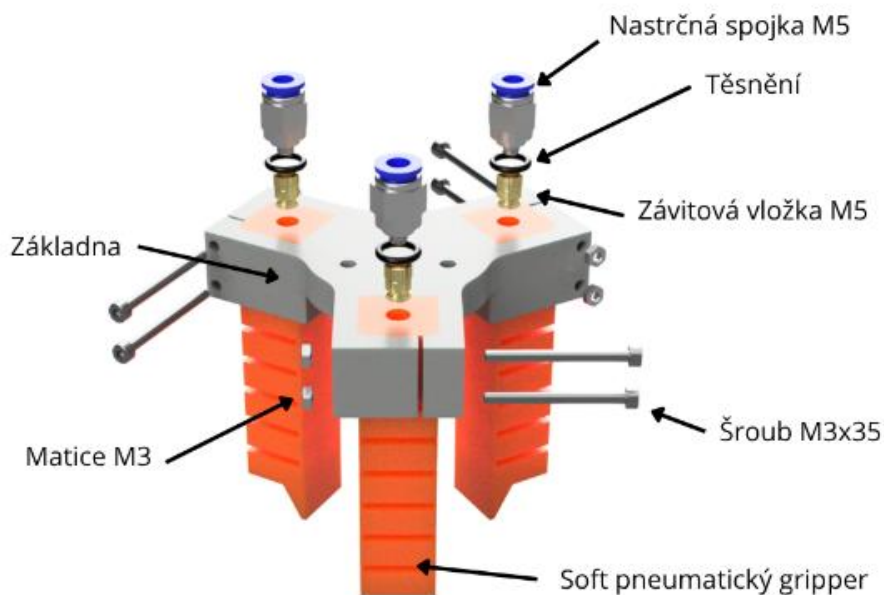
Po úspěšném odladění modelu pokračuje práce výrobou samotného gripperu pomocí technologie 3D tisku. Vyrobené prototypy budou následně zapojeny do pneumatického obvodu a podrobeny testování, při kterém se bude sledovat vliv vstupního tlaku na ohyb gripperu. Závěr praktické části je vyhodnocení a posouzení reálné využitelnosti vyrobeného gripperu.

8.1 Návrh gripperu

Stěžejní prací bylo navrhnout konstrukční řešení gripperu. Tomuto kroku předcházela literární rešerše, jejímž cílem bylo zhodnocení stávajících konstrukcí soft pneumatických gripperů. V rámci analýzy byly porovnávány různé tvary a použité materiály. Hlavním zaměřen bylo vytvořit řešení, které splňuje požadavky na funkčnost, spolehlivost a vyrobiteľnosť pomocí 3D tisku. Výsledkem procesu je geometrie modelu, který je efektivní a snadno vyrobiteľný.

8.1.1 Popis sestavy

Uspořádání celé sestavy je na zachyceno na obrázcích níže (viz obr. 24 a obr. 25). Předložený obrázek představuje rozložení 3D CAD model sestavy se třemi soft pneumatickými gripperu. Obr. 24 ukazuje uspořádání všech klíčových konstrukčních a spojovacích prvků, které jsou nezbytné pro spolehlivost a funkčnost celého mechanismu. Základem celé sestavy je středová základna, která plní funkci nosného rámu. Pro zajištění funkčnosti a spolehlivosti je každý gripper vybaven samostatným přívodem vzduchu. Přívod vzduchu je realizován pomocí nástrčné spojky a závitové vložky, která je zalisována do těla gripperu. Bezpečné a pevné spojení gripperu se základnou je realizováno šrouby M3x35 a maticemi M3.

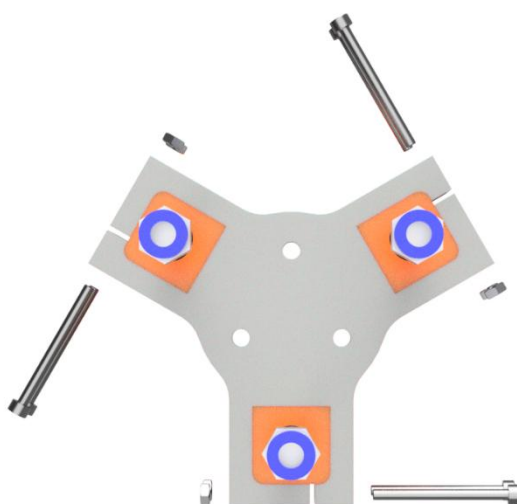


Obrázek 24: Rozložení sestavy gripperu

Zdroj: vlastní zpracování

8.1.2 Základna

Základna byla navržena pro výrobu za pomoci technologie 3D tisku metodou FDM. Materiál pro tento díl byl zvolen PLA. PLA bylo upřednostněno pro výbornou tisknutelnost a rozměrovou přesnost během tisku. Základna je konstruovaná jako jeden díl ve tvaru trojramenné hvězdice (viz Obr. 25). Na konci každého ramene je vytvořeno uložení s drážkou pro soft gripper. Drážka slouží jako svěrná čelist, za pomoci dvojice šroubů M3x35 a matic dojde ke sevření drážky a pevnému upnutí gripperu bez nutnosti použít dalších přidavných držáků.



Obrázek 25: Pohled shora na základnu

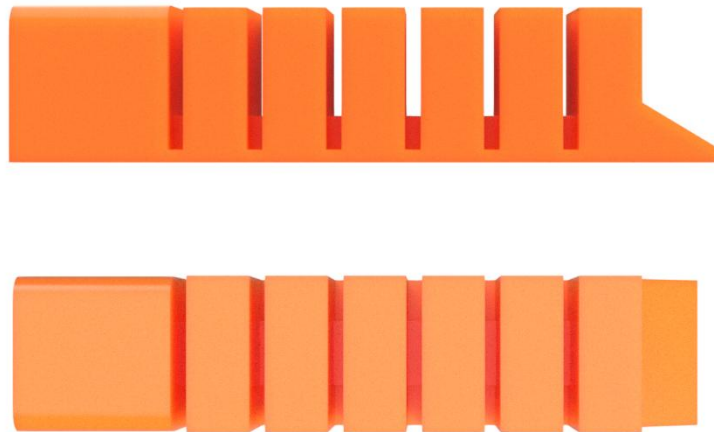
Zdroj: vlastní zpracování

8.1.3 Soft pneumatický gripper

Soft pneumatický gripper byl navržen pro výrobu metodou FDM z flexibilního materiálu. Konstrukce využívá principu vzduchových komor k převedení tlaku vzduchu na cílený ohyb.

Mechanismus ohybu a geometrie

Na pohledu ze strany (viz obr. 26) je vidět geometrie gripperu. Konstrukce je rozdělena na dvě části. Jedna část slouží k pevnému uchycení k základně gripperu a na druhá část je aktivní ohybovou částí. Tato aktivní část je tvořena několika žebry s mezerami a na konci je zkosení pro zpevnění konce.



Obrázek 26: Finální model gripperu (pohled ze strany a shora)

Zdroj: vlastní zpracování

Princip ohybu vychází k různé tuhosti stěn. Spodní kontaktní vrstva materiálu je souvislá a klade větší odpor proti protažení. Horní žebrovaná část navržena tak, že při vhnání stlačeného vzduchu do vnitřních komor dochází k rozpínání tenkých stěn žeber. Dochází k tomu, že se horní část ohýbá a spodní nikoliv, tím vzniká ohybový moment. Tento mechanismus vede ke zkroucení gripperu, což umožňuje šetrné obejmutí objektů.

Optimalizace pro FDM tisk bez podpěr

Zásadním konstrukčním požadavkem pro 3D tisk metodou FDM byl návrh vnitřních vzduchových komor bez použití podpěr, které by z vnitřních komor nebylo možné odstranit. Tvar vnitřních komor byl zvolen v trojúhelníkovém tvaru se zaoblením nahoře. Tvar byl vytvořen tak aby nedocházelo k velkému přemostění při tisku, velké přemostění by mohlo zapříčinit špatnou vzduchotěsnost.

Vývoj tloušťky stěn a vzduchotěsnost

Během návrhu CAD modelu a testování prvních prototypů prošlo zásadním vývojem tloušťka stěn vzduchových komor gripperu. Původní návrh počítal s tloušťkou stěn 0,8mm, což mělo zajistit velkou flexibilitu gripperu při nízkých tlacích. Tloušťka také odpovídala 2 perimetrům při tisku tryskou 0,4. Experimentální testování vytištěných vzorků odhalilo velké riziko z hlediska vzduchotěsnosti. Stlačený vzduch unikal mikroskopickými mezerami mezi jednotlivými vrstvami. Z tohoto důvodu byl model přepracován a tloušťka obvodových stěn se zvětšila na minimálně 1,6mm. Tato hodnota byla zvolena vzhledem na parametry 3D tisku, tloušťka 1,6mm odpovídá

tak odpovídá 4 tiskovým perimetrům při použití trysky 0,4. Tato tloušťka stěn již zajistila lepší vzduchotěsnost vytištěného prstu a stále dostatečnou flexibilitu pro bezproblémový úchop.

Upínací část

Upínací část byla vytvořena dostatečně tuhá, aby při sevření nedošlo k poškození vzduchových kanálků a závitové vložky. Uprostřed upínací části je vytvořena menší díra pro zalisování závitové vložky. Tato část byla vytisknuta jako plný materiál se 100% výplní.

8.1.4 Výroba gripperu na 3D tiskárně

Pro samostatnou výrobu byla použita tiskárna Bambu Lab P1S s úpravou pro přímé podávání filamentu přímo do extruderu (viz obr. 27). Úprava byla nezbytná pro tisk měkkých materiálů, jinak dochází k pružení materiálu v bowden systému, který tiskárna Bambu Lab P1S používá.



Obrázek 27: 3D tiskárna Bambu Lab P1S s úpravou
Zdroj: vlastní zpracování

Parametry tisku

Teplota extruze pro zajištění optimální adheze, která je u tlakových předmětů klíčová, byla zvolena mezi 230 až 250°C v závislosti na tvrdosti materiálu. Nižší teploty způsobovaly příliš tenké linky a objevovaly se viditelné mezery a díry. Zatímco vyšší teploty způsobovaly nadměrné vytékání materiálu.

