



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE PLATFORMOVÉHO PEDÁLU PRO DĚTSKÉ MTB KOLO

KIDS PLATFORM PEDAL DESIGN FOR MTB BIKE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Čiula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Michal Čiula**
Studijní program: Základy strojíního inženýrství
Studijní obor: Základy strojíního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce platformového pedálu pro dětské MTB kolo

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pedály jsou nedílnou součástí každého kola. U horských kol jsou platformové pedály typické pro kola kategorie XC–DH. Dospělí jezdci mají na výběr nepřeberné množství variant, nicméně pro dětské jezdce takový výběr není a často se tak musí spokojit se zbytečně velkou dospěláckou variací.

Typ práce: strojLAB – konstruování

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je návrh konstrukce a výroba platformových pedálů na dětské horské kolo.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- přehled pedálů které jsou komerčně k dispozici,
- volba cílové skupiny jezdců,
- analýza zatížení a pevnostní výpočet,
- konstrukce pedálu,
- výroba ve strojlubu a testování.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G., VLK, Miloš (ed.).
Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. Překlady vysokoškolských učebnic. V
Brně: VUTIAM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou chybějících funkčních komponentů v oblasti dětské cyklistiky. Současný trh s platformovými pedály pro dětská horská kola (MTB) nabízí produkty převážně na dvou cenových extrémech – buď levné a nebezpečné plastové pedály bez adekvátní přilnavosti, nebo finančně nákladné high-end modely. Cílem práce je navrhnout optimální platformový pedál, který respektuje anatomické rozměry dětského chodidla cílové skupiny jezdců od 5 do 11 let, splňuje legislativní požadavky na bezpečnost a zároveň představuje finančně dostupnou alternativu.

Stanovený cíl byl naplněn komplexním konstrukčním návrhem, který efektivně kombinuje klasické strojírenské postupy s moderními technologiemi. Tělo pedálu bylo navrženo pro aditivní výrobu pomocí technologie 3D tisku FDM (Fused Deposition Modeling) z odolného materiálu, což zajišťuje nízké výrobní náklady a snadnou vyměnitelnost dílu. Vlastní konstrukce osy pedálu byla podrobena analytickým pevnostním výpočtům na ohyb a únavovému zatěžování podle platných norem ASTM a ISO, čímž byla garantována mechanická odolnost celého mechanismu.

Konkrétním výsledkem je plně funkční prototyp pedálu o rozměrech platformy (85 × 85) mm, které přesně odpovídají antropologickým datům dětské nohy. Pevnostní výpočty prokázaly vysokou bezpečnost osy vůči statickému i dynamickému zatížení při dopadech z výšky až 1,22 m (bezpečnost vůči mezi kluzu $k_b = 2,04$). Uložení osy využívá kombinaci jednoho kuličkového ložiska a kluzného PTFE pouzdra s vypočítanou provozní životností 926 hodin. Pedál je navíc vybaven integrovanými vyměnitelnými piny pro spolehlivou přilnavost obuvi a splňuje podmínky silniční vyhlášky díky implementaci odrazek.

Práce přináší ucelený metodický návod, jak lze aditivní výrobu (3D tisk) úspěšně aplikovat při vývoji dynamicky namáhaných spotřebních komponentů. Čtenáři z řad konstruktérů či cyklistické veřejnosti práce nabízí praktickou ukázkou toho, jak efektivně vyřešit mezeru na trhu a realizovat zakázkovou výrobu rozměrově specifických součástek s minimálními náklady, vysokou servisovatelností a bez kompromisů v oblasti bezpečnosti.

Klíčová slova

MTB, Dětský pedál, 3D tisk

Abstract

This bachelor's thesis addresses the lack of suitable functional components in the field of children's cycling, specifically focusing on platform pedals for children's mountain bikes (MTB). The current market is characterized by a dichotomy between low-cost plastic pedals with insufficient grip and high-end products with prohibitive pricing. The objective of this work is to develop an optimal platform pedal design that reflects the anatomical characteristics of children aged 5 to 11, complies with relevant safety regulations, and offers an economically viable alternative.

