

ŠKODA AUTO VYSOKÁ ŠKOLA o.p.s.

Studijní program: Průmyslový management

**Volba vhodného výrobního postupu pedálu
spojky závodního vozidla s využitím
technologie 3D tisku**

Bakalářská práce

Adéla Staňková

Vedoucí práce: Ing. Josef Bradáč, Ph.D.



ŠKODA AUTO Vysoká škola

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zpracovatelka: **Adéla Staňková**

Studijní program: Průmyslový management

Název tématu: **Volba vhodného výrobního postupu pedálu spojky
závodního vozidla s využitím technologie 3D tisku**

Cíl: Cílem bakalářské práce je navrhnout vhodné parametry 3D tisku pro výrobu pedálu spojky závodního vozidla Škoda. Následně vyrobený komponent otestovat a zhodnotit pomocí vybraných experimentálních zkoušek.

Rámcový obsah:

1. Charakteristika automobilu a jeho hlavních částí, pedál spojky.
2. Technologie 3D tisku, materiály využívané pro výrobu komponentů.
3. Návrh parametrů 3D tisku a postupu testování vyrobeného dílu.
4. Vlastní testování a zhodnocení, závěrečné doporučení.

Rozsah práce: 25 – 30 stran

Seznam odborné literatury:

1. KOLAŘÍK, Ladislav; BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Technologie zpracování plastů a kompozitů*. 1. vyd. České vysoké učení technické v Praze, Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2020. 161 s. ISBN 978-80-01-06722-2.
2. KOVANDA, Jan; A KOLEKTIV AUTORŮ. *Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05893-0.
3. *Fundamentals of Automobile Body Structure Design: An SAE Core Title*. SAE International, 2020. 427 s. ISBN 978-1-4686-0174-9.
4. *Primer on automotive lightweighting technologies*. CRC Press, 2021. 184 s. ISBN 9780815357131.

Datum zadání bakalářské práce: prosinec 2022

Termín odevzdání bakalářské práce: prosinec 2023

L. S.

Elektronicky schváleno dne 2. 5. 2023

Adéla Staňková

Autorka práce

Elektronicky schváleno dne 2. 5. 2023

Ing. Josef Bradáč, Ph.D.

Vedoucí práce

Elektronicky schváleno dne 2. 5. 2023

prof. Ing. Radim Lenort, Ph.D.

Garant studijního programu

Elektronicky schváleno dne 2. 5. 2023

doc. Ing. Pavel Mertlík, CSc.

Rektor ŠAVŠ

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval(a) samostatně a použité zdroje uvádím v seznamu literatury. Prohlašuji, že jsem se při vypracování řídil(a) vnitřním předpisem ŠKODA AUTO VYSOKÉ ŠKOLY o.p.s. (dále jen ŠAVŠ) směrnicí Vypracování závěrečné práce.

Jsem si vědom(a), že se na tuto závěrečnou práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, že se jedná ve smyslu § 60 o školní dílo a že podle § 35 odst. 3 je ŠAVŠ oprávněna mou práci využít k výuce nebo k vlastní vnitřní potřebě. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna podle § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách.

Beru na vědomí, že ŠAVŠ má právo na uzavření licenční smlouvy k této práci za obvyklých podmínek. Užiji-li tuto práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, mám povinnost o této skutečnosti informovat ŠAVŠ. V takovém případě má ŠAVŠ právo ode mne požadovat příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to až do jejich skutečné výše.

V Mladé Boleslavi dne

Děkuji Ing. Josefu Bradáčovi, Ph.D. za odborné vedení závěrečné práce, poskytování rad a věnovaný čas. Dále bych chtěla poděkovat svým kolegům ze Škoda Motorsport za poskytnutí odborných podkladů a současně mým blízkým za podporu.

Obsah

Úvod.....	7
1 Koncept automobilu.....	8
2 Výroba komponentů vozidel.....	10
2.1 Výrobní technologie.....	10
2.2 Materiály pro výrobu vozidel.....	11
2.3 Požadavky na výrobu komponentů v automobilovém průmyslu.....	14
3 Technologie 3D tisku.....	15
3.1 Využití 3D tisku.....	16
3.2 Kategorizace technologie 3D tisku.....	17
3.3 Proces 3D tisku.....	19
3.4 Materiály pro 3D tisk.....	20
4 Návrh výroby spojkového pedálu pro závodní automobil.....	22
4.1 Spojkový pedál automobilu.....	22
4.2 Materiály pro 3D tisk spojkového pedálu.....	23
4.3 3D tiskárna pro výrobu spojkového pedálu.....	24
4.4 Návrh parametrů tisku spojkového pedálu.....	24
4.5 Návrh testování vytištěného spojkového pedálu.....	29
5 Testování vytištěného spojkového pedálu.....	31
5.1 Jednotlivé varianty nastavení tiskových parametrů.....	31
5.2 Výsledky testování spojkového pedálu.....	33
5.3 Výpočet síly a momentu síly.....	35
5.4 Vyhodnocení testování a závěrečná doporučení.....	37
Závěr.....	39
Seznam literatury.....	40
Seznam obrázků a tabulek.....	42

Seznam použitých zkratk a symbolů

ABS	Akrylonitril butadien styren
CAD	Computer Aided Design
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Desposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
PETG	Polyethylentereftalát glykolem
PLA	Polylaktidová vlákna
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolitografie

Úvod

K udržení konkurenceschopnosti v odvětví automotive je důležité stále sledovat trendy a implementovat inovace. Jednou z moderních technologií je výroba pomocí 3D tisku. Tato metoda umožňuje produkci komponentů, které by byly konvenčními postupy nedosažitelné. Aditivní proces se vyznačuje příznivými vlastnostmi, jako je například nízká časová náročnost na aplikovatelnost změn a možnost detailnějšího zpracování výrobků.

Cílem této práce je zvolit vhodný výrobní postup spojkového pedálu v závodním voze Škoda Fabia RS Rally2 s využitím technologie 3D tisku.

V teoretické části je uveden koncept automobilu, přehled vybraných konvenčních a moderních výrobních technologií a materiálů s tímto spojených. V kapitole o technologii 3D tisku je podrobně popsáno využití, kategorizace, proces a materiály této metody.

V praktické části je uveden popis konkrétního spojkového pedálu, volba materiálů, typ 3D tiskárny a příslušný program, ve kterém jsou rozebrány nastavitelné parametry. Dále je zde navržen vhodný způsob testování a je definován použitý testovací okruh. Po samotném vytištění dílů nastává jejich testování, přičemž výsledné údaje jsou zpracovány v programu Microsoft Excel, graficky znázorněny a dále uplatněny pro výpočet síly a momentu síly. Veškeré výsledky jsou zkompletovány a strukturovány. Na základě výsledků jsou následně navržena opatření a možné budoucí směry vývoje v dané oblasti.

1 Koncept automobilu

Automobil, jak je znám dnes, je pro dnešní společnost neodlučitelnou součástí života. Tomu však předcházela spousta práce a inovací. Oproti jiným vynálezům ale vývoj automobilu stoupá neuvěřitelnou rychlostí.

Historie samohybných vozidel začala na konci 18. století, kdy Francouz N. J. Cugnot vynalezl první vůz poháněný parou. Během následujícího století se parní stroje zdokonalovaly a začaly být vyvíjeny motory spalovací. Na konci 19. století byl N. A. Ottem uveden do pohybu prvotní spalovací motor, který dal základ modernímu čtyřdobému benzinovému motoru. Následně byly sestaveny první automobily s tímto motorem. Původními konstruktéry byli K. Benz, W. Maybach a G. Daimler. V Čechách byl vyroben první automobil, pojmenovaný President, v roce 1898 v Kopřivnické vozovce později zvané Tatra. Mezi další firmy, které přispěly k rozmachu automobilového průmyslu v Českých zemích, se řadí Laurin a Klement, Praga a Sodomka.

Výroba automobilů se postupně rozšířila do celého světa a jejich konstrukce prošla řadou změn. Klíčové změny v průběhu let nastaly zvýšením výkonu a bezpečnosti, snížením hmotnosti a redukcí škodlivých plynů.

Automobil se skládá ze tří základních částí, a to karoserie, podvozku a hnací soustavy.

Karoserie je nosná konstrukce vozidla, která patří k podvozku a disponuje prostorem pro přepravované osoby a náklad. Jedná se o kostru vozidla tvořenou rámem spojeným s odmontovanými díly. Na tento rám se pak připojují další systémy.

Podvozek se na vozidle nachází ve spodní části automobilu a patří k němu zavěšení kol, kola a pneumatiky, brzdy, pérování a řízení. Všechny tyto prvky zajišťují bezpečnost jízdy vozidla a určují jeho dynamiku (Vlk, 2003).

Brzdová soustava slouží k regulaci rychlosti, a to ke zpomalení nebo zastavení nebo k udržení vozidla v konstantním pohybu při jízdě ze svahu. Jedná se o aktivní bezpečnostní prvek zajišťující brzdění provozní, nouzové a parkovací.

Hnací soustava zajišťuje pohyb vozidla a vytváří energii přenášenou na kola. Skládá se z motoru, spojky, převodovky, rozvodné soustavy a hnacího řízení. Existují různé

druhy uspořádaní hnací soustavy, nejrozšířenější je pohon předních kol s motorem vpředu. Dále může být pohon zadních kol nebo všech čtyř kol.

Kromě těchto hlavních částí se v automobilech nachází různá příslušenství, výbava a doplňky.

Trendem dnešní doby je vývoj alternativních pohonů. Nejfrekventovanějším je elektrický pohon, který se dělí na několik druhů – mild-hybrid, hybrid, plug-in hybrid, čistě elektrický a elektrický s vodivým palivovým článkem.

2 Výroba komponentů vozidel

Technologie výroby jednotlivých komponentů se v průběhu let významně změnily. Aplikace nových technologií umožňuje, aby výroba probíhala rychleji, přesněji a s nižšími náklady.

Vzhledem k tomu, že je automobil sestaven z mnoha různých součástek vyhotovených z odlišných materiálů, je pro jejich výrobu zapotřebí využívat řadu technologií. Mezi hlavní způsoby výroby komponentů patří svařování, lisování, slévání a obrábění.

2.1 Výrobní technologie

V automobilovém průmyslu existuje řada výrobních technologií, které mají své výhody a nevýhody. Jejich volba závisí na požadované kvalitě komponentu. Uvedeny jsou pouze vybrané s největším významem v tomto odvětví.

Svařování, jakožto jedna z nejpoužívanějších technologií spojování kovů a nekovů, je aplikovatelné na materiály s podobnými či různými mechanickými a fyzikálně-chemickými vlastnostmi. Na svařovaný materiál se působí teplotním nebo deformačním účinkem.

„Svařování je definováno jako nerozebíratelné spojování dvou částí kovů pomocí tepla při teplotě tavení obou materiálů nebo tlaku vyvolávající deformaci kontaktních ploch.“ (Ambrož, Kandus, & Kubíček, 2001, str.7).

Existují různé metody svařování. V automobilovém průmyslu se využívá například svařování elektrickým odporem, které rychle a efektivně svařuje tenký materiál. Dochází ke spojování kovových částí pomocí elektrického proudu protékajícího v materiálu ohřívajícího se vlivem odporu. Tuto metodu lze aplikovat při výrobě karoserií a spojování ocelových a hliníkových částí.

Lisování je výrobní proces, při němž dochází k požadované změně tvaru výrobku nebo polotovaru v důsledku působení vnějších sil. Touto technologií je možno zhotovit určitou součást při nízkých výrobních nákladech a krátké výrobní době (Dobrovolný, 1952).

Jelikož je lisování rychlé, efektivní a přesné, má uplatnění i v automobilovém průmyslu při výrobě karosářských dílů, dveří, kapoty, podvozku atd.

Dalším procesem je odlévání založené na nalévání kapalného kovu do forem, kde se ochladí a následovně tuhne do požadovaného tvaru. Tato technologie se uplatňuje při výrobě různých kovových komponentů, jakými jsou například bloky motorů, převodovky nebo brzdové kotouče. Výhodou této metody je možnost odlévání složitých tvarů s vysokou přesností a snížení finančních nákladů v sériové výrobě. Nevýhodou je vysoká spotřeba energie a emise oxidů dusíku a síry během procesu.