Teplota tiskové podložky pro přilnutí první vrstvy materiálu a prevenci deformace vlivem teplotního smrštění byla podložka z PEI předehřátá na 40°C. Tato teplota zajistila dostatečné přilnutí první vrstvy k podložce. Flexibilní materiál má velmi dobré vlastnosti k přilnutí první vrstvy k podložce. Naopak velmi měkký flexibilní materiál je velmi obtížné odlepit od podložky, proto byl použit fixační 3D lak, který vytvořil tenkou vrstvu na podložce a poté lze snadněji odlepit vytištěný objekt.

Ventilátor chlazení při tisknutí gripperů byl zapnut jen na velmi nízkých hodnotách (do 30%), aby nedocházelo k příliš rychlému tuhnutí nataveného materiálu. Rychlost chlazení by mohlo výrazně snížit pevnost spojů mezi vrstvami. Zvýšená rychlost ventilátoru byla zvýšena jen v místech přemostění u vnitřních komor.

Retrakce byly z důvodu velké elasticity materiálu upraveny na hodnoty 0-0,4mm, aby nedocházelo k ucpávání hotendu.

Průběh tisku

Průběh tisku metodou FDM začíná první vrstvou, která tvoří základnu gripperu a musí výborně přilnout k podložce. Tato stěna je tisknuta plná (přímočará 100% výplň), aby se zamezilo úniku vzduchu a zvýšila se její tuhost.

Následně tiskárna bude tisknout vertikální stěny jednotlivých vzduchových komor a centrálního rozvodného kanálku. Zde je kladen velký důraz na spojitost perimetrů, aby byla zajištěna vzduchotěsnost byl model slicován se 4 perimetry, tak aby mikroskopické mezery v jedné dráze byly překryty sousední dráhou.

Kritickým místem tisku je uzavírání vnitřních komor a centrálního kanálku. Zde musela tiskárna aplikovat techniku přemostění, kdy je tavenina extrudovaná do prázdna mezi dvěma opěrnými body. Pro úspěšné přemostění tohoto místa byl zvýšen chladicí výkon na 100%, aby vlákno tuhlo rychleji. Zároveň byl model vymodelován tak, aby přemostění bylo co nejmenší. Flexibilní materiály by velké přemostění nezvládly.

Analýza tiskových vad

Při tisknutí se objevila převážně jedna vada, a to nadměrné stringování. Jelikož u měkkých materiálu nelze využívat rychlé retrakce, natavený materiál při pohybech naprázdno samovolně trochu vytékal. Problém s nahromaděním těchto vláken uvnitř vzduchových komor se úspěšně předešlo. Nastavení tisku bylo optimalizováno tak, aby tisková hlava neprováděla přejezdy přes vnitřní prostory modelu. Díky tomuto nedošlo k zanesení vzduchových komor gripperu a omezené flexibilitě. Stringování se tedy objevilo pouze mezi vnějšími stěnami žebrované části (viz obr. 28). U některých výtisků se objevili netěsnosti, tato vada se odstranila několika změnami v modelu a také dalšími změnami, že se nejprve znovu vysušil filament a poté se za upravených tiskových parametrů tisknulo znova.



Obrázek 28: Stringování na vytištěném gripperu

Zdroj: vlastní zpracování

Postprocessing a kompletace

Metod FDM tisku produkuje hotový tvar, ale vyžaduje i následný postprocessing. Nejprve byly odstraněny vlákna po stringování za pomoci ostrých nástrojů. Také se provedlo začištění vstupního otvoru pro vložení závitové vložky.

Pro spolehlivé napojení přívodu vzduchu byla zvolena mosazná závitová vložka zalisovaná za tepla to gripperu. Toto řešení poskytuje pevnější a odolnější řešení než vlepování nebo řezání závitů do měkkého materiálu. Následně se na závitovou vložku našroubovala pneumatická spojka, na kterou se připojí přívod vzduchu pomocí polyuretanové hadice.

8.1.5 Závitová vložka a těsnění

Pro připojení přímých nástrčných spojek byly zvoleny lisovací závitové vložky se závitem M5 pro termoplasty, které se lisují za tepla. Zalisováním vložky za tepla do předtíštěného otvoru o menším průměru vznikne velmi pevné uložení. Spoj byl také doplněn o pryžové těsnění (okroužek) za účelem eliminování úniku vzduchu.

8.1.6 Přímá spojka

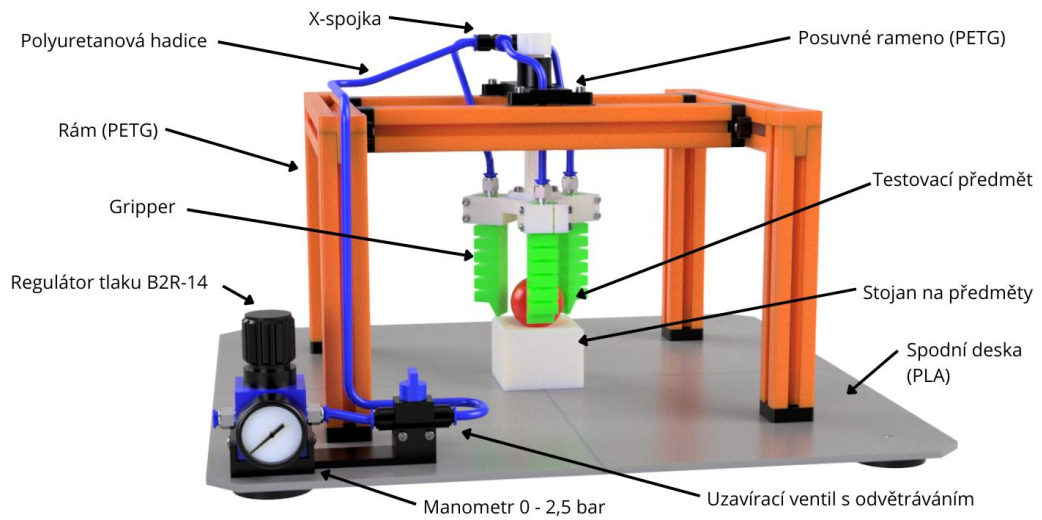
Přívod vzduchu ke každému gripperu je zajištěn pomocí přímé nástrčné spojky se závitem. Jedna část spojky má vnější mosazný závit M5 pro spojení se závitovou vložkou a druhá část slouží jako rychlospojka pro snadné a rychlé připojení plastových hadiček o průměru 6 mm. Tato přímá nástrčná spojka má maximální pracovní tlak média 10 bar o teplotě -10 až 60°C. (*Kompresory vzduchotechnika, 2026d*)

8.2 Návrh testovacího přípravku

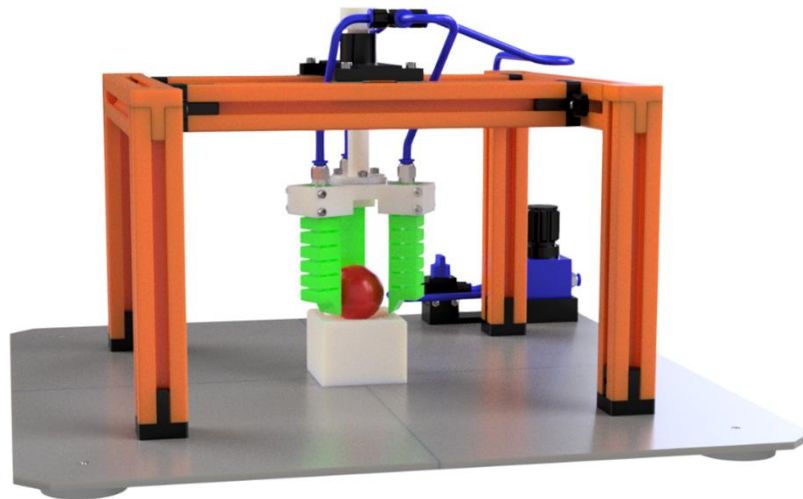
K ověření teoretických předpokladů navrženého elastomerního pneumatického gripperu bylo nezbytné vytvořit testovací přípravek. Pro tyto účely byl zkonstruován a realizován testovací přípravek. Konstrukce byla vyrobena aditivní technologií z materiálů PLA a PETG, geometrie jednotlivých komponent vycházela ze standardizovaných hliníkových profilů. Sestava byla doplněná o spojovací prvky (šrouby a matice) a byla vytvořena dostatečně tuhá platforma pro měření při stupňujícím tlaku.

8.2.1 Konstrukce testovacího přípravku

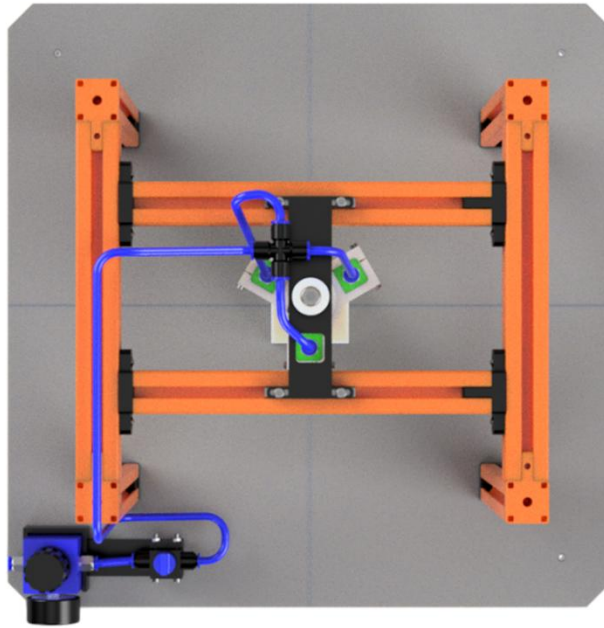
Testovací přípravek se skládá z několika součástí, základnu celého zařízení tvoří deska vyrobená z materiálu PLA, hlavní nosnou strukturu tvoří profily vyrobené z materiálu PETG, regulátor tlaku, X-spojka, polyuretanové hadice, manometr, držák na regulátor a manometr, stojan na předměty a další součásti. Celková sestava navržená v CAD systému Autodesk Fusion je zdokumentovaná na obrázcích níže. (obr. 29, 30 a 31).