The objective was achieved through a comprehensive engineering design that integrates conventional mechanical design methods with modern manufacturing technologies. The pedal body was designed for additive manufacturing using Fused Deposition Modeling (FDM), enabling cost-effective production and straightforward component replacement. The axle was subjected to analytical strength assessments, including bending and fatigue analyses, in accordance with applicable ASTM and ISO standards, ensuring the structural integrity of the assembly.

The resulting design is a fully functional prototype with platform dimensions of 85×85 mm, corresponding to anthropometric data of the target user group. Structural analysis confirmed a high level of safety under both static and dynamic loading conditions, including impact loads corresponding to drops from heights up to 1.22 m (yield safety factor $k_b = 2,04$). The axle support system consists of a combination of a rolling-element bearing and a PTFE plain bearing, with a calculated service life of 926 operating hours. The pedal incorporates replaceable traction pins to enhance grip and complies with road safety regulations through the inclusion of reflectors.

This thesis provides a methodological framework for the application of additive manufacturing in the development of dynamically loaded consumer products. It offers practical insights for designers and the cycling community on addressing market gaps through the development of cost-efficient, customizable, and safe mechanical components.

keywords

MTB, Kids pedal, 3D printing

Bibliografická citace

ČIULA, Michal. Konstrukce platformového pedálu pro dětské MTB kolo. Brno, 2018, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Košťál, Ph.D.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce za vedení a zprostředkování normalizovaných dílů a materiálu pro 3D tisk, dále panu Ing. Petru Křivohlavému za možnost tisku v prostorách Strojlab a také bych chtěl poděkovat Ústavu strojírenské technologie za umožnění výroby os a to konkrétně doc. Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. a Ing. Ondřejovi Vystrčilovi.

Prohlášení autora o původnosti práce

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

Obsah

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Dětská kola a jejich rozdělení	14
2.2	Historie a vývoj pedálů	16
2.2.1	Počátky cyklistiky a prvních pedálů	16
2.2.2	Éra vysokých kol	17
2.2.3	Vývoj do současné podoby pedálu	19
2.3	Typologie pedálů jízdních kol	22
2.3.1	Nášlapné pedály	23
2.3.2	Platformové pedály	24
2.3.3	Pedály s klipsnami	25
2.4	Silové působení na pedál	26
2.4.1	Biomechanika šlapání	26
2.4.2	Rozložení tlaku na pedál	29
2.5	Průzkum a analýza trhu platformových pedálů	29
2.5.1	Segment dětských pedálů	30
2.6	Aditivní výroba – FDM technologie	32
2.7	Materiály pro technologii FDM	32
2.7.1	PETG	33
2.7.2	ASA	33
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	34
3.1	Analýza problému	34
3.2	Cíl práce	34
3.2.1	Dílčí cíle práce jsou následující:	34
3.3	Volba cílové skupiny jezdců	35
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	36
4.1	Koncepce těla pedálu	36
4.1.1	Tvar platformy	36

4.1.2	Rozměry platformy	36
4.1.3	Materiál těla pedálu	37
4.2	Koncepce osy pedálu	38
4.3	Volba ložisek	39
4.4	Shrnutí koncepce	40
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	41
5.1	Tělo pedálu	41
5.1.1	Verze první	41
5.1.2	Finální verze	42
5.1.3	Parametry tisku	42
5.2	Osa pedálu	44
5.2.1	Pevnostní výpočet osy	44
5.2.2	Výpočet únavového zatěžování	46
5.2.3	Utahovací moment osy	47
5.2.4	Výroba	48
5.3	Ložiska	48
5.3.1	Výpočet životnosti ložisek	49
5.4	Testování	50
5.5	Náklady	50
6	DISKUZE	53
6.1	Zhodnocení výsledků ve vztahu k zadání a rozbor poznatků	53
6.2	Ověření počátečních hypotéz a číselné charakteristiky	53
6.3	Upozornění na zjednodušení, vnesené chyby a nedostatky	54
6.4	Rozbor dalších funkcí designérského návrhu	55
7	ZÁVĚR	57
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	64
9.1	Seznam použitých zkratk	64