Jednou z novějších technologií vyskytujících se v automobilovém průmyslu je 3D tisk. Umožňuje tvorbu třírozměrných komponentů pomocí speciálních tiskáren. Tento proces je využíván u prototypů, interiérů vozidel a na náhradní díly. Umožňuje vytvořit přesně a rychle komponenty menších rozměrů. Nevýhodou je limitovaná velikosti komponentů a kvalita materiálů, které jsou pro tisk dostupné. Téma technologie 3D tisku je podrobněji rozebráno v kapitole 3.

2.2 Materiály pro výrobu vozidel

Typický automobil je složen z několika stovek součástí vyráběných z různých materiálů. Často používanými materiály jsou kov, sklo, plast a bio materiál. Odlišné složení mají pneumatiky, které jsou složeny převážně z elastomerů, přísad do kaučukových směsí, kordů z přírodních a chemických vláken, kordů z ocelových vláken a ocelového patního lana. Tyto materiály musí splňovat několik kritérií, jakými jsou pevnost, odolnost vůči korozi, nízká hmotnost a estetický vzhled (Malen, 2020).

Z kovů se velmi často využívá železo, které je čtvrtým nejrozšířenějším prvkem na Zemi.

„Čisté železo je poměrně měkký a kujný kov stříbřité barvy, který taje při teplotě 1535°C. Je feromagnetické, ale při vyšších teplotách (nad 798°C) tuto vlastnost ztrácí.“ (Honza, Mareček, 2014, str. 59).

„Surové železo, které bývá též označováno jako litina, obsahuje větší množství příměsí, hlavně uhlík (více než 3 %), křemík, mangan a fosfor. Je křehké, a proto se z velké části zpracovává na ocel.“ (Honza, Mareček, 2014, str. 59).

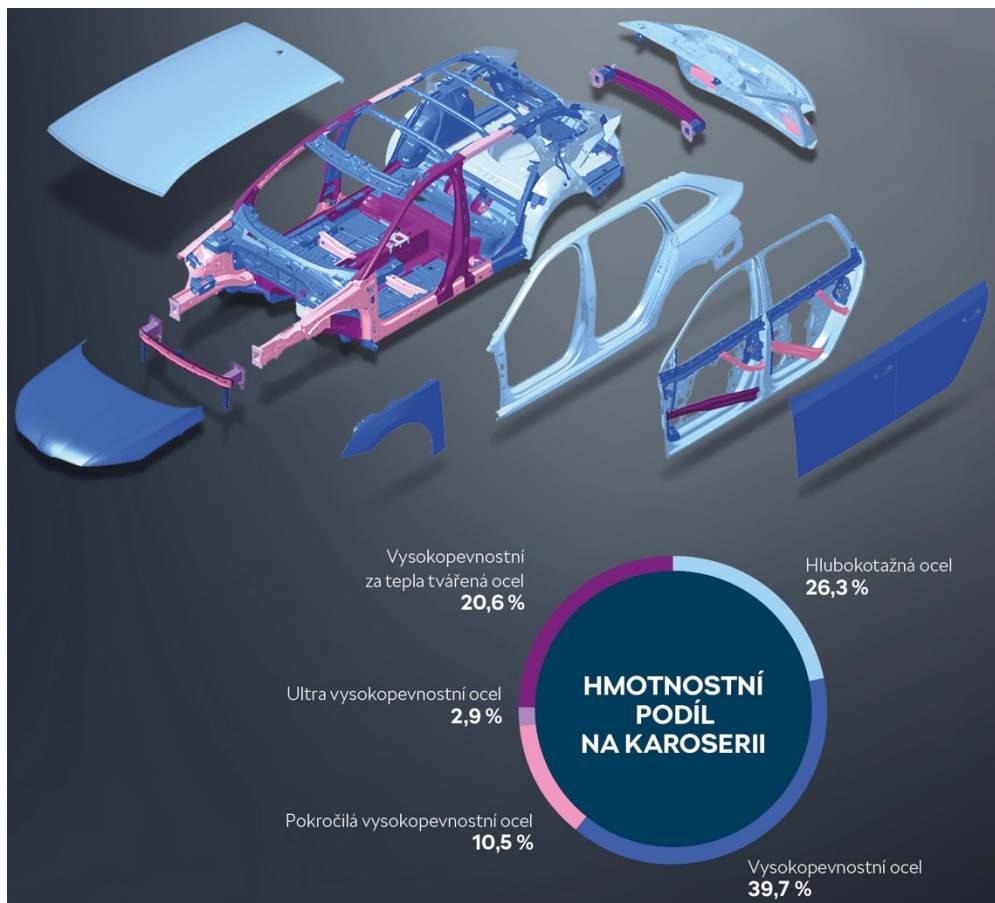
Mechanickým zpracováním je možné významně ovlivňovat vlastnosti oceli. Legováním se do oceli přidávají příměsi jako vanad, chrom nebo wolfram, čímž se zvyšuje odolnost při vyšších teplotách a korozi.

Ocel se uplatňuje zejména při výrobě karoserie a rámu, protože vysoká pevnost zajišťuje dostatečnou bezpečnost a odolnost v případě dopravních nehod. Jaké konkrétní typy ocelí a jejich hmotnostní podíl vyskytující se u karoserie Škoda Octavia lze vidět na obrázku 1. Ocel se rovněž nachází v motorových komponentech, převodovkách a brzdových kotoučích.

„Mezi nejvýznamnější lehké kovy využívané pro automobilové aplikace lze bezesporu zařadit hliník včetně jeho slitin. Obecně řečeno atraktivita hliníku je založená především na jeho nízké hustotě, a tedy možnosti snížení hmotnosti automobilových komponentů. Náklady oproti oceli jsou však téměř trojnásobné a ceny hliníku na světových trzích se neustále mění.“ (Kovanda a kol., 2015, str. 183).

Hliník je uplatňován při výrobě motorů, kde je klíčová jeho nízká hmotnost. Nevýhodou hliníku je vyšší cena a větší nároky na výrobní procesy.

Dalšími frekventovanými kovy u automobilových komponentů jsou titan, molybden, wolfram, měď nebo chrom.



Zdroj: (Škoda Auto a.s., 2022)

Obr. 1 Materiálová struktura ocelí u karoserie vozu Škoda Octavia

Sklo, zpracovávané z křemičitého písku, sody, uhličitánu draselného a vápence, se používá na výrobu oken, zrcátek a některých elektrických vybavení. Tato skla mají většinou bezpečnostní úpravu, aby byla odolnější vůči nárazu.

Další dosti užívaný materiál je plast nahrazující kovové díly. Potřeba vyměnit kov za plast má hned několik důvodů. Prvním je úspora energie při zpracování těchto surovin. Plasty jsou energeticky méně náročné, jelikož při jejich výrobě není potřeba tak vysokých teplot narozdíl od kovů. Další výhodou je snížení hmotnosti, čímž se snižuje spotřeba a zvyšuje rychlost vozu. U plastů je pak náročnější řešit technické požadavky na tepelnou odolnost, které nejsou tolik příznivé jako u kovů.

Jedním z nejčastěji aplikovaných plastů je polypropylen, částečně krystalický materiál patřící do skupiny polyolefinů. Polypropylen je vhodný z několika důvodů, jakými jsou nízká hmotnost, mírná ekologická zátěž při výrobě i zpracování a snadná recyklovatelnost. Zároveň splňuje ekonomickou výhodnost i estetickou a mechanickou variabilitu. Polypropylen se nachází v automobilech konkrétně

u nárazníků, spoilerů nebo u obložení kabiny (Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Knihovna, 2011).

Využití v automobilovém průmyslu má i kompozitní materiál, uplatňovaný zejména u závodních vozidel.

„Kompozitní materiál (kompozit) je tedy kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Jednotlivé složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti.“ (Krebs, Kolařík, Stunová, 2020, str. 8).

Mezi méně používané suroviny patří zlato, stříbro a platina, nacházející se zejména v moderních technologiích, elektronických komponentech a senzorech.

2.3 Požadavky na výrobu komponentů v automobilovém průmyslu

S vývojem automobilů se mění i trendy v požadavcích na automobilový průmysl. Nároky na výrobu se snaží přizpůsobovat potřebám dnešní doby a ostatním odvětvím ovlivněných automobilovým průmyslem. Zákazníci se stávají náročnějšími a od výrobců očekávají vybavenější automobily za přijatelnou cenu. U dodavatelů je vytvořeno silné konkurenční prostředí, které se stále rozrůstá.

Prvním z požadavků na výrobu je efektivita měřitelná ukazatelem efektivity OEE (celková efektivita zařízení). Tato metoda zahrnuje tři posuzované prvky: dostupnost, výkon a kvalitu následně vyjádřené součinem v procentuální hodnotě. Díky tomu je možno vidět komplexní přehled a odhalit slabá místa výroby.

Nároky na vlastnosti produktu jsou dalším klíčovým kritériem. Odlišné kategorie výrobků musí splňovat konkrétní normy. Ty se mohou týkat například oblasti zdraví, bezpečnosti a životního prostředí z pohledu samotného výrobku, způsobu výroby nebo výkonnosti produktu. Velmi známou normou je emisní norma, která stanovuje přípustný obsah škodlivých látek ve výfukových plynech automobilových motorů. Důležité jsou i technické specifikace, jež jsou limitovány na rozměry, chemické složení využitých materiálů, odolnost vůči teplotě, stabilitu atd.

Neméně důležitým požadavkem na výrobu je udržitelnost, tedy snaha o hospodářský a společenský rozvoj v souladu s životním prostředím pro současné i budoucí generace (Škoda Auto a.s., 2023).

„Udržitelný rozvoj byl vymezen zprávou „Naše společná budoucnost“ (zprávou Brundtlandové), vydanou v roce 1987 Světovou komisí pro životní prostředí a rozvoj jako „vývoj, který splňuje potřeby současnosti, aniž by ohrozil schopnost budoucích generací uspokojovat své potřeby“. Zpráva představila tři základní dimenze udržitelnosti: hospodářský růst, ochranu životního prostředí a sociální rovnost.“ (Bradáč a kol., 2022, str. 120).

Mezi cíle udržitelného rozvoje patří odpovědná výroba a spotřeba, čili zajištění udržitelné spotřeby a výroby, nebo klimatická opatření, čímž je myšleno přijetí bezodkladných opatření na boj se změnou klimatu a zvládnutí jejich dopadů (Bradáč a kol., 2022).

Ve velkých továrnách je dalším požadavkem automatizace. Čtvrtá průmyslová revoluce je úzce spjata s automatizovanou výrobou, kde jsou vyspělé stroje do určité míry schopny nahrazovat lidskou práci. Významnou roli zde hrají kybernetické systémy, počítačové technologie a automatizované stroje doplněné o síťové připojení a internet, které umožňují menší zásahy člověka do výroby, což šetří čas a zajišťuje přesnější proces výroby.

S automatizací značně souvisí i robotizace, která je v automobilovém průmyslu hojně využívána na montážní lince, při testování, kontrole kvality, skladování, logistice atd. Roboti mohou simulovat části lidského těla, např. ruce pro úchop a přenášení součástí. Hlavními benefity jsou úspora nákladů a zvyšování produktivity.

3 Technologie 3D tisku

Technologie 3D tisku je moderní proces výroby zhotovující trojrozměrné pevné předměty pomocí 3D tiskárny. Jedná se o automatizovaný aditivní proces, při němž je materiál postupně po vrstvách přidáván a vzájemně spojován pomocí tavení nebo lepení, dokud není dosaženo požadovaného tvaru (Echempati, 2021).

V posledním desetiletí je zaznamenán rozmach technologie 3D tisku. Tiskárny se spolu s materiály neustále vyvíjí a přecházejí z firemního prostředí mezi běžné uživatele. Je tomu tak z důvodu variability využití, rozmanitosti tvarů a nízkých nákladů na samotný tisk.