Obrázek 29: Sestava testovacího přípravku zepředu
zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 30: Sestava testovacího přípravku zezadu
Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 31: Sestava testovacího přípravku shora

Zdroj: vlastní zpracování

Konstrukční návrh zkušebního přípravku byl realizován v CAD softwaru Autodesk Fusion s důrazem na modularitu a vysokou tuhost. Celá sestava obsahuje vlastní 3D tištěné díly se standardizovanými pneumatickými prvky. Základu celého přípravku tvoří spodní nosná deska vyrobená z materiálu PLA. S ohledem na požadavek maximální tvarové stability a odolnosti byla tato deska vytištěna s 50% výplní (infill) a 6 perimetrů na obvodových stěnách. Materiál PLA byl zvolen z důvodu menšího smrštění než PETG. Zkušební přípravek je umístěn na 5 nohách vyrobených z PETG. Nohy jsou k desce přišroubovány šrouby M3.

Nosný rám je sestaven z vytištěných profilů 30x30 mm, které byly koncepčně inspirovány modulárním systémem amerického výrobce 80/20 Inc. Tato geometrie umožňuje snadnou montáž doplňkového příslušenství a vysokou variabilitou. Profily byly vyrobeny z materiálu PETG s nastavením 3 perimetrů, což poskytuje dostatečnou mechanickou pevnost. Rám tvoří čtyři svislé profily o délce 190 mm a horní vodorovná konstrukce je sestavena ze čtyř 250 mm dlouhých profilů, které definují pracovní prostor pro experiment. Vytištěné plastové profily jsou spojeny rohovými a T-spojky. Tyto spojky byly navrženy tak, aby přesně lícovaly s drážkami profilů. Z důvodů vysokých nároků na spoj byly spojky vytištěny z PETG s výplní 100% a 3 perimetry. Toto nastavení zaručuje, že spojky neprasknou ani při pevném dotažení šroubů.

Pro polohování pneumatického gripperu je v horní části rámu posuvné rameno inspirováno portálovým jeřábem, které se pohybuje po vodorovných profilech. Toto řešení umožňuje nastavení polohy gripperu vůči objektu.

V ose gripperu je na základní desce umístěn stojan na předměty. Výška a poloha stojanu je pevně zafixována, tak aby objekt, který gripper uchopí zasahoval do pracovní zóny gripperu.

8.3 Pneumatické součástky pro regulaci tlaku

Pro ovládání a měření tlaku v elastomerním pneumatickém gripperu byl navržen tlakový okruh, který zajišťuje stabilitu a opakovatelnost měření. Hlavním regulačním prvkem sestavy je Regulátor tlaku B2R-14 (viz obr. 32), sloužící k redukci vstupního tlaku z kompresoru na provozní hodnoty bezpečné pro pneumatické gripperu. Kovová konstrukce regulátoru zaručuje minimální hysterezi a vysokou stabilitu nastavené hodnoty, což je nezbytné pro eliminaci kolísání tlaku během experimentálního zkoušení. Tento regulátor umožňuje regulační rozsah 0–12 bar. Má přípojovací vnitřní závit G 1/4" a pro připojení manometru slouží závit 1/8". (*Kompresory vzduchotechnika, 2026a*)

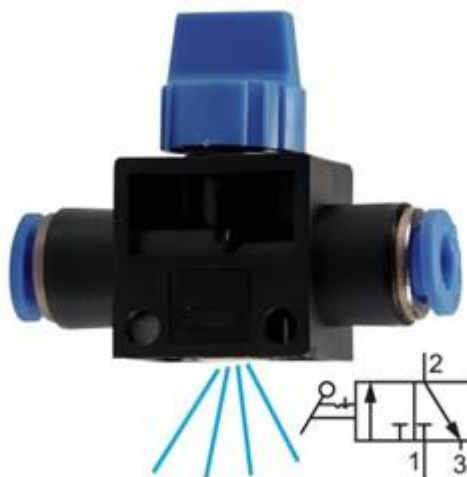


Obrázek 32: Regulátor tlaku B2R-14

Zdroj: Kompresory vzduchotechnika (2026a)

Pro sběr dat o tlaku je v systém osazen manometrem o rozsahu 0-2,5 bar. Volba nízkého rozsahu je důležitá pro dosažení lepšího rozlišení stupnice. Na rozdíl od standardních průmyslových manometrů umožňuje tento přístroj přesné odečítání i malých tlakových přírůstků v řádech desetin, čímž zvyšuje kvalitu získaných dat. Byl zvolen manometr o průměru 40 mm se zadním připojením G 1/8" a třídou přesnosti 2,5%. Tento manometr je určený pro měření tlaku neagresivních medií s nižšími nároky na mechanickou odolnost přístroje. (*Kompresory vzduchotechnika, 2026b*)

Prvek, který zajišťuje bezpečnost a dynamiku celého procesu byl zvolen uzavírací ventil s funkcí odvětrávání (viz obr. 33). Tento prvek umožňuje oddělit pneumatický gripper od zdroje tlaku a současně vypustit nahromaděný vzduch z gripperu do okolní atmosféry. Funkce odvětrávání je pro soft robotiku důležitá, neboť zajišťuje okamžitou relaxaci prstů gripperu do jejich původního tvaru, což zkracuje čas mezi jednotlivými experimentálními cykly a simuluje reálný provoz. Veškeré komponenty jsou spojeny pomocí polyuretanových hadic o průměru 6 mm, které minimalizují tlakové ztráty a zajišťují těsnost celého systému.



Obrázek 33: Uzavírací ventil s odvětráváním

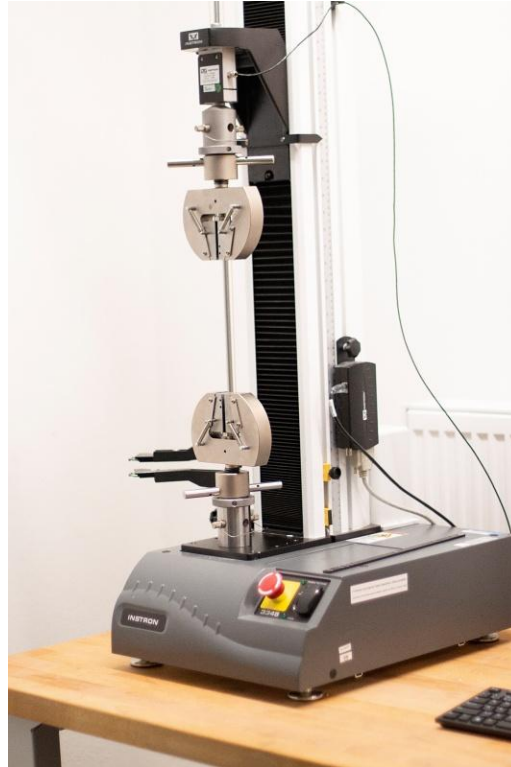
Zdroj: Kompresory vzduchotechnika (2026c)

8.4 Tahová zkouška materiálů

Základním kamenem pro stanovení mechanických vlastností a následnou kalibraci materiálových modelů hyperelastických materiálů je jednoosá tahová zkouška. Vzhledem k výrazně nelineárnímu chování elastomerů a jejich schopnosti výrazné pružné deformace je nezbytné postupovat podle standardizovaných metod, které garantují správné výsledky. Pro účely této práce byla zvolena zkouška podle normy ČSN ISO 37 (621436) Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tahových vlastností, která popisuje metody pro určení mechanických vlastností vulkanizovaných a termoplastických elastomerů. Vyhodnocovanými vlastnostmi jsou tahové napětí, tažnost, napětí při daném prodloužení, prodloužení při daném napětí, mez kluzu a poměrné prodloužení na mezi kluzu. (ČSN ISO 37, 2019)

8.4.1 Postup tahové zkoušky

Pro měření byl použit stroj Instron 3345 (viz obr. 34), který se používá pro testování mechanických vlastností jako jsou tah, tlak, 3bodový a 4bodový ohyb. Tento elektromechanický zkušební stroj má maximální sílu 5kN. Umožňuje vysoce variabilní rychlost testování v rozsahu 0,05 – 1000mm/min, plná jmenovitá síla je k dispozici v celém rychlostním rozsahu. Efektivitu měření zvyšuje vysoká návratová rychlost příčnicku 1000mm/min. Konstrukce stroje s výškou příčnicku poskytuje 885mm poskytuje zkušební prostor o velikosti 1123 mm. (Vysoká škola polytechnická Jihlava, b.r.)



Obrázek 34: Zkušební stroj Instron 3345

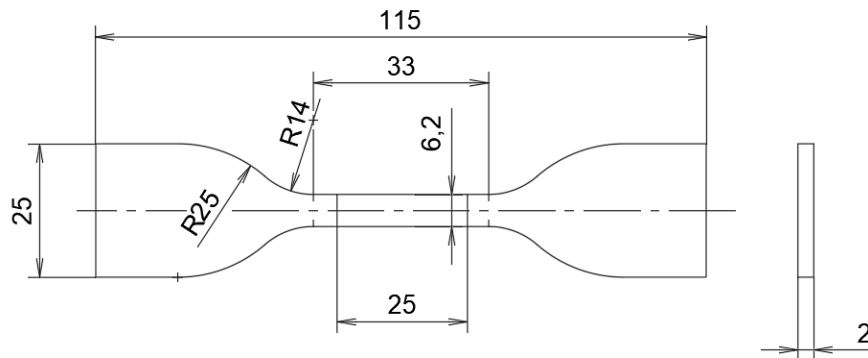
Zdroj: Vysoká škola polytechnická (b.r.)

Pro měření a zjištění vlastností použitého materiálu bylo použito zkušební těleso typu 1 (viz Obr. 35) podle normy ČSN ISO 37. Vzorky byly připraveny ze 3 různých materiálů s různými stupni tvrdosti Shore. Pro určení přesnějších výsledků bylo zvoleno 5 vzorků pro každý materiál. Zjištěná data budou dále použita pro simulaci pomocí metody konečných prvků v programu Ansys.

Před samotným měřením bylo nezbytné provést přípravu vzorků a konfiguraci softwaru. Pomocí posuvného měřidla se změří pracovní část vzorku (šířka a tloušťka) na několika místech a vypočítá se průměr. Tyto rozměry jsou důležité pro následný výpočet napětí. Změřené hodnoty se spolu s počáteční měřenou délkou vloží do ovládacího softwaru stroje (v tomto případě software Bluehill), kde se definuje i rychlost posuvu příčnicku, v tomto případě byla zvolena rychlost 500mm/min podle normy ČSN ISO 37.