9.2	Seznam symbolů a veličin	64
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	67
11	SEZNAM TABULEK	68
12	SEZNAM PŘÍLOH	69

1 ÚVOD

V dnešní době se cyklistika těší čím dál větší oblibě ve společnosti. Díky vysoké popularitě došlo k výrazné diverzifikaci tohoto sportu, kdy dnes můžeme hovořit o nepřehledném množství disciplín a podkategorií. Každá z nich má svá specifika, která se odrážejí v konstrukci kol i jejich komponent podle daného určení. Mezi nejpobulárnější disciplíny posledních let jednoznačně patří horská cyklistika, která se těší obrovskému zájmu jak mezi rekreačními jezdci, tak v závodní sféře.

Pedál bývá na kole často přehlíženou součástí, i když se jedná o jeden z klíčových dílů kola jako celku. Jsou to totiž právě pedály, které přenáší síly od nohou jezdce do pohonného mechanismu kola, a zároveň představují společně s řídítky a sedlem hlavní kontaktní body mezi jezdce a kolem. Nevhodně zvolený pedál, který nebere ohled na disciplínu ani anatomii jezdce, se může negativně projevit na výkonu i bezpečnosti. Pokud pedál neposkytuje dostatečnou přilnavost, jezdec může nabýt pocitu, že mu noha na pedálu nedrží, což vede k nejistotě a potenciálně ke ztrátě kontroly nad kolem, zejména v náročnějším terénu. Ačkoliv trh nabízí nepřehledné množství pedálů pro různá použití, segment pedálů určených pro dětskou horskou cyklistiku je výrazně užší. Dostupné produkty se pohybují na dvou cenových extrémech. Na jedné straně jsou levné plastové pedály bez pinů nevhodné pro náročnější terén a na druhé straně stojí high-end modely, jejichž pořizovací cena ekonomicky nedává smysl pro dítě, které kolo za pár sezón přeroste. V praxi tak často dochází k tomu, že dětsí jezdci používají pedály určené pro dospělé, které však svými rozměry neodpovídají anatomii dětského chodidla.

Cílem této práce je navrhnout platformový pedál cílený na skupinu dětí pohybujících se v horské cyklistice. Ačkoliv nabídka pedálů pro dospělé jezdce je rozsáhlá napříč všemi disciplínami od XC po DH, pro tuto méně početnou cílovou skupinu prakticky neexistuje adekvátní výběr. Pedál bude navržen s ohledem na anatomii dětského chodidla. Zároveň bude kladen důraz na snadnou servisovatelnost díky použití standardizovaných součástí a technologii výroby těla pedálu. Tělo pedálu bude vyrobeno technologií aditivní výroby, konkrétně 3D tiskem metodou FDM (Fused Deposition Modeling). Osa pedálu je vlastním konstrukčním návrhem, dimenzovaným pomocí pevnostních výpočtů. Volba 3D tisku přináší několik výhod, zejména nízké výrobní náklady, možnost barevného přizpůsobení, a především snadnou výměnu těla pedálu v případě poškození při zachování ostatních komponent.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Dětská kola a jejich rozdělení

Segment dětských kol je oproti segmentu kol pro dospělé o poznání užší. Při výběru kola hraje klíčovou roli tělesná výška jezdce, ta se u dětí rychle mění, a proto je potřeba v průběhu let kola obnovovat za větší. Výrobci dětská kola primárně dělí podle průměru kol, který začíná na 12" a dosahuje až 29" (palců). Protože toto značení může působit zmatečně pro zákazníka, tak výrobci u každého kola uvádí rozmezí tělesné výšky jezdce a věkový odhad. Právě výška jezdce a délka rozkroku jsou pro správný výběr kola zcela zásadní. [1; 2]