Roku 1984 Charles W. Hull nechal patentovat technologii stereolitografie, čímž vznikl 3D tisk. Tato metoda je známa pod zkratkou SLA a dodnes je uplatňována jako jedna z nejpřesnějších. Charles W. Hull se stal zároveň zakladatelem společnosti 3D Systems, která vyrobila a prodala první komerčně dostupnou 3D tiskárnu.

3.1 Využití 3D tisku

V počátcích byl 3D tisk využíván zejména na výrobu prototypů. Výrobci si mohli takovýmto prototypem vyzkoušet přesnost většiny parametrů a zadávat je pak do výroby s větší jistotou. Tím bylo možné omezit náklady a čas na přípravu sériové výroby.

S rozvojem technologií přišlo snížení cen a rozšíření možností 3D tisku, čímž se tato technologie stala vhodnou pro malosériovou výrobu. Pokud výrobce není ochotný vynaložit vysoké náklady spojené s výrobou (výroba forem, zadání výroby, testovací série ...), stává se 3D tisk dostupnější variantou. U takovéto výroby je výhodou rychlost přenesení změny, jelikož stačí pouze upravit 3D model.

3D tisk má významnou roli ve stavebnictví a architektuře, kde je vizualizace podstatným prvkem. Vnímání prostoru lze snáze zprostředkovat pomocí 3D modelu, který je sice možné ručně sestavit, ale časově příznivější je onen model zadat do 3D tisku.

Ve zdravotnictví je možno se setkat s 3D tiskem v rámci diagnostiky, předoperačních a operačních pomůcek nebo kyčelních, lebečních a zubních implantátů.

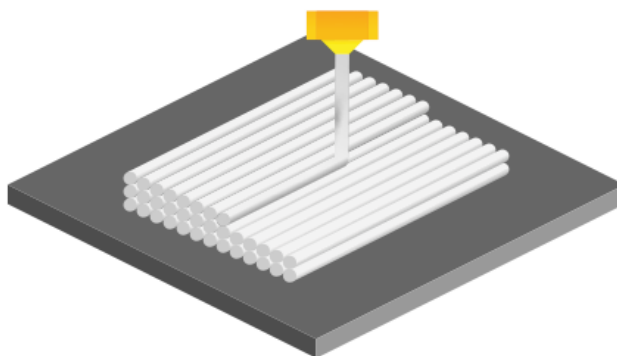
V automobilovém průmyslu je technologie 3D tisku využívána pro výrobu prototypů a modelů, které slouží pro identifikaci potenciálních konstrukčních chyb. Další možností využití aditivní technologie je při aerodynamickém testování. Aplikovatelná je také na předvýrobní vzorkování a výrobu nástrojů. Tímto způsobem se dají rychle vyrobit různé formy, nástroje, držáky a přípravky (Moto Focus, 2022).

3D tiskem jsou vyráběny některé speciální díly, např. pro závodní vozidla. Jedná se o díly vyžadující nízkou hmotnost či speciální parametry. Tyto výrobky zaručují zvýšení efektivity a výhodné využití materiálu i designu, což může vést k prospěchu.

3.2 Kategorizace technologie 3D tisku

Aktuálně neexistuje jedna univerzální technologie 3D tisku, ale jednou z variant je kategorizace dle tiskového materiálu a způsobu jeho zpracování na extrudovaný materiál v podobě tiskové struny, tekutého materiálu a práškového materiálu.

Extrudovaný neboli vytlačovaný materiál v podobě tiskové struny (filamentu) je nejrozšířenější a nejdostupnější technologií 3D tisku. Jak je možno vidět na obrázku 2, filament je postupně vytlačován tiskovou hlavou a nanášen na sebe vrstvu po vrstvě. Práce s filamentem je poměrně jednoduchá a bezpečná, ale na výtisku jsou patrné tiskové vrstvy. Příkladem jsou technologie Fused Filament Fabrication (dále jen FFF) a Fused Deposition Modeling (dále jen FDM), vhodné pro tisk funkčních modelů a prototypů. Metodu FFF a FDM lze považovat za synonyma. Jelikož zkratka FDM je registrovaná ochranná značka firmy Stratasys, ostatní výrobci používají zkratku FFF. Primárně využívaným materiálem je roztavený termoplast ve formě strun nejčastěji o průměru 1,75 mm (Průmyslové spektrum, 2022).



Zdroj: (Stříteský, Průša, Bach, 2020, str. 11)

Obr. 2 Vrstvení filamentu metodou FDM/FFF

Další kategorií je zpracování tekutého materiálu, který se používá ve stereolitografii (dále jen SLA).

„SLA technologie je založena na principu vytvrzování světlicové pryskyřice pomocí světla. Podložka se při každé vrstvě posune a proběhne vytvrzení fotopolymery na požadovaných místech. Tisk je v porovnání s FFF tiskárnami detailnější, ale typicky trvá déle a tisková plocha je menší. Tyto tiskárny si najdou uplatnění především v medicíně a šperkařství. Tisk je takřka ideálně hladký, detailní a nejsou

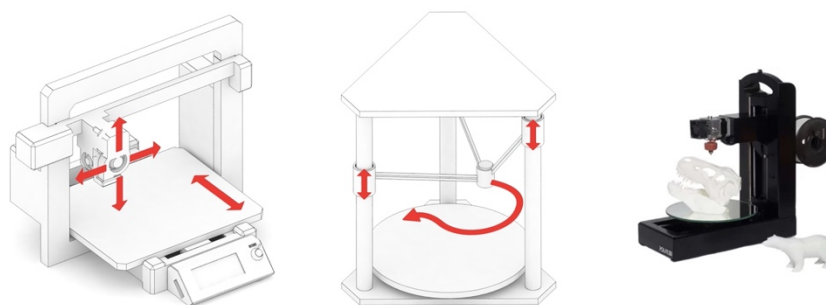
na něm tak patrné vrstvy materiálu, jak je tomu zvykem u FFF tiskáren.“ (Stříteský, Průša, Bach, 2022, str. 16).

Poslední méně rozšířenou technologií je tisk pomocí práškového materiálu Selective Laser Sintering (dále jen SLS) a Direct Metal Laser Sintering (dále jen DMLS). Novými vrstvami je nanášen materiál jemného prášku a ten se laserem spéká. Po vytištění zůstane model zasypán tiskovým materiálem, který je otvorem vysypán. Materiál je možné použít v následujícím tisku a odpad je zde minimální (Stříteský, Průša, Bach, 2022).

Některé metody 3D tisku, jako je FDM, SLA, SLS, jsou vhodné pro plasty a jiné, jako je DMLS a Selective Laser Melting (dále jen SLM), pro kovy.

Jelikož tiskárny fungují v trojrozměrném prostoru, lze je dělit na kategorie dle způsobu pohybu hlavy na kartézskou (na obrázku 3 vlevo), delta (na obrázku 3 uprostřed) a polar tiskárnu (na obrázku 3 vpravo).

Kartézská tiskárna souvisí se soustavou, kde jsou na sebe tři přímky vzájemně kolmé a protínají se v jednom bodě. Tato tiskárna se tedy pohybuje po třech lineárních osách, a to takovým způsobem, že hlava vytlačující materiál se pohybuje po ose X a Z a podložka po ose Y.



Zdroj: (Stříteský, Průša, Bach 2020)

Obr. 3 Typy tiskáren dle pohybu v trojrozměrném prostoru

Tiskárna delta pracuje na principu zavěšení extruderu na třech ramenech a pohybuje se převážně v ose Z. Ačkoliv jsou jeho výhodami rychlé pohyby a rozsáhlý tiskový prostor, je shledána náročnost na geometrii. Je potřeba zvýšené přesnosti při stavbě a kalibraci tiskárny i výpočtech pro pohyby krokových motorů jednotlivých ramen (Stříteský, Průša, Bach, 2022).

Posledním typem je tiskárna polar sestavená pro polární pohyb tiskové hlavy ve dvou osách a rotační pohyb podložky. Nejedná se o příliš častý systém a příprava modelu pro tisk je značně komplikovanější.

3.3 Proces 3D tisku

3D tisk probíhá ve třech základních krocích: zajištění 3D modelu, příprava modelu ve sliceru a samotný proces tisknutí.

Trojrozměrný model je možno získat stažením hotového návrhu z internetu, vymodelováním vlastního modelu nebo 3D naskenováním existujícího předmětu.

Vlastní výrobek je možné vymodelovat v Computer Aided Design (dále jen CAD) programu obsahujícím grafické, geometrické, matematické a inženýrské nástroje. Mezi nepoužívanější patří Fusion 360, Freecad a Blender.

Při modelování je zapotřebí dodržovat určitá pravidla, například zvážení orientace modelu na podložce. Plocha produktu umístěná na podložce je hladká a rovná, zatímco plocha na podpěrách nekonzistentní a hrubá. Z tohoto důvodu je vhodné minimalizovat podpěry, čímž je ušetřen materiál, čas tisku i čas vynaložený na odstranění podpěr. U výtisku je také potřeba dbát na směr. Ve směru s rovnoběžnými vrstvami je pevnost menší než kolmo na vrstvy. Orientace kolmo k tiskové podložce bude vhodnější pro kulaté otvory (Stříteský, Průša, Bach, 2022).

Jeden z nejvyužívanějších formátů pro 3D model je STL, který popisuje geometrii povrchu trojrozměrného objektu. Tento formát je schopný definovat mnohostěny tvořené různými mnohoúhelníky, což však není pro 3D tisk v takové míře potřebné. Pro tisk se zatím využívají pouze neprotínající se trojúhelníky spojené dvěma stěnami.

Formát STL je vstupem do sliceru, což je program rozdělující 3D model na tenké vrstvy kódované v programovacím jazyce G-kód. Tento jazyk vytváří příkazy pro tiskárnu, určuje jaký nástroj použít, jakou rychlostí se má pohybovat a co má dělat. Soubor ve formátu G-kód je tedy výstupem sliceru. Slicování ovlivňuje kvalitu, pevnost a dobu tisku a umožňuje modifikaci rozsahu, otáčení dle os, řezání, rozdělování či rozmísťování na tiskové ploše.

Mezi nastavitelnými parametry sliceru jsou teplota filamentu a podložky, výška vrstvy, perimetry, plné vrstvy, výplň, podpěry, přemísťování, límec, obrys, raft, chlazení a další pokročilá nastavení.

Dobu tisku významně ovlivňuje výška vrstvy. Vyšší vrstva znamená viditelnější rysy, ale kratší dobu tisknutí. Pro detailnější prvky se volí nižší vrstva, která značně prodlužuje čas.

Perimetry jsou ukazatelem toho, kolik vláken bude tvořit vytištěná obvodová stěna modelu, jejíž šířka bude součin počtu perimetrů a průměru trysky. Čím vyšší číslo, tím tlustější stěna, větší spotřeba materiálu a prodloužená doba tisku. U šikmé plochy stoupající pod malým úhlem dutého předmětu se však tímto ukotví vlákna na předešlou vrstvu.

Parametr plné vrstvy umožňuje nastavit počet spodních a vrchních plných vrstev (100% výplň). Výplň ovlivňuje dobu a pevnost tisku a spotřebu materiálu. Udává se v procentech a její vzor je měnitelný. Vnitřní výplň ovlivňuje strukturu prostorové mřížky prvku.

Poté co jsou nastaveny veškeré parametry dle potřeby výroby, je spuštěn samotný tisk. Tiskárna začne číst vygenerovaný G-kód a předává ho tiskárně. Po vytisknutí je možné produkt ihned používat nebo ho podrobit dalším úpravám. Předměty se dají složit, slepit, brousit, kytovat tmelem, laminovat či malovat.

3.4 Materiály pro 3D tisk

3D tiskárny obsahují náplň zvanou filament. Jedná se o tiskové struny nejen z plastu, ale i z kompozitních materiálů nebo příměsí kovů. Mezi nejobvyklejší filamenty patří polylaktidová vlákna (dále jen PLA), polyethylentereftalát glykolem (dále jen PETG) a akrylonitril styren butadien (dále jen ABS). Materiály pro 3D tisk zaznamenaly v posledních letech značný vývoj, čímž se ještě více rozšířily možnosti pro tuto technologii.