Následuje upínání vzorku, zkušební tělesa ze 3 různých materiálů (viz následující kapitoly 7.5.1, 7.5.2, 7.5.3) byly upnuty do klínových čelistí stroje Instron 3345. Vzorek se nejprve pevně uchytí do horní čelisti a provede se vynulování síly, aby se do měření nezapočítávala hmotnost testovaného vzorku. Poté se vzorek vyrovnaný vzorek do svislé osy dotáhne do spodní čelisti. Důležité je, aby nedošlo při utahování k příliš velkému předpětí, pokud k tomu dojde je nutné sílu softwarově vybalancovat, tak aby měření začínalo z nulového zatížení. Pokud je vzorek bezpečně upevněn, spustí se samotná zkouška, během které stroj plynule zvyšuje tahové zatížení a zároveň vykresluje pracovní diagram. V okamžiku přetržení stroj zaznamená maximální dosaženou sílu a maximální prodloužení.

Po dokončení zkoušky a automatickém zpracování naměřených hodnot software vygeneruje výstupní soubor s daty, který lze exportovat přímo do souboru textového formátu (.csv). Tato vyexportovaná tabulka obsahuje záznam všech sledovaných veličin v jednotlivých časových krocích.

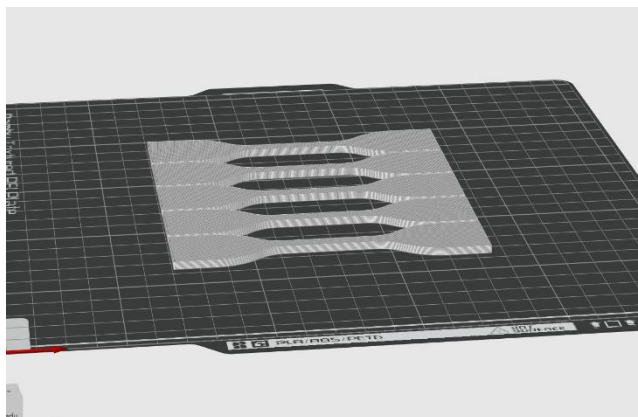


Obrázek 35: zkušební těleso typ 1

Zdroj: vlastní zpracování

8.4.2 Příprava vzorků na 3D tiskárně

Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku byla vyrobena technologií FDM na tiskárně Bambu Lab P1S. Před samotným tiskem byl filament sušen po dobu 6 hodin při teplotě 50°C pro eliminaci vlhkosti. Vzhledem ke specifickým vlastnostem materiálu byla zvolena pomalá rychlost 30mm/s. Tato rychlost byla nezbytná pro zajištění konstantního průtoku materiálu. Proces tisku probíhal při teplotě trysky 240°C. Tato teplota byla zvolen s ohledem na dosažení optimální viskozity a dokonalého spojení vrstev. Ventilátor tisknutého vzorku byl při tisku vypnutý pro lepší spojení vrstev. Vzorky byly tištěny se dvěma perimetry a 100% přímočarou výplní. Vzorky byly orientovaný v rovině XY (viz obr. 36). Tato orientace byla zvolena záměrně pro dosažení maximální pevnosti v tahu.



Obrázek 36: Orientace vzorku pro tisk v softwaru Bambu Studio

Zdroj: vlastní zpracování

8.4.3 Materiál Spectrum S-Flex 98A

Materiál Spectrum S-Flex 98A je na bázi termoplastického polyether polyuretanu. Název filamentu 98A odkazuje na tvrdost materiálu v Shore stupnici a řadí Spectrum S-Flex 98A do kategorie tvrdých elastomerů. Další výhodou, která přispívá k dokonalému výtisku je velmi dobrá přilnavost první vrstvy tištěného dílu k vyhřívané podložce v 3D tiskárně, bez ohledu na to, zda

je vyrobena ze skla, oceli, plastu nebo jiného materiálu. Další vlastnost filamentu 98A je vysoká odolnost vůči hydrolyze, prodloužení při přetržení až 510 %, vysoká odolnost v tahu a proti roztržení, nízké smrštění, odolnost vůči běžným průmyslovým olejům, chemikáliím a snížené stringování během přejezdů tiskárny naprázdno. (Spectrum Filaments, 2022a)

Tabulka 1: Materiálové a mechanické vlastnosti materiálu Spectrum S-Flex 98A

Vlastnost	Hodnota	Metoda testování
Hustota	1,09g/cm ³	ISO 1183-1
Smrštění	0,80%	D 955
Tvrдость podle Shore	98A	ISO 7619
Pevnost v tahu	55 MPa	DIN 53504
Maximální prodloužení	510%	DIN 53504
Tahový modul při 100% prodloužení	15,4 MPa	DIN 53504
Tahový modul při 300% prodloužení	25 MPa	DIN 53504

Zdroj: Spectrum Filaments (2022a)

Tabulka 2: Doporučení tiskové nastavení pro materiálu Spectrum S-Flex 98A

Parametr	Hodnota
Teplota trysky	200-230°C
Teplota podložky	50-70°C
Rychlost tisku	20-70 mm/s
Výška vrstvy	0,05 – 0,3 mm
Tloušťka stěny	0,4 – 2,7 mm

Zdroj: Spectrum Filaments (2022a)

8.4.4 Materiál Spectrum S-Flex 90A

Filament Spectrum S-Flex 90A je navržený pro 3D tisk. Umožňuje výrobu flexibilních výrobků jednodušším způsobem než u jiných materiálů. Dobrou přilnavost mezi vrstvami i mezi tištěným objektem a tiskovou podložkou zajišťuje vhodně složení materiálů. Má dobrou odolnost vůči UV záření, vysokou odolnost proti stárnutí a odolnost vůči slabým a zředěným kyselinám a zásadám. Další vlastnosti jsou velmi dobrá odolnost proti opotřebení a roztržení, prodloužení při přetržení až 500%, vysoká kvalita povrchu a omezené stringování při pohybu tiskárny naprázdno. (Spectrum Filaments, 2022b)

Tabulka 3: Materiálové a mechanické vlastnosti materiálu Spectrum S-Flex 90A

Vlastnost	Hodnota	Metoda testování
Hustota	1,22g/cm ³	DIN 53479
Smrštění	0,80%	D 955
Tvrдость podle Shore	90A	DIN 53505
Pevnost v tahu	35 MPa	DIN 53504
Maximální prodloužení	500%	DIN 53515

Zdroj: Spectrum Filaments (2022b)

Tabulka 4: Doporučení tiskové nastavení pro materiálu Spectrum S-Flex 90A

Parametr	Hodnota
Teplota trysky	200-230°C
Teplota podložky	50-70°C
Rychlost tisku	15-50 mm/s
Výška vrstvy	0,05 – 0,3 mm
Tloušťka stěny	0,4 – 2,7 mm

Zdroj: Spectrum Filaments (2022b)

8.4.5 Materiál Spectrum S-Flex 85A

Materiál Spectrum S-Flex 85A je vyroben na bázi termoplastického polyether polyuretanu. Tvrđostí materiálu se Spectrum S-Flex 85A řadí do kategorie tvrdých elastomerů. Výhodou tohoto materiálu je velmi dobrá přilnavost první vrstvy tištěného objektu k pracovní podložce, bez ohledu na to, zda je vyrobena z oceli, plastu, sklad nebo jiného materiálu. Vyznačuje se vysokou odolností vůči hydrolyze, nízké smrštění a vysoká pevnost v tahu a odolnost proti roztržení. Také je odolný vůči běžným průmyslovým olejům a chemikáliím. (Spectrum Filaments, 2022c)

Tabulka 5: Materiálové a mechanické vlastnosti materiálu Spectrum S-Flex 85A

Vlastnost	Hodnota	Metoda testování
Hustota	1,11g/cm ³	ISO 1183-1
Smrštění	0,80%	D 955
Tvrдость podle Shore	85A	ISO 7619
Pevnost v tahu	40 MPa	DIN 53504
Maximální prodloužení	650%	DIN 53504
Tahový modul při 100% prodloužení	7,3 MPa	DIN 53504
Tahový modul při 300% prodloužení	11 MPa	DIN 53504

Zdroj: Spectrum Filaments (2022c)

Tabulka 6: Doporučení tiskové nastavení pro materiálu Spectrum S-Flex 85A

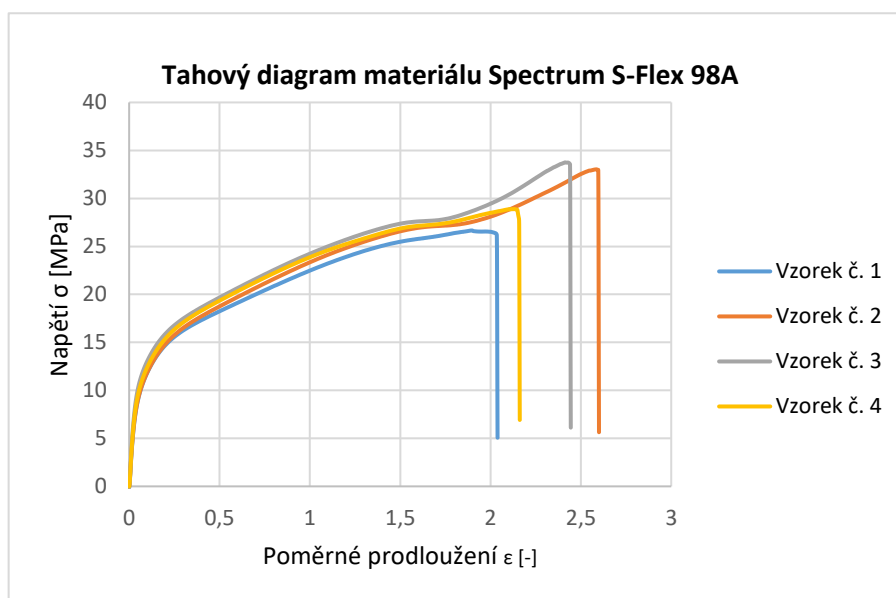
Parametr	Hodnota
Teplota trysky	200-230°C
Teplota podložky	50-70°C
Rychlost tisku	20-70 mm/s
Výška vrstvy	0,05 – 0,3 mm
Tloušťka stěny	0,4 – 2,7 mm

Zdroj: Spectrum Filaments (2022c)

8.4.6 Tahové diagramy zkoušených materiálů

Tahový diagram pro materiál Spectrum S-Flex 98A

Tahový diagram pro materiál s tvrdostí 98A je vyobrazen na obr. 37. Grafické znázornění výsledků tahové zkoušky materiálu s tvrdostí 98A ukazuje závislost napětí na poměrném prodloužení u čtyř zkušebních vzorků. Z přiloženého tahového diagramu je patrné mechanické chování materiálu Spectrum S-Flex, které odpovídá typickým vlastnostem elastomerů. Maximální pevnost v tahu se u testovaných vzorků pohybuje v rozmezí od 26,5 MPa až do 34 MPa. Materiál vykazuje vysokou míru flexibility, jelikož k jeho přetržení zkušebních těles došlo až při poměrném prodloužení 2,0 až 2,6, což potvrzuje schopnost materiálu prodloužit se před porušením více než dvojnásobně. Zjištěný rozdíl mezi jednotlivými měřeními je běžným jevem u 3D tisku.