Do nejnižší kategorie spadají takzvaná odrážedla sloužící k osvojení základní stability, jejichž průměr kol bývá 12". Odrážedla jsou vybavená většinou pouze zadní ráfkovou brzdou a některá jsou zcela bez brzd. Jak již z názvu vyplývá, postrádají klikový mechanismus, kterým by děti uváděly odrážedlo do pohybu, jsou poháněna pouze odrazovým pohybem nohou dítěte. Jsou vhodná pro věkovou skupinu od 2 let s tělesnou výškou 85–110 cm. [1; 3]



Obrázek 2-1 Odrážedlo GHOST Powerkiddy 12 [4]

Kategorie kol s průměrem ráfků 12", 14" a 16" má za úkol naučit děti rovnováze a šlapání do pedálů. Na rozdíl od odrážedel jsou tato kola standardně vybavena brzdovou soustavou (ráfkovou, kotoučovou anebo protišlapnou) a pohonným mechanismem. Přenos točivého momentu zde zajišťuje řemenový nebo řetězový převod s pevným převodovým poměrem. Častým příslušenstvím bývají balanční kolečka pro zajištění dodatečné stability jezdce. Geometrie kola je přizpůsobena dětem o tělesné výšce 90–120 cm, což zhruba odpovídá věku 3–7 let. Kliky na těchto kolech mají menší závit než klasická kola, jedná se o závit 1/2 palce.[1; 5]



Obrázek 2-2 Dětské kolo 16" CTM TOMMY [6]

Kola s průměrem ráfku 20" a 24" představují již standardní konstrukci, která se začíná dělit podle svého určení na kategorie pro městské použití a cyklostezky, a na kola horská. Poprvé zde máme modely, které jsou vybavené přehazovačkou, která zajišťuje změnu převodového poměru mezi převodníkem na klikách a zadními řetězovými koly. Horská kola bývají osazena tlustšími a robustnějšími plášti, odpruženou přední vidlicí a v některých případech se objevují i celoodpružené rámy s tlumičem v zadní stavbě. Z hlediska výbavy a konstrukce se tato kola v zásadě neliší od kol pro dospělé jezdce, hlavní rozdíl spočívá ve zmenšeném průměru ráfku a celkově menších rozměrech geometrie rámu, která je přizpůsobena menším jezcům. Kola 20" jsou obvykle určena pro věkovou skupinu 5–9 let s tělesnou výškou 115–130 cm, kola 24" pak pro děti ve věku 7–11 let a výšce 125–140 cm. Tyto hodnoty však představují pouze orientační průměr, protože konkrétní hodnoty se mezi jednotlivými výrobci a modely liší v závislosti na geometrii rámu. Právě v této kategorii se objevují první mladí jezdci věnující se disciplínám XC a Trail.[1; 7; 8; 9]



Obrázek 2-3 Dětské kolo 20" Hellion X20 [10]

Nejvyšší kategorií přesahující dětský segment jsou kola s průměrem ráfku 26", 27,5" a 29", která již odpovídají standardu dospělých kol. Tato kola mohou být označována jako juniorská. Z důvodu menšího rámu jsou tato kola vhodná pro větší děti anebo pro dospívající jezdce. Sdílejí většinu komponent s modely pro dospělé a liší se od nich pouze velikostí rámu. Velikost rámu se v této kategorii udává v palcích podle délky sedlové trubky. Toto značení nalezneme i jako standardní značení na kolech pro dospělé jezdce, přičemž pro menší jezdce se nejčastěji pohybuje v rozmezí 13"–15,5". Tato kola se průměrně pohybují okolo 13 kg. [1; 7; 11; 12]