Nejrozšířenějším materiálem je PLA, jedná se o biologicky odbouratelný materiál z kukuřičného nebo bramborového škrobu či z cukrové třtiny. Je vhodný pro detailní i velkoplošný tisk, je dostupný v mnoha barvách a cenově se řadí mezi nejlevnější. Na druhou stranu je velmi tvrdý, snadno praskne a má malou teplotní a povětrnostní odolnost (TRILAB Group s.r.o., 2023).

Jelikož je PLA bezpečný pro lidské tělo, využívá se v biomedicině. Zároveň je bezpečný pro kontakt s potravinami, a proto má své uplatnění i v potravinářském průmyslu. Dále je implementován při prototypování, výrobě modelů a součástek.

PETG je termoplastický materiál zkombinovaný dobrými vlastnostmi PLA a ABS. Vyniká větší odolností, pevností, houževnatostí a je možné jej recyklovat.

PETG se využívá při průmyslovém prototypování, v automobilech při výrobě interiérových dílů a komponentů. Rovněž je bezpečný pro kontakt s potravinami, a proto se uplatňuje při výrobě lahví, nádob a obalů.

ABS materiál je termoplastický polymer vhodný pro výrobky, u kterých je důležitá pružnost, pevnost a odolnost proti nárazům i chemikáliím. Je užitečný i pro venkovní použití, protože je odolný proti povětrnostním vlivům a UV záření. Jeho nevýhodou je velká teplotní roztažnost způsobující kroucení a odlepování od podložky při tisku.

ABS je aplikovatelný v automobilovém průmyslu, při výrobě průmyslových nástrojů a zboží každodenního použití.

Existují materiály, které svou přísadou zlepšují mechanické, chemické, fyzikální i technologické vlastnosti. Jedním z takových materiálů je PETG Carbon, což je černá tisková struna s 15–30% podílem karbonu. Díky těmto vláknům disponuje finální produkt lepší pevností v tlaku, dobrou přilnavostí jednotlivých vrstev a nízkou hmotností.

4 Návrh výroby spojkového pedálu pro závodní automobil

V této práci byla zvolena technologie 3D tisku na výrobu spojkového pedálu v závodním voze Škoda Fabia RS Rally2 vyvíjeném ve Škoda Motorsport. Tento vůz vychází ze čtvrté generace vozu Škoda Fabia a patří mezi nejúspěšnější vozy soutěžní skupiny Rally2. Dominuje prvotřídní aerodynamikou a vysokou tuhostí karoserie.

Uvnitř vozu Škoda Fabia RS Rally2 se mimo jiné nachází hliníkový spojkový pedál, v současné době poskytován externím výrobcem. U aktuálního spojkového pedálu byly shledány možnosti pro autonomní výrobu a vylepšení vlastností. Vlastní výrobou spojkového pedálu se dosáhne zkrácení intervalu čekání na nový díl, rychlejšího dodání, nižší hmotnosti a cena zůstane ekvivalentní.

4.1 Spojkový pedál automobilu

Spojka je v hnacím ústrojí motorového vozidla umístěna jako rozpojitelný spojovací systém mezi motorem a mechanickou převodovkou (Gscheidle, 2015, str. 342).

Automobilová spojka slouží u automobilů s manuální převodovkou k zařazení vyššího či nižšího rychlostního stupně. Při zařazení dojde k sešlápnutí pedálu spojky. Při tomto úkonu dojde k rozpojení a přerušení přívodu točivého momentu z motoru na mechanickou převodovku.

Spojka je využívána při rozjíždění, přeřazení rychlostního stupně, zastavení a při tlumení torzního kmitání.

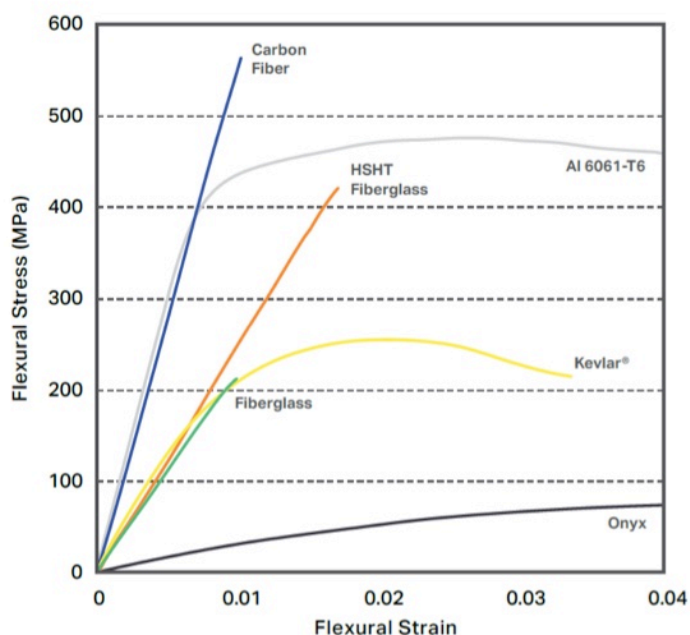
Spojkový pedál je součástí pedálové skupiny vozidla, která je složena ze tří pedálů – spojkového, brzdového a akceleračního. Spojkový pedál je vizuálně podobný brzdovému. Jelikož je ale spojkový pedál méně využíván, je rozměrově menší a hmotnostně lehčí. Ovládání je zajištěno spojkovým hydraulickým válcem nebo klasickým mechanickým ovládním pomocí lanka. V případě, že je konstrukce spojkového pedálu provedena s hydraulickým válcem, je pro přenesení vyvozené ovládací síly potřeba hydraulické kapaliny. Všechny pedály jsou ukotveny nejčastěji pomocí čepů ke kotvící desce a společně s dalšími díly tvoří funkční celek.

4.2 Materiály pro 3D tisk spojkového pedálu

Aktuální spojkový pedál je vyráběn z hliníkové slitiny EN AW 7075 s hlavním legujícím prvkem zinkem zvyšujícím pevnost výrobku. Dalšími legujícími prvky jsou hořčík a měď. Váha pedálu je 155 g a cena 67 USD.

Nový spojkový pedál vyrobený 3D tiskem obsahuje materiál onyx a kontinuální karbonové vlákno. Onyx je nylon vyztužený nasekanými uhlíkovými vlákny s možností vyztužení kontinuálním vláknem. Je vhodný pro výrobky, u kterých je potřeba povrchové úpravy, chemické odolnosti a teplotní tolerance. Dosahuje pevnosti v ohybu 81 MPa.

Uhlíkové vlákno má z nabízených vláken nejvyšší poměr pevnosti k hmotnosti, jeho pevnost v ohybu je 540 MPa. Na obrázku 4 je možno vidět graf, který na ose X znázorňuje proměnnou deformaci ohybem, na ose Y napětí v ohybu a modrá křivka zachycuje průběh deformace v ohybu u uhlíkového vlákna. Ostatní křivky popisují průběh deformace v ohybu pro další kontinuální vlákna nabízená společností SolidVision s.r.o.



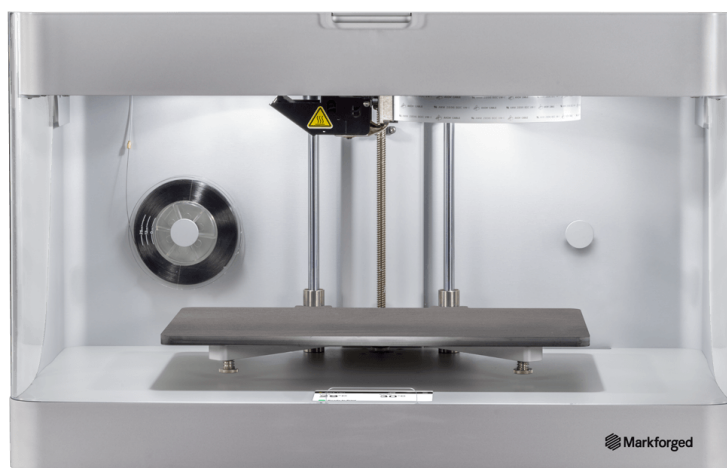
Zdroj: (SolidVision s.r.o., 2023)

Obr. 4 Graf průběhu deformace uhlíkového vlákna

4.3 3D tiskárna pro výrobu spojkového pedálu

Tiskárna využívaná při výrobě spojkového pedálu do vozu Škoda Fabia RS Rally2 se nazývá Markforged Mark Two. Proces tisku je metodou FFF s možností přidání kontinuálního vlákna. Mezi základní aplikovatelné materiály patří nylon a onyx a jako kontinuální vlákno může být využitý karbon, kevlar a sklené vlákno.

Tato tiskárna, k vidění na obrázku 5, je vhodná pro pevné díly, které nahrazují hliníkové součásti, prototypy, výrobní přípravky, montážní šablony a malé série funkčních dílů. Tiskový prostor má maximální šířku 320 mm, hloubku 132 mm, výšku 154 mm a hmotnost výsledného předmětu může být až 16 kg. Pro slicování je kompatibilní software Eiger.



Zdroj: (SolidVision s.r.o., 2023)

Obr. 5 3D tiskárna Markforged Mark Two

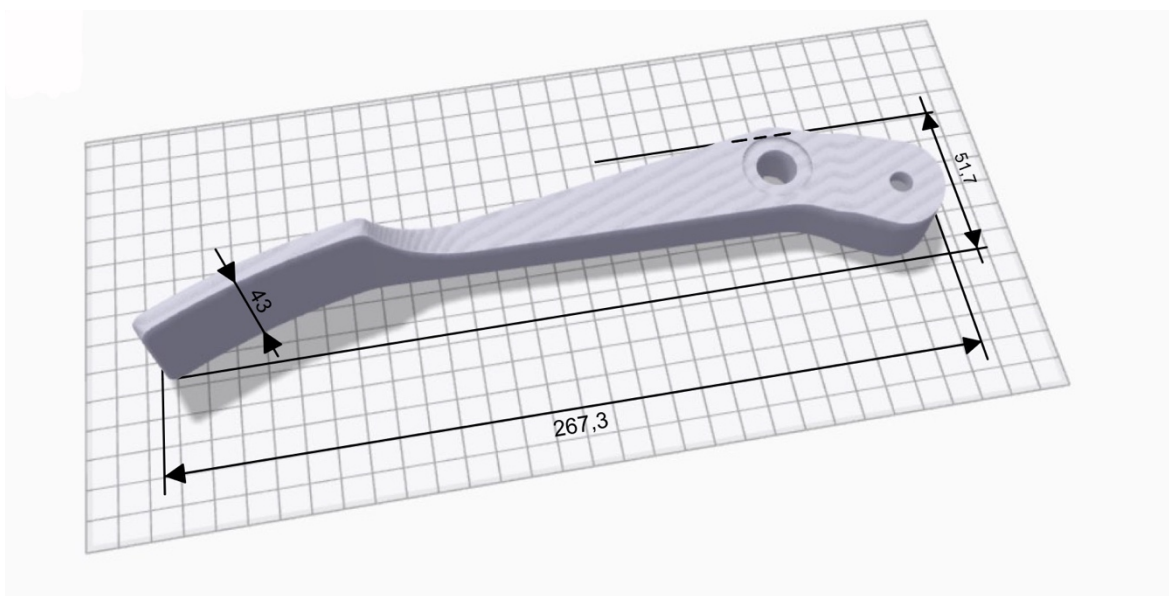
4.4 Návrh parametrů tisku spojkového pedálu

Nejprve je potřeba předem vytvořený CAD model spojkového pedálu ve formátu STL nahrát do příslušného softwaru pro slicování. Pro využívanou tiskárnu je příslušným programem Eiger.