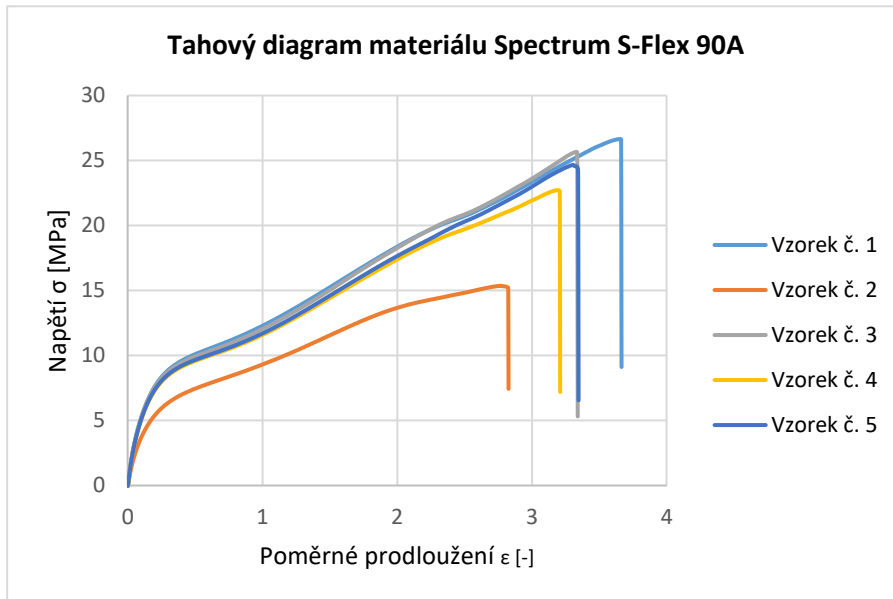


Obrázek 37: Tahový diagram materiálu Spectrum S-Flex 98A

Zdroj: vlastní zpracování

Tahový diagram pro materiál Spectrum S-Flex 90A

Tahový diagram pro materiál Spectrum S-Flex s tvrdostí 90A je vyobrazen na obrázku 38. Z diagramu je patrné že se jedná o velmi měkký a vysoce tažný elastomer. Křivky mají plynulý průběh bez výrazné meze kluzu, což je typické pro tyto materiály. Většina testovaných vzorků dosáhla maximální pevnosti v tahu v rozmezí 22 až 27 MPa při velmi velkém poměrném prodloužení 3,2 až 3,6. Materiál se před přetržení natáhl o více než 320% své původní délky. Výjimkou je vzorek č. 2 u kterého došlo k předčasnému přetržení již při 15,3 MPa a prodloužení pouze 2,8. Tento vzorek č. 2 s největší pravděpodobností měl tiskový defekt.

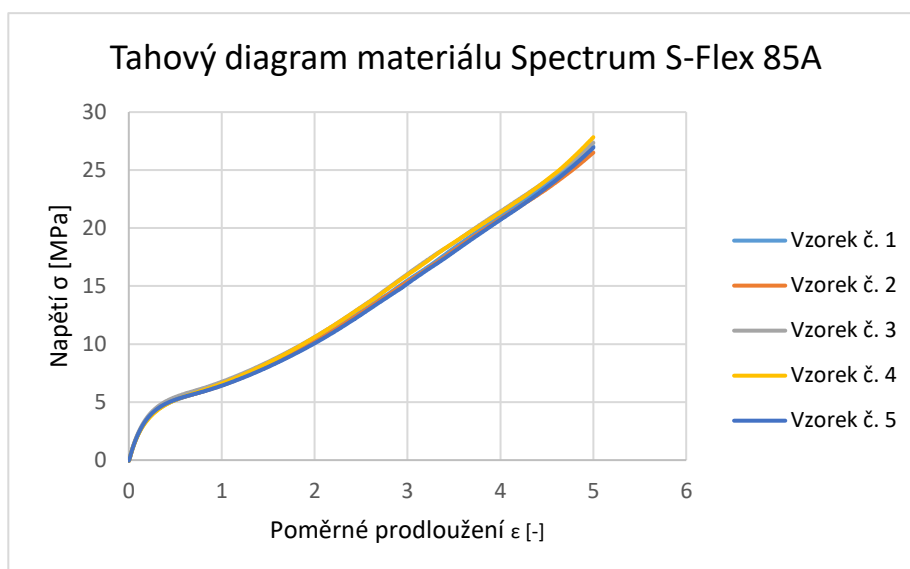


Obrázek 38: Tahový diagram materiálu Spectrum S-Flex 90A

Zdroj: vlastní zpracování

Tahový diagram pro materiál Spectrum S-Flex 85A

Tahový diagram pro materiál Spectrum S-Flex s tvrdostí 85A je vyobrazen na obrázku 39. Z třetího tahové diagramu je patrné, že se jedná o nejměkčí a nejflexibilnější materiál. Graf ukazuje že všechny materiály překročily poměrné prodloužení 5. Zkušební tělesa se natáhl o více než 500% své původní délky. Maximální dosažené napětí se pohybu v rozmezí od 26,5 MPa až 28 MPa. U těchto 5 vzorků stojí za pozornost konzistence výsledků, protože všechny křivky se téměř překrývají. To znázorňuje velmi dobré nastavení tiskových parametrů a absenci vnitřních vad.



Obrázek 39: Tahový diagram materiálu Spectrum S-Flex 85A

Zdroj: vlastní zpracování

V následující tabulce č.7 jsou naměřené a spočítané hodnoty z tahové zkoušky 3 různých materiálů.

Tabulka 7: Spočtené a naměřené hodnoty z tahové zkoušky

Materiál	Maximální zatížení [N]	Tahové napětí [MPa]	Youngův modul pružnosti [MPa]	Prodloužení [%]
98A	570,23±54,37	30,58±2,93	287,68±19,44	225,72±26,29
90A	436,00±88,88	23,01±4,04	49,71±4,26	325,06±28,53
85A	488,71±11,49	27,13±0,45	10,14±0,76	500±0

Zdroj: vlastní zpracování

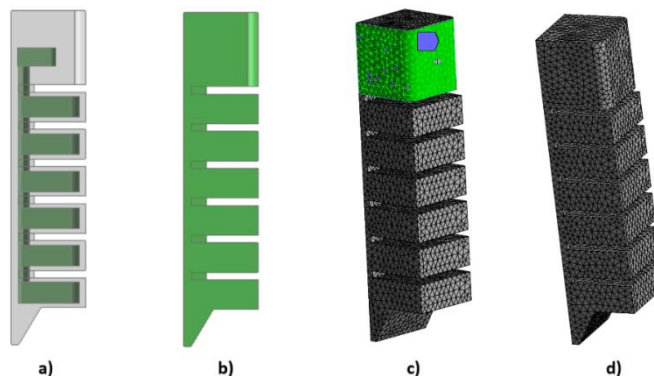
8.5 Analýza pomocí MKP

Pro zjištění teoretického chování zkonstruovaného soft pneumatického gripperu v závislosti vnitřním tlaku byla realizována MKP analýza. Výpočetní analýza byla provedena v prostřední softwaru Ansys. Tento simulační program byl zvolen pro svou vysokou efektivitu při řešení nelineárních problémů, které jsou pro oblast měkké robotiky typické. Ansys disponuje pokročilými algoritmy pro modelování hyperelastických materiálů a umožňuje přesné zachycení stavů při velkých průhybech, to zajišťuje vysokou shodu numerického modelu s reálným chováním.

8.5.1 Postup tvorby simulace v softwaru Ansys

Tvorba numerického modelu a samotná simulace chování soft pneumatického gripperu probíhala v softwaru Ansys v následujících krocích:

1. **Import experimentálních dat:** V úvodní fázi byla do softwaru Ansys nahrána experimentální data získaná z tahových zkoušek použitého materiálu za účelem přesné definice jeho mechanických vlastností.
2. **Definice materiálového modelu:** Pomocí integrovaného nástroje pro prokládání křivek (*curve fitting*) byl na naměřená data aplikován hyperelastický materiálový model Ogden 2. řádu, tento model nejlépe kopíroval křivku. Na základě tohoto modelu software analyticky odvodil materiálové konstanty nezbytné pro výpočet.
3. **Import 3D modelu:** Do simulačního prostředí byl importován 3D CAD model soft gripperu
4. **Příprava geometrie a definice ploch:** Pro usnadnění následné aplikace okrajových podmínek a zatížení byly v modelu specifikovány a pojmenovány geometrické celky, vnitřní stěny (viz obr. 40a) a vnější povrchy gripperu (viz obr. 40b).
5. **Definice okrajových podmínek:** Kinematika úlohy byla vymezena pomocí pevných vazeb (*Fixed Support*). Tato vazba byla aplikována na základnu gripperu, čímž se zamezilo jejich volnému pohybu v prostoru (viz obr. 40c).
6. **Aplikace zatížení:** Simulace ohybu prstů vyvolaného vnitřním přetlakem byla realizována plošnou aplikací tlakového zatížení (*Pressure*) na předem definované vnitřní stěny pneumického gripperu.
7. **Tvorba sítě:** Model byl rozdělen na malé elementy. Pro dosažení maximální přesnosti výsledků byla zvolena adekvátní velikost elementů (viz obr. 40d).
8. **Nastavení parametrů výpočtů:** Analýza byla definována jako *Static Structural* (statická analýza) s aktivací funkce pro výpočet velkých deformací (*Large Deflection*). Pro zajištění konvergence této vysoce nelineární úlohy bylo nastaveno postupné iterativní krokování zátěže (*substepping*).
9. **Provedení vlastního výpočtu:** Následně byl spuštěn numerický výpočet, při kterém řešič iterativně vyhodnocoval nelineární rovnice v závislosti na postupně narůstajícím tlaku v komorách.
10. **Vizualizace a analýza výsledků:** Po úspěšném dokončení výpočtů proběhlo vyhodnocení vypočtených dat. Analyzováno bylo především celkové posunutí gripperu (viz obr. 41).