2.2 Historie a vývoj pedálů

2.2.1 Počátky cyklistiky a prvních pedálů

Na úplných počátcích cyklistiky bychom pedály hledali marně. Historie vývoje jednostopých vozidel započala v první polovině 19. století, kdy německý vynálezce Karl von Drais představil vynález, který byl po něm později pojmenován draisina. Konstrukce tohoto dopravního prostředku byla převážně vyrobená ze dřeva a připomínala spíše dnešní dětská odrážedla než jízdní kolo. Draisina byla poháněna odrážením jezdcových chodidel od země, jelikož postrádala jakýkoliv mechanismus pro přenos síly, který by zajišťoval pohyb vpřed tak, jak jej známe u dnešních moderních kol. [13; 14]

První skutečné klikové mechanismy s pedály se objevily až s příchodem velocipédu ve druhé polovině 19. století, který si velmi rychle získal oblibu. Pohon velocipédu byl realizován tlakem nohou na pedály, které byly pevně spojeny s klikami na ose předního kola. Konstrukce těchto raných pedálů byla velice specifická. Využívaly se u nich boční příruby, které zabraňovaly sklouznutí nohy, a do spodní části bylo integrováno protizávaží ve tvaru žaludu. To gravitačně zajišťovalo neustálou orientaci nášlapné plochy směrem vzhůru. Toto závaží bylo následně inovováno tak, že zároveň plnilo funkci zásobníku oleje pro průběžné mazání čepu pedálu.[14]

Kvůli posedu, který byl u velocipédů značně posunutý dozadu, se chodidlo o takto zkonstruovaný pedál neopíralo svou přední částí jako dnes, ale svým středem. Biomechanika šlapání se změnila až s nástupem takzvaných vysokých kol. Posed jezdce se přesunul více vpřed, čímž se kontaktní bod chodidla posunul na špičku a s tím se postupně proměnila i samotná konstrukce pedálů do podoby, kterou známe dnes. [14]



Obrázek 2-4 Replika pedálů z roku 1870 [15]

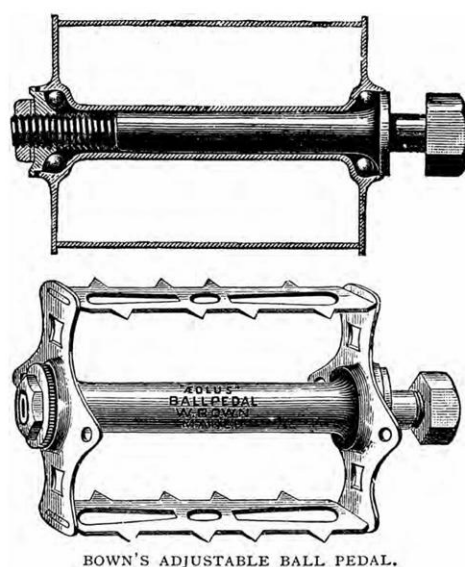
2.2.2 Éra vysokých kol

S příchodem vysokých kol v 70. letech 19. století se poměrně výrazně mění podoba kola. Oproti velocipédu se zadní kolo výrazně zmenšilo a přední narostlo, což umožnilo posunutí jezdce více dopředu nad osu předního kola. Jelikož mezi klikami a předním kolem byl pevný převodový poměr, velikost předního kola přímo ovlivňovala maximální rychlost jízdy.[14; 16]

Kontaktní bod chodidla s pedálem se přesunul ze středu na přední část chodidla, jak tomu zůstalo dodnes. S těmito změnami se měnila i konstrukce pedálu. V roce 1871 si William Henry James Grout nechal patentovat plochý pedál, jehož povrch byl potažený gumou. [14]