V prvním kroku, po nahrání 3D modelu, je možno vidět odhadované parametry vytištěného výrobku, jakými jsou rozměry, doba tisku, celková hmotnost výrobku, hmotnost základního materiálu, hmotnost kontinuálního vlákna a cena. Dále se v základním nastavení vybere materiál, v tomto případě onyx, kontinuální uhlíkové vlákno a typ tiskárny – Desktop Series (onyx, Mark Two). V nastavení Infill je možnost zvolení vzoru výplně, procentuální zaplnění materiálem, počet vrchních,

spodních a stěnných vrstev. S tímto základním nastavením je možné přejít k druhému kroku, a to k nastavení jednotlivých vrstev v části programu zvané XRAY.

Spojkový pedál má rozměry 267,3x51,7x43 mm a dá se rozdělit na jednotlivé vrstvy. Orientace tisku lze vidět na obrázku 6, z něhož je patrný postup směrem od podložky. Spojkový pedál se skládá z 344 vrstev rozložených v 43 mm šířky pedálu, rozdělených na 4 oblasti dle potřeby tuhosti výrobku. V tabulce 1 je k nalezení přehled těchto oblastí, v jakých konkrétních vrstvách a rozměrech se nachází. Oblast 1 a 3 jsou okraje pedálu a oblasti děr, které jsou nejvíce namáhány a je v nich potřeba více tuhosti na rozdíl od středových částí, kde nedochází k takovému pnutí. Toho je dosaženo přidáním většího množství karbonového vlákna.



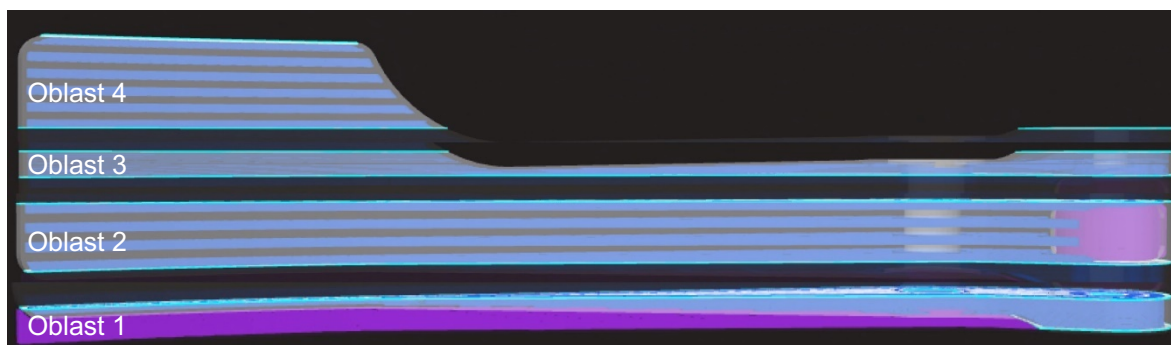
Zdroj: Upraveno dle (Eiger, 2023)

Obr. 6 Rozměry spojkového pedálu

Tab. 1 Oblasti slicování spojkového pedálu

Oblast	Rozmezí vrstev	Počet vrstev	Velikost vrstev [mm]
1	5 - 44	40	0,55 - 5,5
2	45 - 149	105	5,5 - 18,63
3	150 - 189	40	18,63 - 23,63
4	190 - 344	155	23,63 - 43

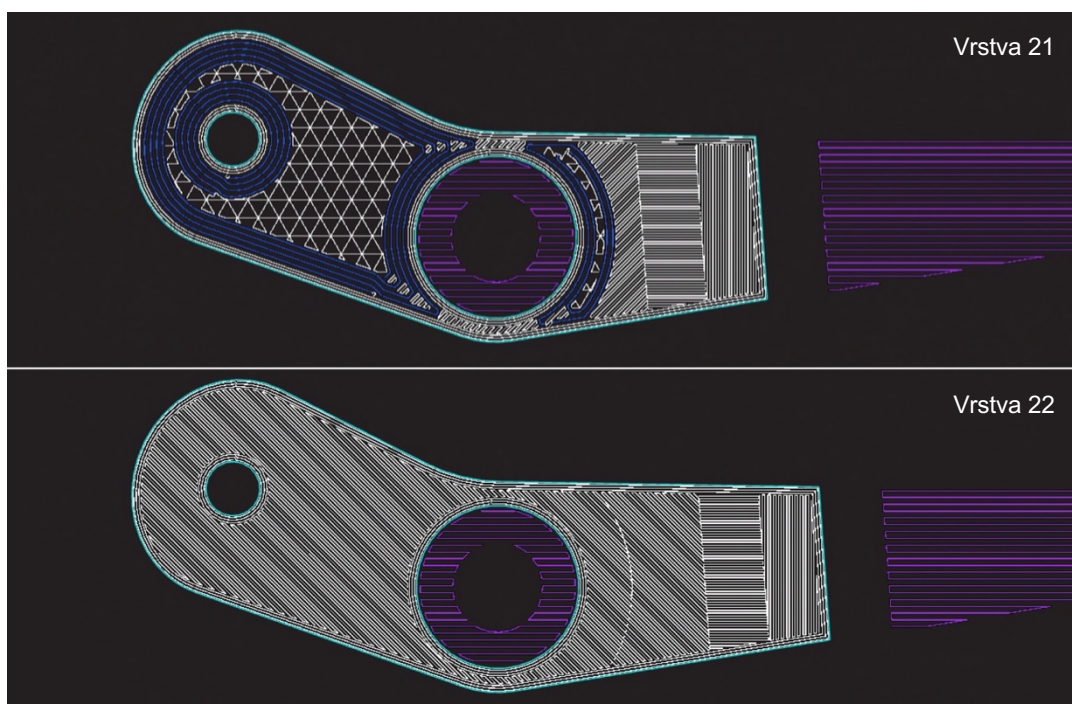
Na obrázku 7 jsou znázorněny jednotlivé oblasti 3D tisku odpovídající údajům z předchozí tabulky.



Zdroj: Upraveno dle (Eiger, 2023)

Obr. 7 Znáznění oblastí 3D tisku spojkového pedálu

Vrstvy se v oblasti 1 střídají tak, jak lze vidět na obrázku 8 – zde je znázorněna vrstva 21 (nahore) a vrstva 22 (dole). Vrstva 21 je vyztužena kontinuálním karbonovým vláknem v problematických oblastech a zbylá část, vyplněna onyxem, je definovaným procentem určujícím hustotu zaplnění. Další vrstva je pak vyplněna pouze kompozitem. Fialové oblasti znázorňují podpěry. Stejný princip vytváření vrstev je využit i pro oblast 3.



Zdroj: Upraveno dle (Eiger, 2023)

Obr. 8 Způsob zaplňování spojkového pedálu při 3D tisku v oblasti 1

V oblastech 2 a 4 není potřeba tolik kontinuálního karbonového vlákna, zaplňování tedy podléhá jinému nastavení parametrů. Parametry, které jsou zde upravovány ohledně kontinuálního vlákna jsou následující: schéma vláken, počet sekcí, počet zpevňujících vrstev v jedné sekci, typ vyplnění zpevňujících vrstev a počet prstenců. Schéma vláken znamená výběr mezi vyztužením celé sekce vláken nebo pouze určitých vrstev. Výběr je proveden dle potřeby pevnosti.

Pokud je u předchozího kroku zvoleno vyztužení pouze určitých vrstev, následuje parametr počet sekcí. Ten uvádí, kolik bude těchto sekcí se zpevňujícími vlákny vytištěno napříč vybranou oblastí.

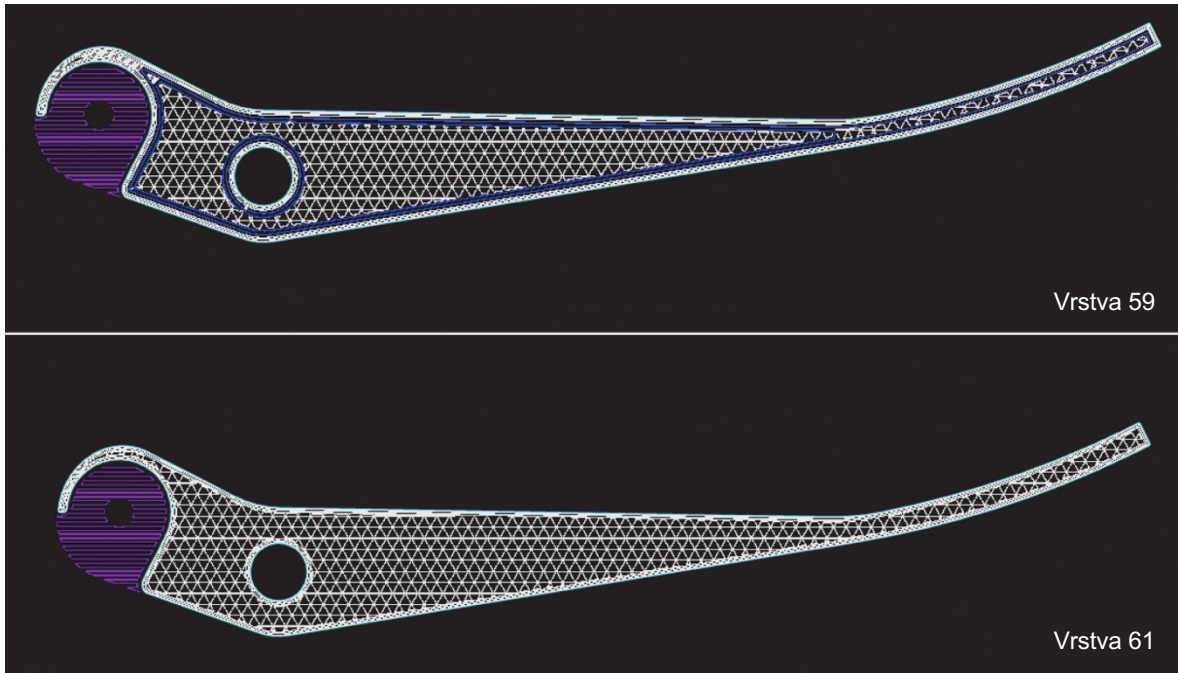
Následujícím parametrem je počet po sobě jdoucích zpevněných vrstev v jedné sekci.

Dále je možno zvolit způsob vyplnění zpevnění, u kterého lze vybrat soustředný typ nebo izotropní. Izotropní výplň tvoří jednosměrné vrstvy od kraje ke kraji. Soustředná výplň značí strukturu složenou ze soustředných čar, které tvoří obrys součásti. Soustřednou výplň lze strategicky nastavit podél obvodu vnějších stěn, vnitřních stěn nebo obou těchto stěn.

Další parametr, typ vyplnění zpevňujících vrstev, je využit pouze v případě, že je zvolena soustředná výplň a určuje, zda tyto vrstvy budou odpovídat obrysu součásti z vnější strany, z vnitřní strany nebo z obou těchto stran.

Posledním parametrem, použitelným také pouze u soustředné výplně, je počet prstenců. Prstencem se rozumí soustředný pruh zpevňujícího vlákna podél okraje součásti (na obrázku 9 vyznačeno tmavomodře).

Oblasti 2 a 4 jsou tedy vyplněny dle konkrétního nastavení těchto parametrů. Příklad vyplnění pro oblast 2 je vidět na obrázku 9, kde je zobrazena vrstva 59 (nahore) a vrstva 61 (dole).