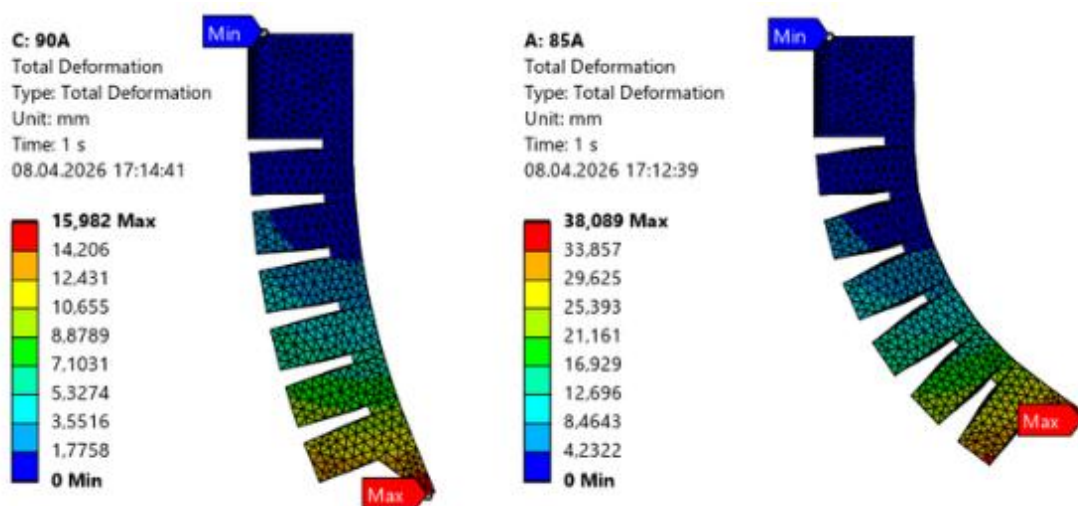


Obrázek 40: Postup tvorby analýzy MKP soft pneumického gripperu

Zdroj: vlastní zpracování

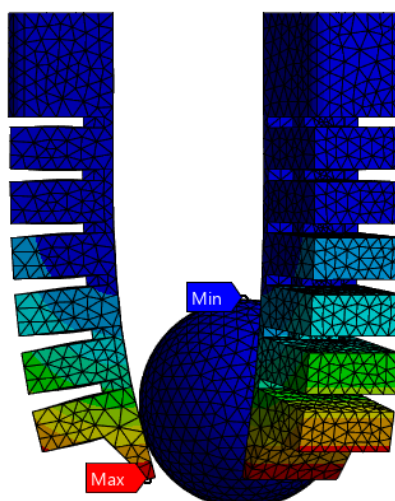
Na obrázku 41 je výsledek grafické simulace MKP analýzy ohybu soft pneumatického gripperu, která byla realizována v prostředí Ansys. Cílem této simulace bylo vyhodnotit chování a rozsah deformace gripperu při volném ohybu v prostoru. Výsledné posunutí je zobrazeno pomocí barevné škály. Jak je z grafického výstupu patrné, nejnižší hodnoty se nacházejí v ukotvení gripperu a směrem ke konci gripperu hodnoty rostou. Maximální zaznamenaná výchylka pro materiál S-Flex 90A je 16mm a pro materiál S-Flex 85A je 38mm.

Obrázek 42 znázorňuje simulaci uchopení objektu pro flexibilní materiál Spectrum S-Flex 85A při tlaku 0,6kPa. Cílem bylo ověřit schopnost soft pneumatického gripperu, zda dokáže bezpečně uchopit cílový objekt.



Obrázek 41: MKP analýza pro Spectrum S-Flex 90A a 85A

Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 42: Simulace uchopení objektu

Zdroj: vlastní zpracování

8.6 Experimentální ověření

Po úspěšném dokončení konstrukčního návrhu a výrobě funkčních prototypů pomocí 3D tisku technologií FDM následovala fáze experimentálního ověření. Vzhledem k vysoce nelineárnímu chování flexibilních materiálů a technologickým odchylkám aditivní výroby nelze při predikci spoléhat pouze simulace. Hlavním cíle této části je vyzkoušet navržený tvar v praxi a porovnat s analýzou MKP.

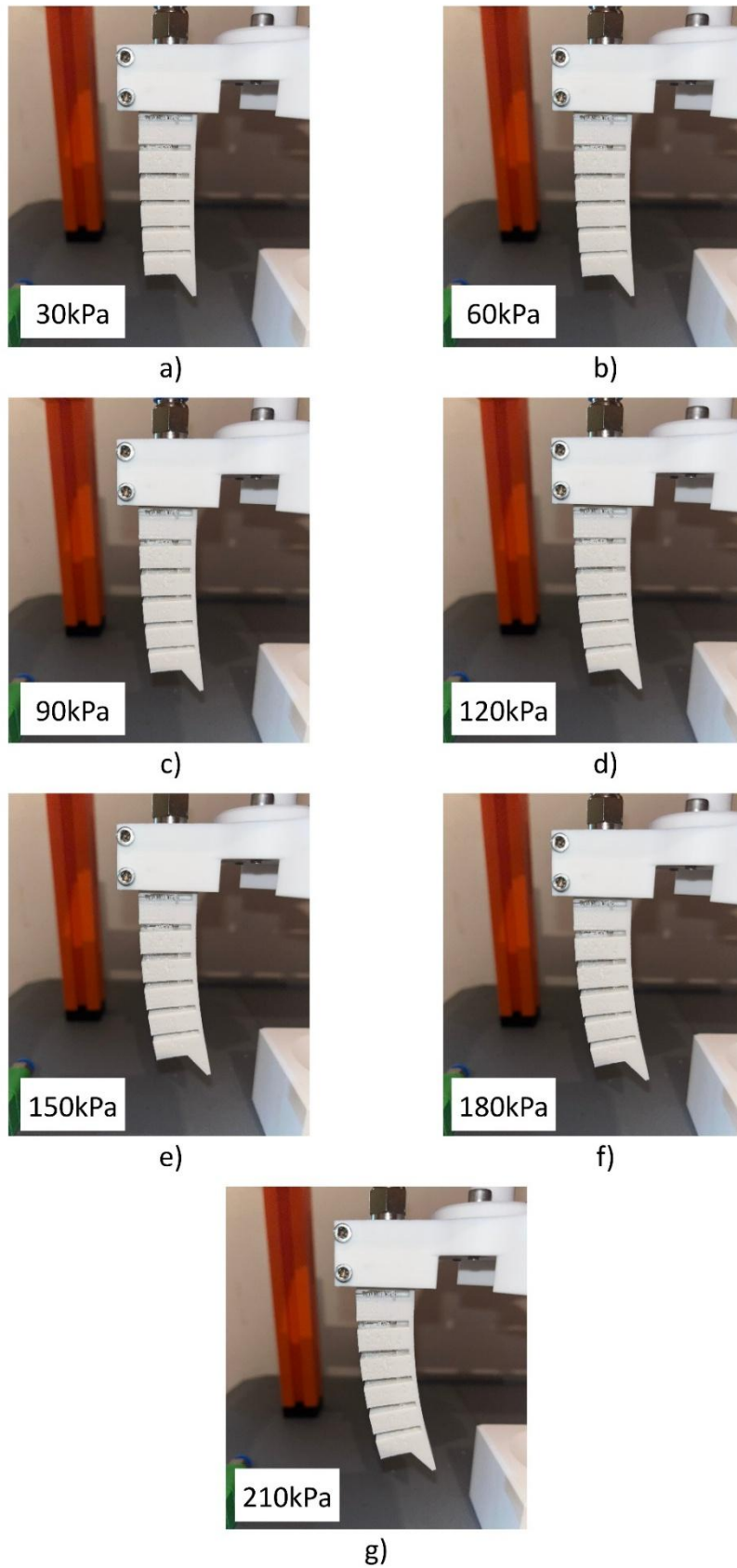
Pro vyhodnocení chování gripperů v praxi byly analyzovány tři různé materiály, jejichž mechanické vlastnosti předtím byly předem stanoveny pomocí tahové zkoušky. Pro názornou ukázkou chování gripperů byly testovány při různých tlacích. Samotné měření probíhalo formou fotodokumentace, když byl pořízen snímek při dosažení stanovené hodnoty. Získané fotografie byly pro lepší přehlednost sloučeny do jednoho obrázku.

Obrázek 43 znázorňuje chování gripperu vyrobeného z materiálu Spectrum S-Flex 98A při sedmi různých tlacích. Snímky a) až g) znázorňují postupný nárůst ohybu při zvyšování tlaku od 30kPa až po 210kPa s pravidelným nárůstem o 30kPa. Při maximálním testované tlaku 210kPa dosáhla výchylka gripperu přibližně 10 mm. V porovnání s výsledky simulace MKP, která předpovídala výchylku 11 mm je naměřená výchylka nepatrně menší. Experiment v tomto případě potvrdil, že analýza MKP dosahuje velmi vysoké přesnosti. Zkoumaný materiál není vhodný pro výrobu soft pneumatických gripperů. Vyznačuje se příliš velkou tuhostí, v důsledku toho je i při vysokých tlacích dosahováno pouze malých vychylek (ohybu).

Obrázek 44 ilustruje deformační chování dalšího testovaného materiálu Spectrum S-Flex 90A. Snímky a) až g) zachycují plynulý nárůst výchylky při postupném navyšování tlaku od 30kPa až do 210kPa. Při maximální testované tlaku 210kPa dosáhla reálná výchylka gripperu přibližně 16mm. V porovnání s MKP, která predikovala výchylku 18mm je naměřená hodnota opět o něco menší jako předchozí testovaný materiál. V porovnání s předchozím materiálem gripper dosáhl výchylky 10mm již při tlaku 120kPa. Tento materiál je tedy vhodnější na výrobu soft pneumatických gripperů.