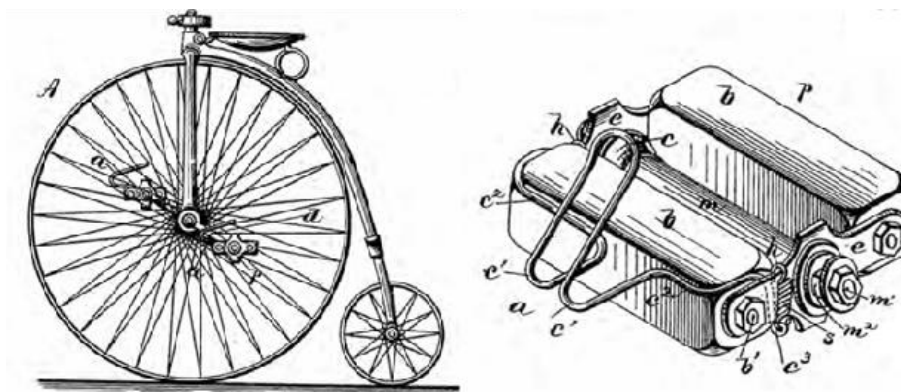
Ovšem mnohem významnějším zlepšením byla implementace kuličkových ložisek do pedálu roku 1881, která umožnila plynulejší otáčení pedálu vůči ose a snížila tření. Některé tyto pedály však měly odhalené osy, díky čemuž se do pedálu mohla dostávat voda a způsobovat problémy v ložiscích. [14]

Proto následně vznikala řešení, kdy byla osa celá ukrytá uvnitř těla pedálu.[14] Jedním z rozšířených typů pedálů této doby byl takzvaný rat-trap pedál, který byl tvořený otevřenou kovovou konstrukcí se zubatými hranami, které zvyšovali přilnavost boty k pedálu.[17] Svůj název získal díky vizuální podobnosti s pastí na myši. Příkladem kombinace obou přístupů nám může být pedál pána Bowna, který použil konstrukci rat-trap pedálu v kombinaci s uzavřeným tělem chránícím ložiska před vodou a nečistotami, čímž se stal svým způsobem předchůdcem dnešních platformových pedálů. [14]



Obrázek 2-5 Ranný rat-trap pedál s kuličkovými ložisky pole Bowna [14]

Na konci tohoto období a přechodu na bezpečnostní kola se mezi nadšenými jezdci a závodníky začal vzrůstat zájem o lepší fixaci nohy ve správné poloze na pedálu. Odpovědí na tento problém byly takzvané klipsny. Nejedná se tedy o zcela novou koncepci pedálu, ale spíše o přidaný prvek, který měl pomoci se zajištěním nohy. Klipsny jsou košíčky připevněné k přední části pedálu, do kterých jezdec zezadu zasune špičku boty, přičemž byly často vybaveny i řemínkem přes nárt pro pevnější obepnutí nohy. Mezi jedny z prvních lze zařadit patent Williama Rankina z roku 1890, který si nechal patentovat pedál s drátěnou klecí na přední straně právě za účelem lepší fixace nohy. Ačkoliv toto řešení s drátěnou klecí je na první pohled odlišné od dnešních klipsen, tak základní princip zachycení přední části boty zůstává stejný dodnes. Zajímavostí je, že na patentovém výkresu je tento systém vyobrazen ještě na vysokém kole, přestože tato éra se již blížila pomalu ke svému konci. [14]



Obrázek 2-6 Patent Williama Rankina z roku 1890[14]

2.2.3 Vývoj do současné podoby pedálu

Éru vysokých kol ukončil příchod takzvaného bezpečnostního kola (safety bicycle) v druhé polovině 80. let 19. století. Klíčovým rozdílem oproti vysokým kolům byl řetězový převod na zadní kolo, díky kterému bylo možné přesunout kliky s pedály do středu kola přímo pod jezdce, kde jsou dodnes. Rychlost jízdy tak přestala záviset na průměru kol a začal ji určovat zvolený převodový poměr mezi převodníkem a pastorkem, to také později umožnilo přidání více převodů pro změnu převodového poměru. Průkopníkem tohoto řešení byl britský vynálezce John Kemp Starley, který v roce 1885 představil model nazvaný Rover, považovaný za první úspěšné bezpečnostní kolo v moderním slova smyslu. Jezdec se na bezpečnostním kole ocitl v mnohem stabilnější a bezpečné poloze blíže k zemi, to pomohlo otevřít cyklistiku širší veřejnosti. Spolu s tímto vývojem se ustálil i standard závitu pro uchycení pedálu do kliky, kdy levý pedál má levotočivý závit a pravý pravotočivý, aby při šlapání nedocházelo k samovolnému uvolňování. Tento standard platí beze změny dodnes. [14; 18]