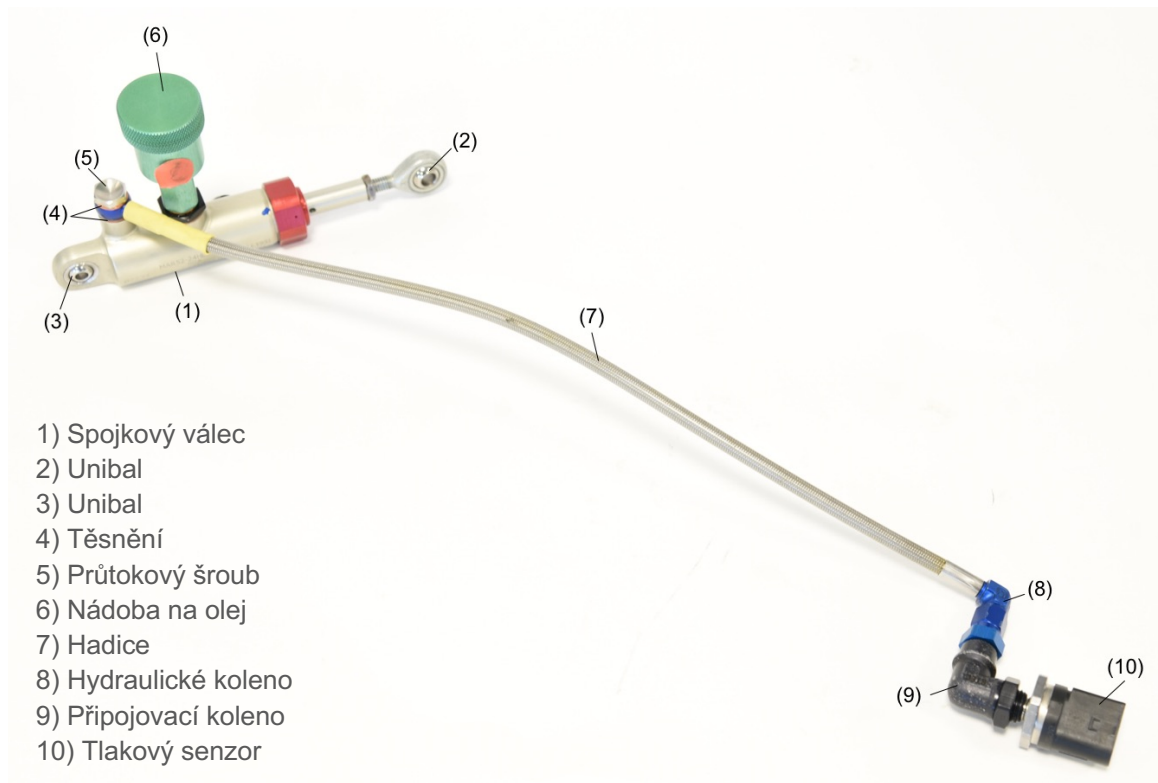


Zdroj: Upraveno dle (Eiger, 2023)

Obr. 9 Způsob zaplňování spojkového pedálu při 3D tisku v oblasti 2

4.5 Návrh testování vytištěného spojkového pedálu

Testování vytištěného pedálu probíhá přímo ve voze Škoda Fabia RS Rally2 za pomoci připojeného testovacího hydraulického okruhu zachyceného na obrázku 10.



Zdroj: Upraveno dle (Škoda Motorsport, 2023)

Obr. 10 Testovací okruh s hlavním spojkovým válcem

Testování pomocí tohoto okruhu je výhodné z časového hlediska, jelikož není potřeba připojovat a odpojovat spojkový pedál k celému systému automobilu. Stačí pouze názorné připojení k tlakovému senzoru.

Hlavní spojkový válec je připevněn pomocí kloubu unibalu k pohyblivé části (pedálové soustavě) a z protější strany k pevné části (karoserii vozu). Válec je připojen k nádobě na hydraulický olej, konkrétně se jedná o Castrol RSF Racing brake fluid, a pomocí dvou měděných těsnění a průtokového šroubu také k pancéřované hadici. Tato hadice je vyráběna z nerezové oceli, jelikož se tento materiál při tlakovém namáhání neroztahuje a měření dosahuje přesnějších výsledků. Zároveň je hadice připojena k tlakovému senzoru pomocí hydraulického kolena a připojovacího kolena pro senzor. Pro přesnost měření je nutné hadici odvzdušnit vytlačení vzduchu.

Po zapojení je možné testovat pevnost spojivého pedálu při zatížení a sledovat, při jakém tlaku dojde k porušení jeho struktury. Tlak je měřen pomocí tlakového senzoru připojeného k počítači, ze kterého jsou následně data exportována do programu Microsoft Excel, kde jsou dále zpracovávána.

5 Testování vytištěného spojového pedálu

Testování spojkových pedálů je uskutečněno na 9 kusech výtisků s rozdílnými parametry. Ve spojkových pedálech jsou měněny poměry filamentu a kontinuálního karbonového vlákna. Zaplnění filamentem je v hodnotách 35, 40 a 45 %, zaplnění karbonovým vláknem je v hodnotách 60, 80 a 100 %. Výtisky jsou kombinací těchto hodnot. Pro lepší představu, jak bude vypadat průběh zbylých měření, jsou nejprve otestovány krajní hodnoty. Dle výsledků je pak možno provést vyhodnocení a doporučení praktického využití.

5.1 Jednotlivé varianty nastavení tiskových parametrů

Pro každý spojkový pedál je potřeba nastavit parametry jednotlivých vrstev tak jak je uvedeno v tabulce 2. Tyto parametry jsou označeny A – počet sekcí, B – počet zpevňujících vrstev v jedné sekci, C – počet zpevňujících prstenců v jedné vrstvě. U pedálů, u kterých je ve specifických oblastech poměr karbonového vlákna 100 %, není potřeba vyplňovat parametr A a B.

Tab. 2 Parametry sliceru pro jednotlivé pedály

Filament/ karbon [%]	Oblast 1			Oblast 2			Oblast 3			Oblast 4		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
35/60	20	1	4	4	15	2	20	1	4	6	15	1
35/80	20	1	4	5	15	2	20	1	4	8	15	1
35/100	20	1	4			2	20	1	4			1
40/60	20	1	4	4	15	2	20	1	4	6	15	1
40/80	20	1	4	5	15	2	20	1	4	8	15	1
40/100	20	1	4			2	20	1	4			1
45/60	20	1	4	4	15	2	20	1	4	6	15	1
45/80	20	1	4	5	15	2	20	1	4	8	15	1
45/100	20	1	4			2	20	1	4			1

V tabulce 3 je možno vidět přehled vybraných údajů o jednotlivých výtiscích. Doba tisku jednoho spojového pedálu je kolem 14-15 hod, výsledná hmotnost se pohybuje v rozmezí 88-97 g a cena v rozmezí 59-77 USD. Z této tabulky je patrné, že cena roste spolu s množstvím karbonového vlákna. Objem onyxu je 65–78 cm³ a objem karbonového vlákna je 13-30 cm³, což je převedeno i na procenta.

Tab. 3 Přehled vybraných údajů pro jednotlivé výtisky

Filament/ karbon [%]	Doba tisku [min]	Výsledná hmotnost [g]	Onyx [cm ³]	Karbonová vlákna [cm ³]	Karbonová vlákna [%]	Cena [USD]
35/60	850	88,94	73,68	13,88	15,61	59,14
35/80	883	93,16	74,58	16,13	17,31	66,11
35/100	885	88,29	65,66	18,38	20,82	76,12
40/60	865	91,19	75,59	20,63	22,62	59,60
40/80	898	95,10	76,23	22,88	24,06	66,50
40/100	902	90,58	67,60	25,13	27,74	76,58
45/60	876	93,34	77,41	27,38	29,33	60,03
45/80	907	97,09	77,92	29,63	30,52	66,90
45/100	913	92,92	69,58	31,88	34,31	77,05

Následně se pedály importují do 3D tiskárny a proběhne proces tisku. Z výtisků se manuálně odstraní podpěry a poté je možno hotový výrobek otestovat. Na obrázku 11 je zachycen vytištěný spojkový pedál po odstranění podpěr.

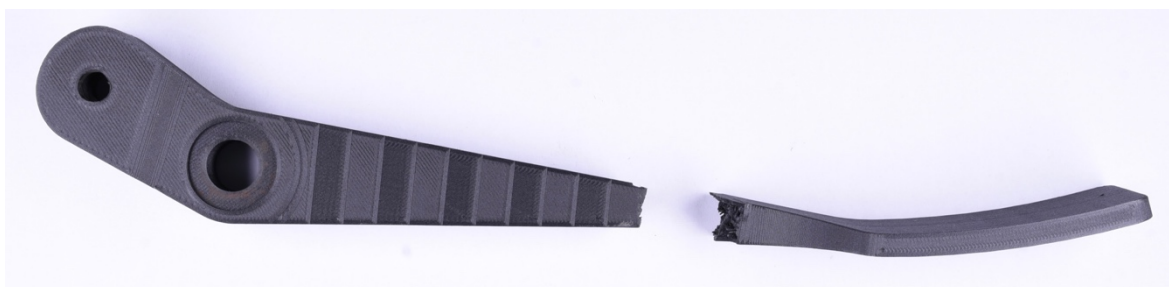


Zdroj: (Škoda Motorsport, 2023)

Obr. 11 Spojkový pedál

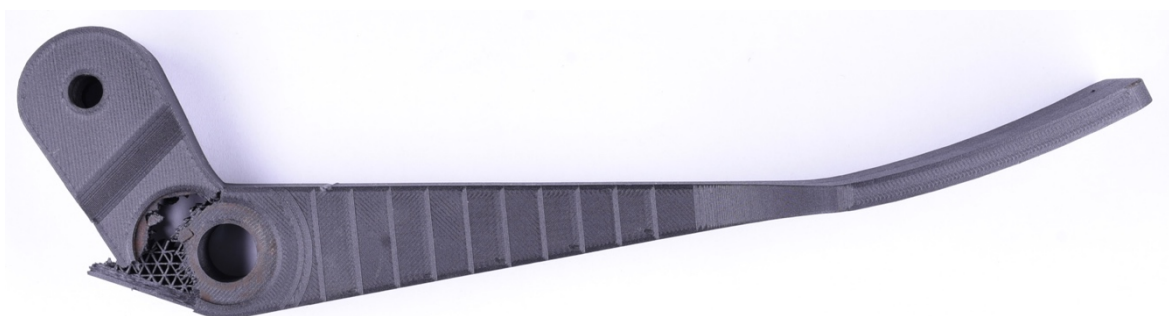
5.2 Výsledky testování spojkového pedálu

Testování spojkového pedálu bylo provedeno v závodním voze Škoda Fabia RS Rally2, na devíti kusech výtiscích dle výše uvedených tiskových schémat. Spojkový pedál byl připojen k testovacímu hydraulickému okruhu se senzorem tlaku. Na připojený spojkový pedál byl vyvíjen plynulý tlak do doby, než došlo k lomu. Lom nastal ve většině případů ve střední oblasti spojkového pedálu, zachyceno na obrázku 12, ale ve dvou případech nastal i v oblasti uchycení, jak je vidět na obrázku 13.