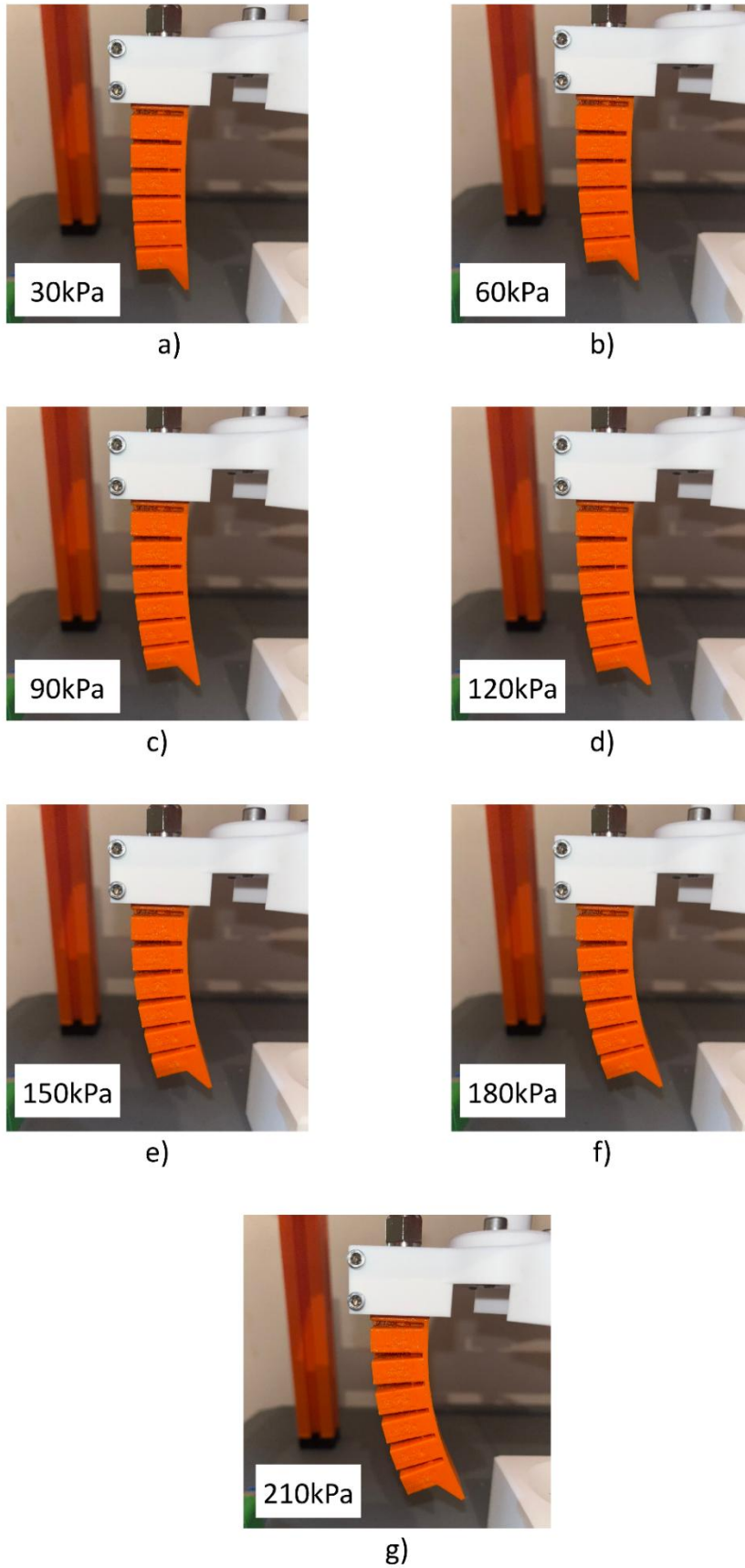
Obrázek 45 znázorňuje výchylku posledního testovaného gripperu, vyrobeného z materiálu Spectrum S-Flex 85A. Tento materiál má nejmenší tvrdost ze zkoumaných vzorků. Snímky a) až g) zachycují výrazný nárůst výchylky při postupném zvyšování tlaku v rozsahu 30kPa až 210kPa. Při maximální zatížení 210kPa byla reálná výchylka gripperu přibližně 33mm, přičemž simulace předpovídala hodnotu 38mm. Tento materiál je nejvhodnější pro výrobu soft pneumatických gripperů. Dosahuje velkých vychylek již při nízkých tlacích.

Pro porovnání gripperu z materiálu S-Flex 85A dosáhl dostatečného ohybu pro uchopení kuličky již při 0,6kPa (viz obr. 46c), kdežto materiál S-Flex 90A až při 0,9kPa (viz obr. 46b) a nejtuzší materiál S-Flex 98A až při 200kPa (viz obr. 46a).

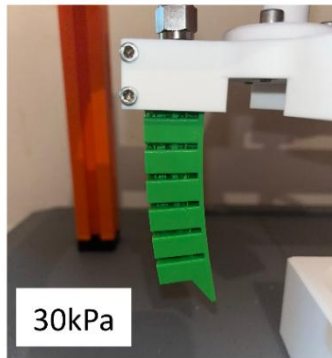


Obrázek 43: Porovnání odezvy gripperů při různých tlacích (Spectrum S-Flex 98A)

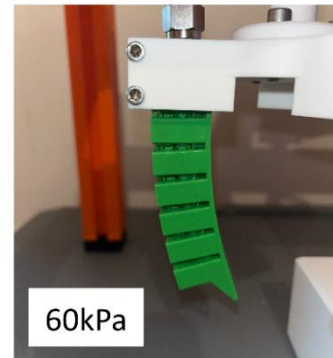
Zdroj: vlastní zpracování



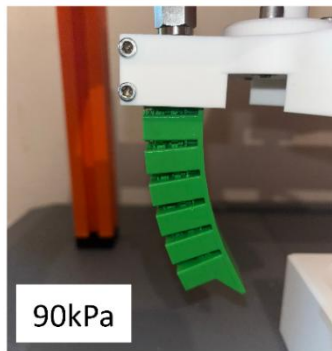
Obrázek 44: Porovnání odezvy gripperů při různých tlacích (Spectrum S-Flex 90A)
Zdroj: vlastní zpracování



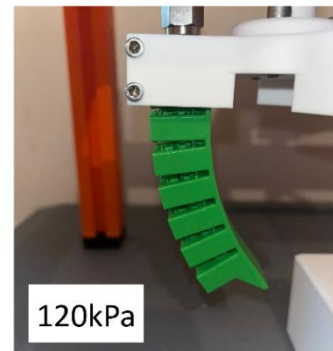
a)



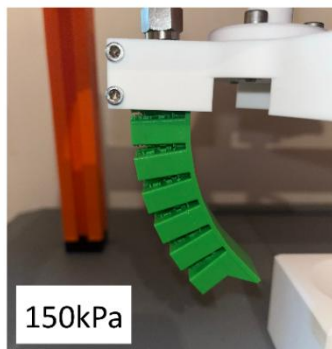
b)



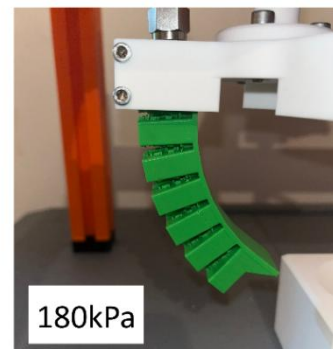
c)



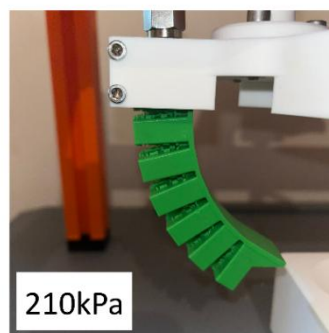
d)



e)

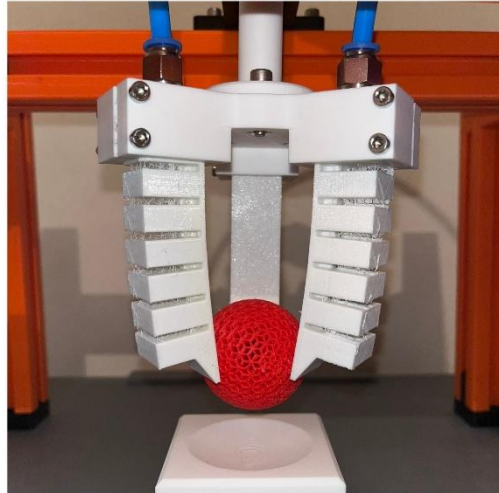


f)



g)

Obrázek 45: Porovnání odezvy gripperů při různých tlacích (Spectrum S-Flex 85A)
Zdroj: vlastní zpracování



a)



b)



c)

Obrázek 46: Ukázka uchopení objektu pro různé materiály
Zdroj: vlastní zpracování

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala vývojem, výrobou a otestováním soft pneumatického gripperu. Hlavním cílem bylo navrhnout funkční prototyp v oblasti soft robotiky, vyrobit jej pomocí aditivní technologie 3D tisku a následně otestovat na reálných aplikacích.

V teoretické části byly shrnuty informace z oblasti měkké robotiky, technologie úchopů, vlastnosti polymerních materiálů, metod testování materiálů a dostupných technologie 3D tisku vhodných pro výrobu. Na tyto poznatky navazovala přímo praktická část, jejímž prvním krokem byl konstrukční návrh samotného gripperu. Zásadním krokem v této části byla optimalizace tvaru vzduchových komor pro tisk metodou FDM bez nutnosti použít podpěr a optimalizování tloušťky vnějších stěn pro zajištění vzduchotěsnosti.

Pro zajištění optimálních vlastností uchopovacího mechanismu byly zvoleny tři flexibilní materiály o výrobce Spectrum. U těchto materiálů byla nejprve provedena tahová zkouška pro ověření jejich reálných vlastností. Získaná data z tahové zkoušky byla použita jako vstupní parametry pro hyperelastický materiálový model v simulačním softwaru Ansys, kde byla pomocí MKP analýzy provedena simulace chování gripperu při různých tlacích.

Pro následné experimentální ověření byl nejprve navržen testovací přípravek v softwaru Autodesk Fusion, následně byl testovací přípravek kompletně vyroben pomocí technologie FDM. Navržen byl i pneumatický obvod pro testování gripperů. Finální porovnání teoretických a praktických výsledků ukázalo velkou shodu mezi simulačním modelem a reálným chováním vyrobených prototypů gripperů. Experiment potvrdil že pro navrženou konstrukci gripperu je z testovaných variant nejvhodnější nejměkčí materiál Spectrum S-Flex 85A, který dosahuje velkých ohybů při nízkých tlacích. Tisk toho materiálu metodou FDM byl ze všech nejnáročnější, z důvodu měkkosti a náročnému hledání optimálních tiskových parametrů. Naopak materiál S-Flex 98A se ukázal pro tento typ konstrukce nevhodný z důvodu velké tuhosti.