Přestože klipsny vznikly již na konci éry vysokých kol, jejich masové rozšíření přišlo spolu s rozvojem bezpečnostního kola od poloviny 90. let 19. století, kdy vznikla celá řada patentů na různé typy klipsen společně s různými upevňovacími systémy. V roce 1894 je výrobce Sunbeam již uváděl jako standardní příslušenství ke svým kolům. Postupně se vyvíjely i řemínky přes nárt, kdy se od roku 1900 začaly používat přezky a ve 30. letech 20. století se rozšířily samosvorné přezky. Klipsny se tak na několik dekad staly neodmyslitelnou součástí závodních kol. [14]

Jelikož fixace nohy za pomoci klipsen s řemínky nebyla dostatečně pevná, vznikla v 90. letech 19. století řada řešení, která se tento problém snažila vyřešit. Jedním z prvních byl C. M. Hanson, který si v roce 1895 nechal patentovat systém využívající čtyřramenný háček na těle pedálu, do nějž zapadala speciální destička na podrážce boty. Hansonův systém byl ale konstrukčně křehký a v praxi obtížně použitelný, můžeme ho považovat za vzdáleného předchůdce dnešních nášlapných pedálů. S dalším řešením fixace přišel roku 1896 Henry Tudor, kdy fixace nohy k pedálu byla zajišťována pomocí permanentních magnetů. Ani jedno z těchto řešení se však v praxi neuchytilo a cyklistika zůstala u klipsen. [14]

Zásadní průlom přišel v roce 1984, kdy francouzská firma Look, do té doby známá jako výrobce lyžařských vázání, přenesla tento princip na jízdní kolo a představila první nášlapný pedál. Trojúhelníková plastová kovová destička přišroubovaná k podrážce specializované obuvi se zacvakne do pružinového mechanismu v těle pedálu a uvolní se rotací paty stranou. Konzervativní cyklistický svět však tuto novinku zpočátku ignoroval. Změnu přineslo až vítězství Bernarda Hinaulta na Tour de France v roce 1985, na jehož vývoji se sám podílel, a které přesvědčilo zbytek pelotonu o přínosech tohoto systému. [14; 19]

S rozvojem horské cyklistiky, jejíž počátky sahají do konce 60. let 20. století v Kalifornii, vznikly nové požadavky na podobu pedálů. Horští jezdci potřebovali systém, který by byl praktický jak na kole, tak při chůzi mimo něj. Odpovědí byla v roce 1990 japonská firma Shimano, která představila systém SPD navržený přímo pro potřeby terénní cyklistiky. Menší upínací mechanismus, oboustranný vstup a možnost normální chůze mimo kolo z něj udělaly praktičtější volbu oproti silničním systémům. Původní rozhraní pedálu a upínací destičky přitom zůstává prakticky nezměněno dodnes. [14; 20]

Vedle kontaktních systémů jako bylo SPD přinesla horská cyklistika i nové požadavky na platformové pedály. Zatímco většina jezdců stále používala klipsny s řemínky, jezdci sjezdových a trialových disciplín potřebovali mít nohu na pedálu volnou a rychle dostupnou. S tím jak se horská cyklistika rozrůstala do různých disciplín, rostl i zájem o platformové pedály. Výběr ale zpočátku nebyl příliš velký. Dostupné byly pedály typu bear trap, které nabízely dobrou přilnavost mezi botou a pedálem, jejich vysoký profil ale způsoboval, že se pedál při špatném postavení nohy snáze protočil a jezdec ztratil kontakt s pedálem. Někteří jezdci proto začali používat starší BMX pedály Shimano DX z 80. let, které díky nízkému profilu nabízely vyšší stabilitu. Problémem ale byl rozdílný rozměr závitu – BMX pedály používají závit 1/2 palce, zatímco horská kola vyžadují 9/16 palce, a pedály bylo tedy potřeba upravit. Právě tuto mezeru na trhu zaplnili v podzimu 1995 Damian Mason a Matt Ryley, kteří založili firmu DMR a uvedli na trh jeden z prvních moderních platformových pedálů určených přímo pro horskou cyklistiku. Tělo pedálu bylo stejně jako u Shimano DX vyrobeno z hliníkové slitiny, největší předností však byly vyměnitelné piny. Možnost výměny pinů výrazně prodlužuje životnost pedálu, jelikož v terénu dochází k jejich poškození poměrně snadno. Tento koncept pedálu s menšími změnami používají výrobci dodnes. [21; 22]