Zdroj: (Škoda Motorsport, 2023)

Obr. 12 Lom ve střední oblasti spojkového pedálu

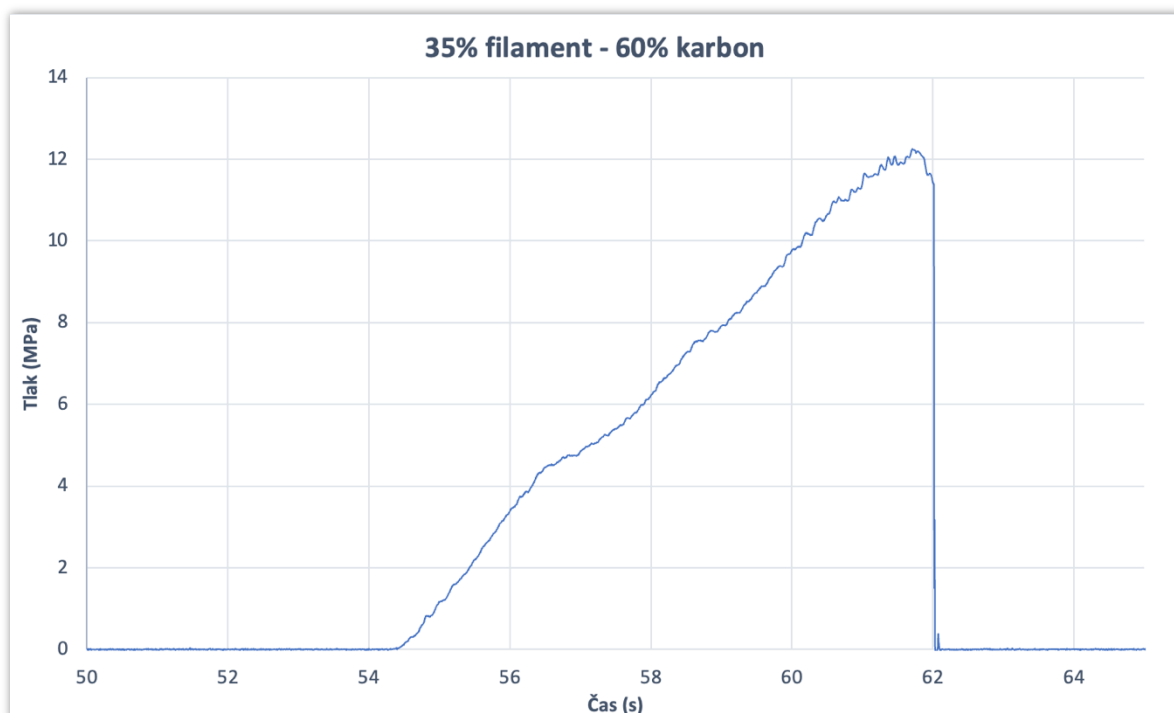


Zdroj: (Škoda Motorsport, 2023)

Obr. 13 Lom v oblasti uchycení spojkového pedálu

Data naměřená senzorem tlaku byla importována do programu Microsoft Excel a následně vizualizována v grafické podobě. Názorný graf spojkového pedálu, s 35% zaplněním filamentu a 60% zaplněním karbonu ukazuje obrázek 14. Na ose X je uveden čas v sekundách a na ose Y tlak v jednotkách MPa. Výsledná křivka zachycuje průběh nárůstu tlaku až po lom součásti. Lom spojkového pedálu nastal v daném případě při 12,25 MPa. Jelikož využívaný senzor tlaku není schopen měřit hodnoty vyšší než 14,28 bar, není možné určit vyšší hodnoty, které při testování nastaly ve čtyřech případech. Hodnoty přesahující 14,28 MPa však není nutné znát,

protože tak vysoký tlak není možné na spojkový pedál vyvinout při jízdě automobilem.



Obr. 14 Graf průběhu lomu spojkového pedálu

Zaznamenané hodnoty tlaku při lomu u jednotlivých pedálů byly v rozmezí 11,2-14,2 MPa, konkrétní hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 4.

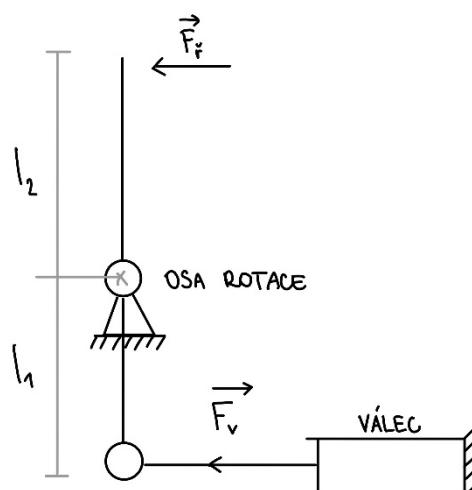
Tab. 4 Hodnota tlaku při lomu spojkového pedálu

Filament/karbon [%]	Tlak [MPa]
35/60	12,25
35/80	14,27
35/100	14,28
40/60	11,28
40/80	13,57
40/100	14,28
45/60	11,91
45/80	14,28
45/100	14,28

5.3 Výpočet síly a momentu síly

Pomocí výpočtů lze určit sílu potřebného působení na spojkový pedál, aby došlo k jeho lomu. Tímto je možné zjistit, zda je reálné, aby lom pedálu nastal při skutečném používání automobilu. Tento výpočet lze provést na základě znalosti vzorce tlaku a momentu síly.

Schéma válce a pedálu, dle kterého je výpočet proveden, je na obrázku 15. Řidič působí na pedál silou F_f a válec působí na pedál silou F_v .



Obr. 15 Schéma válce a pedálu pro výpočet síly a momentu síly

Tlak p je definován, dle (1), pomocí tlakové síly F působící kolmo na plochu S . Následně se vzorec upraví pro výpočet síly (2).

$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$F = p \cdot S \quad (2)$$

Plochou se rozumí obsah kruhu hlavního válce, který je definován následujícím vztahem (3).

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

Vychází se z průměru odpovídající kružnice 22,22 mm, po dosazení do vzorce je následně spočten obsah kruhu, který je roven 387,77 mm².

$$S = \frac{\pi \cdot 22,22^2}{4} = 387,77 \text{ mm}^2$$

Tlak je poté doplněn z naměřených hodnot, které jsou v tabulce 4. Pro první pedál s poměrem filamentu a karbonového vlákna 35–60 % je tlak 12,25 MPa. Síla válce F_v je 4 749,33 N.

$$F_v = 12,25 \cdot 387,77 = 4\,750,18 \text{ N}$$

Pomocí momentové síly M (4) je možno vypočítat, jakou silou řidiče F_r by se muselo působit na pedál, aby se zlomil. Délka $l_1 = 0,0416$ m je od osy rotace po osu rotace válce a délka $l_2 = 0,1755$ m je od osy rotace po střed aktivní plochy pedálu. Tyto délky jsou dosazeny do vzorce (5).

$$M = F \cdot l \quad (4)$$

$$M = F_v \cdot l_1 = 4\,750,18 \cdot 0,0416 = 197,61 \text{ Nm}$$

$$F_v \cdot l_1 = F_r \cdot l_2 \quad (5)$$

$$F_r = \frac{M}{l_2} = \frac{197,61}{0,1755} = 1\,125,97 \text{ N}$$

Na pedál s poměrem filamentu a karbonového vlákna 35-60 % by bylo potřeba působit silou 1 125,97 N, aby nastal lom. Pro ostatní pedály jsou hodnoty uvedené v tabulce 5.

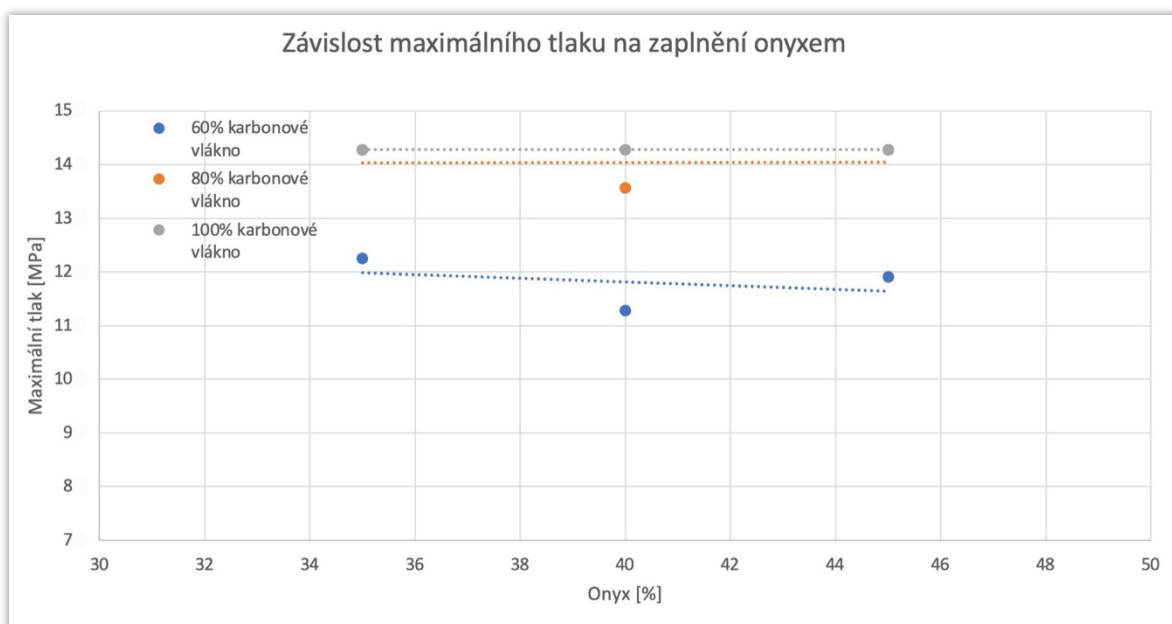
Tab. 5 Síly pro způsobující lom součásti pro jednotlivé varianty

Filament/karbon [%]	Síla řidiče F_r [N]
35/60	1 125,97
35/80	1 311,64
35/100	1 312,56
40/60	1 036,81
40/80	1 247,30
40/100	1 312,56
45/60	1 094,72
45/80	1 312,56
45/100	1 312,56

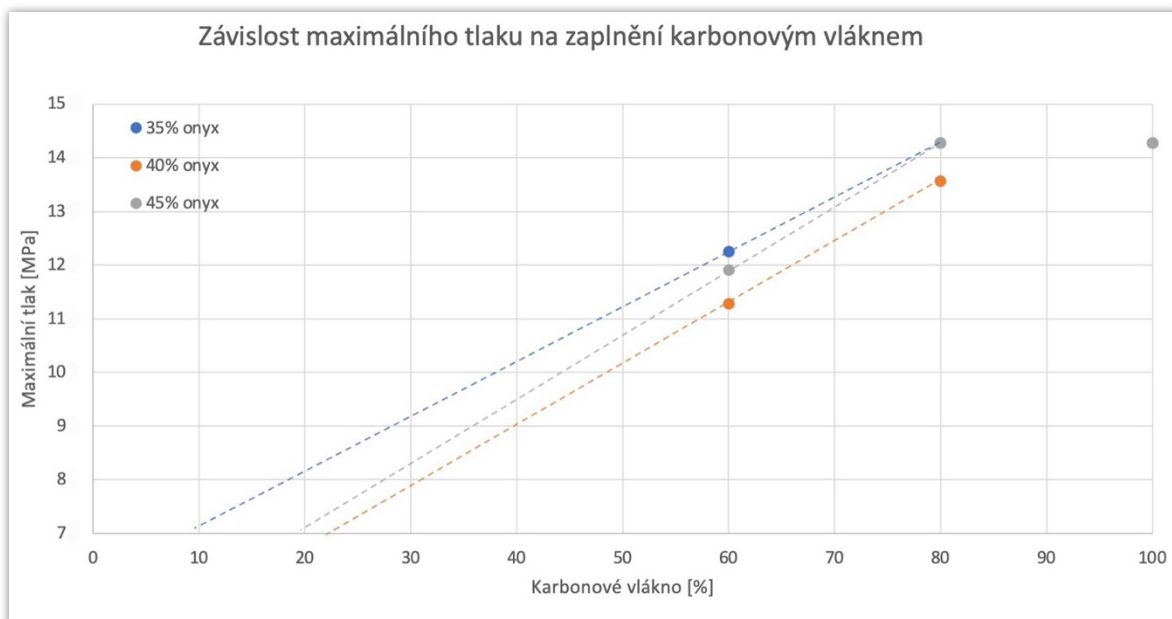
5.4 Vyhodnocení testování a závěrečná doporučení

Na základě údajů z testování je možno vytvořit grafické znázornění závislosti maximálního tlaku na spojkový pedál na parametrech 3D tisku. Graf na obrázku 16 znázorňuje závislost maximálního tlaku spojkového pedálu na zaplnění karbonovým vláknem. Na ose X je procentuální zaplnění onyxem a na ose Y je maximální tlak v MPa. Výsledné křivky značí závislost maximálního tlaku spojkového pedálu na zaplnění karbonovým vláknem, 60% zaplnění (modře), 80% zaplnění (oranžově) a 100% zaplnění (šedě).

Na obrázku 17 je graficky znázorněna závislost maximálního tlaku na spojkový pedál na parametrech 3D tisku, kde na ose X je procentuální zaplnění karbonovým vláknem a na ose Y je maximální tlak v MPa. Výsledné křivky značí závislost maximálního tlaku na spojkový pedál s 35% zaplněním onyxu (modře), 80% zaplněním onyxu (oranžově) a 45% zaplněním onyxu (šedě).