Závěrem lze konstatovat, že všechny stanovené cíle diplomové práce byly dosaženy. Podářilo se prokázat, že za předpokladu správné optimalizace 3D modelu a nastavení tiskových parametrů lze pomocí technologie FDM tisknout plně funkční soft pneumatické gripperu. Předložená práce přináší nové poznatky v oblasti soft pneumatických gripperů a může sloužit jako základna pro další výzkum úchopových prvků.

Seznam použité literatury

- RUS, Daniela a TOLLEY, Michael T. Design, fabrication and control of soft robots [online]. Nature, 2015, roč. 521, č. 7553, s. 467–475 [cit. 2026-02-04]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- WANG, Dong, WANG, Jinqiang, SHEN, Zequn, JIANG, Chengru, ZOU, Jiang, DONG, Le, FANG, Nicholas X. a GU, Guoying. Soft Actuators and Robots Enabled by Additive Manufacturing [online]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2023, roč. 6, s. 31–63 [cit. 2026-02-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-061022-012035>
- SHINTAKE, Jun, CACUCCILO, Vito, FLOREANO, Dario a SHEA, Herbert. Soft robotic grippers [online]. Advanced Materials, 2018, roč. 30, č. 29, čl. 1707035 [cit. 2026-02-04]. ISSN 0935-9648, 1521-4095. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- BROWN, Eric, Nicholas RODENBERG, John AMEND, Annan MOZEKA, Erik STELTZ, Mitchell R. ZAKIN, Hod LIPSON a Heinrich M. JAEGER. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. Proceedings of the National Academy of Sciences [online]. 2010, 107(44), 18809–18814 [cit. 2026-03-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.1003250107>
- PIAB AB. Piab Group – Evolving Industrial Automation [online]. Danderyd (Švédsko): Piab Group [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://www.piabgroup.com/>
- PIAB AB. piSOFTGRIP family - Piab [online]. Piab AB, © 2026 [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://www.piab.com/suction-cups-and-soft-grippers/soft-grippers/pisoftgrip-vacuum-driven-soft-gripper-/sg.x>
- ONROBOT. About us [online]. Odense: OnRobot A/S, 2026a [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://onrobot.com/en/about-us>
- ONROBOT A/S. Robot arm grippers and EoAT components [online]. Odense (Dánsko): OnRobot A/S, 2026b [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://onrobot.com/en/products?categories=grippers>
- ONROBOT A/S. Soft Gripper - Flexible, food-grade robot gripper | OnRobot [online]. Odense (Dánsko): OnRobot A/S, 2026c [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://onrobot.com/en/products/soft-gripper>
- SOFT ROBOT TECH. About us [online]. 2026a [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://softrobotgripper.com/pages/about-us>
- SOFT ROBOT TECH. SRT SFG - Soft Finger Robot Gripper [online]. 2026b [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://softrobotgripper.com/collections/srt-sfg-soft-finger-robot-gripper>
- SOFT ROBOT TECH. ISC-SC6-S23E-1 [online]. 2026c [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://softrobotgripper.com/products/isc-sc6-s23e-1>
- SOFT ROBOT TECH. SRT MVG - Mini Vacuum Gripper [online]. 2026d [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://softrobotgripper.com/collections/srt-mvg-mini-vacuum-gripper>

- SOFT ROBOT TECH. SRT NBM - Nimble Bubble Module [online]. 2026e [cit. 2026-04-04].
Dostupné z: <https://softrobotgripper.com/collections/srt-nbm-nimble-bubble-module>
- SOFTGRIPPING. SoftGripping: The modular design system for flexible gripping [online].
Hannover: SoftGripping GmbH, 2024 [cit. 2026-04-06]. Dostupné z: https://softgripping.com/assets/downloads/SoftGripping_Catalogue.pdf
- ROCHU. Why choose ROCHU. Online. 2026a. [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://www.softroboticgripper.com/why-choose-rochu>
- ROCHU. *Gripper module*. Online. 2026b. [cit. 2026-04-04]. Dostupné z: <https://www.softroboticgripper.com/gripper-module>
- BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. 1. vydání, 2015, ISBN 978-80-88058-66-3 [cit. 2026-02-04].
Dostupné z: <https://ejmskoly.publi.cz/book/180-polymery>
- XIN, Yangyang, ZHOU, Xinran, BARK, Hyunwoo a LEE, Pooi See. The Role of 3D Printing Technologies in Soft Grippers [online]. *Advanced Materials*, 2023, roč. 36, č. 34, čl. 2307963 [cit. 2026-02-04]. ISSN 0935-9648, 1521-4095. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adma.202307963>
- PELIN, Cristina-Elisabeta a FICAI, Anton (eds.). *Polymeric Materials and Their Application in 3D Printing* [online]. Basel: MDPI Books, 2024, ISBN 978-3-7258-1405-3 [cit. 2026-02-04].
Dostupné z: https://res.mdpi.com/bookfiles/book/9495/Polymeric_Materials_and_Their_Application_in_3D_Printing.pdf?v=1723453088
- DAVE, Harshit K. a J. Paulo DAVIM, eds. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2021 [cit. 2026-02-05]. *Materials Forming, Machining and Tribology*. ISBN 978-3-030-68024-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4>
- PRUSA RESEARCH a.s. Obrázek 3D tiskárny Original Prusa MK4S [online]. In: *Original Prusa MK4S – produktová stránka* [cit. 2026-02-04]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-mk4s-5/>
- PLA filament jasně oranžový 1,75 mm, 1 kg – Aurapol Obrázek produktu PLA filament jasně oranžový 1,75 mm, 1 kg [online]. In: *Aurapol – produktová stránka* [cit. 2026-02-04].
Dostupné z: <https://www.aurapol.com/cz/p/aurapol-pla-3d-filament-jasne-oranzova-1-kg-1-75-mm/>
- STŘÍTESKÝ, Ondřej, PRŮŠA, Josef a BACH, Martin. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. 1. vydání. Praha: Prusa Research a.s., 2019. Grafická úprava a sazba: Petr Memory Dragoun.
- BÁRTOLO, Paulo Jorge, ed. *Stereolithography: Materials, Processes and Applications* [online]. New York: Springer, 2011 [vid. 2026-02-05]. ISBN 978-0-387-92904-0. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-92904-0>
- FORMLABS. *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing* [online]. Formlabs [vid. 2026-02-05]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>

- ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. 2. vyd. Ženeva: International Organization for Standardization, 2021.
- GIBSON, Ian, David ROSEN, Brent STUCKER a Mahyar KHORASANI. Additive Manufacturing Technologies. 3. vyd. Cham: Springer, 2021. ISBN 978-3-030-56127-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- PHROZEN. Phrozen Lumii DLP [obrázek online]. 3DJake, © 2010–2026 [cit. 2026-02-06]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/phrozen/lumii-dlp?sai=21295>
- PAGAC, Marek, Jiri HAJNYS, Quoc-Phu MA, Lukas JANCAR, Jan JANSKA, Petr STEFEK a Jakub MESICEK. A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers* [online]. 2021, 13(4), 598 [cit. 2026-02-06]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- QUAN, Haoyuan, Ting ZHANG, Hang XU, Shen LUO, Jun NIE a Xiaoqun ZHU. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials* [online]. 2020, 5(1), 110–115 [cit. 2026-02-06]. ISSN 2452-199X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>
- REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-90-827485-0-5.
- NGO, T. D., A. KASHANI, G. IMBALZANO, K. T. Q. NGUYEN a D. HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, 143, 172–196 [cit. 2026-02-06]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- XAVIER, Matheus S., FLEMING, Andrew J. a YONG, Yuen K. Finite Element Modeling of Soft Fluidic Actuators: Overview and Recent Developments. *Advanced Intelligent Systems* [online]. 2021, 3(2), 2000187 [cit. 2026-03-18]. Dostupné z: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aisy.202000187>
- DILIBAL, Savaş, SAHIN, Haydar, DANQUAH, Josiah Owusu, EMON, Md Omar Faruk a CHOI, Jae-Won. Additively Manufactured Custom Soft Gripper with Embedded Soft Force Sensors for an Industrial Robot. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2021, 22(4), 709–718 [cit. 2026-03-18]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00479-0>
- KOMPRESORY VZDUCHOTECHNIKA, 2026a. Regulátor tlaku kovový B2 do 18 bar 1/4" [online]. [cit. 2026-03-21]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/regulator-tlaku-kovovy-b2-do-18-bar-1-4-/>
- KOMPRESORY VZDUCHOTECHNIKA, 2026b. Manometr zadní 0-2,5 bar 40 1/8" [online]. [cit. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/manometr-zadni-0-2-5-bar-40-1-8/>
- KOMPRESORY VZDUCHOTECHNIKA, 2026c. Uzavírací ventil s odvětráním 6 mm [online]. [cit. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/uzaviraci-ventil-s-odvetranim-6/>

- SPECTRUM FILAMENTS. Technical Data Sheet: Spectrum S-Flex 98A [online]. 6. 4. 2022a [cit. 2026-03-26]. Dostupné z: https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2022/05/en_tds_spectrum_sflex_98a.pdf
- SPECTRUM FILAMENTS. Technical Data Sheet: Spectrum S-Flex 90A [online]. 6. 4. 2022b [cit. 2026-03-26]. Dostupné z: https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2022/05/en_tds_spectrum_sflex_90a.pdf
- SPECTRUM FILAMENTS. Technical Data Sheet: Spectrum S-Flex 85A [online]. 6. 4. 2022c [cit. 2026-03-26]. Dostupné z: https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2022/05/en_tds_spectrum_sflex_85a.pdf
- ČSN ISO 37 (621436). Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tahových vlastností. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA. Vybavení [online]. Jihlava: Laboratoř experimentálních měření [cit. 2026-03-28]. Dostupné z: <https://laborator.vspj.cz/vybaveni.php>
- KOMPRESORY-VZDUCHOTECHNIKA.CZ. Přímá spojka s vnějším metrickým závitem 6 - M5 [online]. 2026d [cit. 2026-04-01]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/prime-sroubeni-6-m5/>