Obr. 16 Graf závislosti maximálního tlaku na zaplnění onyxem



Obr. 17 Graf závislosti maximálního tlaku na zaplnění karbonovým vláknem

V prezentovaných grafech lze vidět velkou tendenci závislosti parametru maximálního tlaku na úrovni zaplnění spojkového pedálu karbonovým vláknem a malou tendenci závislosti na zaplnění spojkového pedálu onyxem. Je tedy patrné, že úroveň vyplnění onyxem ovlivňuje výslednou hodnotu maximálního tlaku na spojkový pedál pouze minimálně na rozdíl od úrovně zaplnění karbonovým vláknem.

Jelikož tlakový senzor nebyl u využitého zařízení schopen měřit hodnoty přesahující 14,28 bar, není možné označit hodnoty dosahující této a vyšší úrovně za spolehlivé. Z uvedených grafů zároveň vyplývá, že by pro daný případ měly být dostačující nižší procentuální hodnoty zaplnění karbonového vlákna. Například u 40% zaplnění onyxem by mělo stačit 23% zaplnění karbonovým vláknem, aby bylo dosaženo požadovaného maximálního tlaku na spojkový pedál.

Následujícím doporučeným postupem je testování spojkových pedálů s nižšími hodnotami poměru karbonového vlákna a zjistit zda odpovídají předpokládaným hodnotám. Možná je i změna senzoru, který by byl schopen zaznamenat vyšší hodnoty tlaku. Dále je vhodné provést dlouhodobé testování dílu s cílem ověření jeho dlouhodobé odolnosti, následně doplněné o reálné testování v závodním voze v průběhu jízdy. Po splnění všech požadavků bude možné spojkový pedál implementovat do automobilu Škoda Fabia RS Rally2.

Závěr

Technologie 3D tisku je jedna z moderních metod využívaných čím dál častěji ve společnosti Škoda Auto a.s. a neodmyslitelně je implementována i do Škoda Motorsport, kde se uplatňuje při výrobě závodních automobilů.

V této práci byla zvolena technologie 3D tisku pro výrobu spojkového pedálu do závodního vozu Škoda Fabia RS Rally2. V první části byl popsán koncept automobilu, výroba komponentů vozidel a využívané materiály. Dále následovala kapitola o technologii 3D tisku – jeho kategorizace, možnosti využití, proces 3D tisku a nejčastější materiály. Praktická část se zabývala návrhem spojkového pedálu, kde byl definován spojkový pedál a konkrétní materiály pro jeho 3D tisk. Specifikována byla tiskárna a parametry 3D tisku a následně vymyšlen způsob testování. Po samotném 3D tisku bylo provedeno testování a výsledky byly zpracovány v programu Microsoft Excel, znázorněny graficky a využity pro výpočet síly a momentu síly. Na základě těchto výsledků bylo možné provést vyhodnocení a závěrečná doporučení.

Výsledkem této práce bylo devět vytištěných a otestovaných pedálů, ze kterých bylo patrné, že kontinuální karbonové vlákno významně ovlivňuje pevnost vyrobeného dílu. Při testování spojkového pedálu nastal lom při vyšších hodnotách než byly očekávány, a z tohoto důvodu by bylo vhodné následující pedály vyrábět s menším množstvím karbonového vlákna. Ubráním karbonového vlákna se zároveň dosáhne snížení ceny a stále bude zachována požadovaná pevnost. Při porovnání aktuálně využívaného hliníkového spojkového pedálu a 3D vytištěného spojkového pedálu je zřejmé, že technologie 3D tisku snižuje čas výroby, snižuje cenu a zachovává výbornou pevnost. Autonomní 3D výroba ve společnosti Škoda Auto a.s. odstraňuje rizika spojená s čekáním na dodání komponentu a umožňuje plynulý chod výroby celého vozidla.

Aby bylo možné navrhnutý spojkový pedál implementovat do závodního vozu Škoda Fabia RS Rally2 a aktivně jej využívat, je doporučeno pokračovat v testování s nižšími hodnotami karbonového vlákna, testovat dlouhodobou únavu, životnost komponentu a dále testovat přímo v závodním voze. Následně bude možné aktivně využívat 3D tisk pro výrobu spojkového pedálu pro závodní vůz ve Škoda Motorsport.

Seznam literatury

3D tisk v automobilovém průmyslu [online]. Praha: Moto Focus, 2022 [cit. 2023-09-30]. Dostupné z: <https://motofocus.cz/jine-info-zajimavosti/77360,3d-tisk-v-automobilovem-prumyslu>.

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.

BRADÁČ, Josef, Romana ČIŽINSKÁ, Tereza HRTÚSOVÁ, a kol. *Automobilový průmysl v soudobé ekonomice: pozice a trendy*. Mladá Boleslav: nakladatelství Eva Rozkotová, 2019. ISBN 978-80-7654-054-5.

DOBROVOLNÝ, Jaroslav. *Nástrojařství: popis výroby, práce a konstrukce nástrojů k obrábění kovů se zvláštním zřetelem k lisování: určeno pro výcvik nástrojařů, dorostu a pro studenty odborných škol*. 3. vyd., v Práci 2. vyd. Praha: Práce, 1952.

ECHEMPATI, Raghu. *Primer on Automotive Lightweighting Technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2021. ISBN 978-0-8153-5713-1.

Eigersoftware pro 3D tisk – 3D tiskárny Markforged [online]. SolidVision, s.r.o., 2023 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.3d-tiskarna.cz/software/>.

GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika. 3., přeprac. vyd.* Praha: Europa-Sobotáles, 2015. ISBN 978-3-8085-2163-2.

HONZA, Jaroslav a MAREČEK, Aleš. *Chemie pro čtyřletá gymnázia 2. díl. 4. opravené vyd.* Brno: Proton, 2014. ISBN 978-80-902402-5-4.

Karbon – 3D tiskárny Markforged [online]. SolidVision, s.r.o., 2023 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.3d-tiskarna.cz/materialy/kontinualni-vlakna/karbon/>.

KOVANDA, Jan, a kol. *Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05893-0.

KREBS, Stefan; KOLAŘÍK, Ladislav a BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Technologie zpracování plastů a kompozitů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.

MALEN, Donald E. *Fundamentals of Automobile Body Structure Design*. Warrendale: SAE International, 2020. ISBN 978-1-4686-0174-9.

Materiálová struktura karoserie – Škoda Storyboard [online]. Škoda Auto a.s., 2022 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: https://www.skoda-storyboard.com/cs/modely-cs/jak-bezpecne-ziskat-pet-hvezd-euro-ncap/attachment/octavia_cz_airbagy_a_struktura_karoserie-4/.

Materiály na bázi polypropylenu v automobilovém průmyslu [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Knihovna, 2011 [cit. 2023-09-30]. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/16907>.

Materiály pro 3D tisk [online]. Hradec Králové: TRILAB Group s.r.o., 2023 [cit. 2023-10-01]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/cs/magazin/materialy-pro-3d-tisk/>.

Onyx – 3D tiskárny Markforged [online]. SolidVision, s.r.o., 2023 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://www.3d-tiskarna.cz/materialy/plast/onyx-fr/>.

Principy a technologie 3D tisku [online]. Praha: Průmyslové spektrum, 2022 [cit. 2023-09-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/principy-a-technologie-3d-tisku>.

STRŽÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa research, 2020. ISBN 978-80-907798-0-8.

Udržitelnost [online]. Mladá Boleslav: Škoda Auto a.s., 2023 [2023-09-30]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/o-spolecnosti/udrizitelnost>.

VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlček, 2003, 392 s. ISBN 80-239-0026-9

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 1 Materiálová struktura ocelí u karoserie vozu Škoda Octavia	13
Obr. 2 Vrstvení filamentu metodou FDM/FFF	17
Obr. 3 Typy tiskáren dle pohybu v trojrozměrném prostoru.....	18
Obr. 4 Graf průběhu deformace uhlíkového vlákna	23
Obr. 5 3D tiskárna Markforged Mark Two.....	24
Obr. 6 Rozměry spojkového pedálu.....	25
Obr. 7 Znázornění oblastí 3D tisku spojkového pedálu	26
Obr. 8 Způsob zaplňování spojkového pedálu při 3D tisku v oblasti 1	26
Obr. 9 Způsob zaplňování spojkového pedálu při 3D tisku v oblasti 2	28
Obr. 10 Testovací okruh s hlavním spojkovým válcem.....	29
Obr. 11 Spojkový pedál.....	32
Obr. 12 Lom ve střední oblasti spojkového pedálu	33
Obr. 13 Lom v oblasti uchycení spojkového pedálu	33
Obr. 14 Graf průběhu lomu spojkového pedálu	34
Obr. 15 Schéma válce a pedálu pro výpočet síly a momentu síly	35
Obr. 16 Graf závislosti maximálního tlaku na zaplnění onyxem	37
Obr. 17 Graf závislosti maximálního tlaku na zaplnění karbonovým vláknem.....	38

Seznam tabulek

Tab. 1 Oblasti slicování spojkového pedálu.....	25
Tab. 2 Parametry sliceru pro jednotlivé pedály.....	31
Tab. 3 Přehled vybraných údajů pro jednotlivé výtisky	32
Tab. 4 Hodnota tlaku při lomu spojkového pedálu.....	34
Tab. 5 Síly pro způsobující lom součásti pro jednotlivé varianty	36

ANOTAČNÍ ZÁZNAM

AUTOR	Adéla Staňková		
STUDIJNÍ PROGRAM/OBOR/SPECIALIZACE	Průmyslový management		
NÁZEV PRÁCE	Volba vhodného výrobního postupu pedálu spojky závodního vozidla s využitím technologie 3D tisku		
VEDOUCÍ PRÁCE	Ing. Josef Bradáč, Ph.D.		
KATEDRA	KSE - Katedra strojírenství a elektrotechniky	ROK ODEVZDÁNÍ	2023
POČET STRAN	44		
POČET OBRÁZKŮ	17		
POČET TABULEK	5		
POČET PŘÍLOH	0		
STRUČNÝ POPIS	<p>Cílem této práce je volba vhodného výrobního postupu pedálu spojky závodního vozidla s využitím technologie 3D tisku. V teoretické části je popsán koncept automobilu, výroba komponentů vozidel, využívané materiály a podrobněji zpracována technologie 3D tisku. Praktická část obsahuje návrh spojkového pedálu společně s definicí a popisem materiálu. Specifikována je použitá aditivní technologie a její parametry. Dále je navržen testovací okruh a metodologie testování. V práci je testováno 9 variant pedálů. Data jsou systematicky zpracována a aplikována ve výpočtech, na základě kterých jsou stanovena závěrečná doporučení a využitelnost v závodním voze Škoda Fabia RS Rally2.</p>		
KLÍČOVÁ SLOVA	Automobil, spojkový pedál, 3D tisk, výrobní technologie, komponenty v automobilovém průmyslu, materiály		

ANNOTATION

AUTHOR	Adéla Staňková		
FIELD	Industrial management		
THESIS TITLE	Selection of suitable production process of a clutch pedal for a racing car using 3D printing technology		
SUPERVISOR	Ing. Josef Bradáč, Ph.D.		
DEPARTMENT	KSE - Department of Mechanical and Electrical Engineering	YEAR	2023
NUMBER OF PAGES			
	44		
NUMBER OF PICTURES			
	17		
NUMBER OF TABLES			
	5		
NUMBER OF APPENDICES			
	0		
SUMMARY			
	<p>The aim of this bachelor thesis is to select a suitable production process of a clutch pedal for a racing car using 3D printing technology. In the theoretical part is described conception of automobile, component production, used materials and technology of 3D printing. The practical part includes the concept of clutch pedal together with the definition and description of the material. The 3D printer and parameters are specified. Furthermore, a testing circuit and testing methodology is designed. The result of this work is 9 printed and tested clutch pedals. The data are systematically processed and applied in calculations, which result in final recommendations and applicability in the Škoda Fabia RS Rally2 racing car.</p>		
KEY WORDS			
	Automobile, clutch pedal, 3D print, fabrication technology, components in automotive industry, materials		