Obrázek 2-7 DMR V12 z roku 1995 [21], upraveno

2.3 Typologie pedálů jízdních kol

Pedály jízdního kola představují klíčový kontaktní bod mezi jezdcem a hnacím mechanismem kola. Jejich funkcí je efektivně převést sílu vytvářenou dolními končetinami na kroutící moment roztáčející kliky s předním převodníkem, tento moment je pak následně přenášen prostřednictvím různých mechanismů na zadní kolo. Konstrukce pedálu musí zajistit stabilní podporu chodidla a odpovídat požadavkům a stylu jízdy pro danou disciplínu.

V současné době můžeme pedály rozdělit do základních skupin, které se od sebe liší především mechanismem zajišťujícím uchycení boty jezdce k pedálu. Těmito skupinami jsou nášlapné pedály, pedály s klipsnami a platformové pedály.

2.3.1 Nášlapné pedály

Nášlapné pedály zajišťují pevné spojení boty s pedálem pomocí upínacího mechanismu, který byl historicky inspirován lyžařským vázáním, jak bylo popsáno v předchozí kapitole věnující se historii a vývoji pedálů. Tento způsob fixace vyžaduje speciální obuv, která je na spodní straně vybavena destičkou, v cyklistickém slangu označovanou jako kufr, jež se zacvakne do pružinového mechanismu pedálu. Po zacvaknutí lze botu uvolnit rotací paty stranou. Díky tomuto mechanismu fixace dosahují nášlapné pedály nejvyšší efektivity přenosu síly ze všech typů pedálů.[23]

Nášlapné pedály dále můžeme rozdělit na dva podtypy podle cyklistické disciplíny pro které jsou navrženy. Pro silniční cyklistiku jsou převážně určeny jednostranné pedály s větší upínací destičkou zajišťující maximálně efektivní přenos síly, tělo pedálu bývá zhotoveno z karbonu nebo lehkých kovových slitin pro minimalizaci hmotnosti. Silniční tretry mají navíc zcela tuhou podrážku a destička z ní výrazně vyčnívá, což sice maximalizuje přenos síly, ale chůze v takové obuvi mimo kolo je velmi obtížná. Pro horskou cyklistiku jsou naopak určeny oboustranné pedály s menší destičkou zapuštěnou do podrážky boty, která umožňuje normální chůzi při sesednutí z kola, která v některých situacích v terénu je nezbytnou součástí horké cyklistiky. [20; 24]

Mezi hlavní výhody nášlapných pedálů patří dříve zmíněná vysoká efektivita přenosu síly, pevné spojení nohy s pedálem zabraňující nechtěnému sklouznutí nohy z pedálu a možnost zabírat i při pohybu nohy směrem nahoru. Oproti klipsnám představují bezpečnější řešení, jelikož v případě pádu se noha z pedálu sama uvolní. Nevýhodou je nutnost speciální obuvi, vyšší pořizovací náklady a potřeba tréninku pro zvládnutí nasedání a vysedání. Tento typ pedálu je proto vhodný především pro zkušenější jezdce a závodní disciplíny.[23; 25; 26]



Obrázek 2-8 Horský nášlapný pedál Shimano XTR [20]

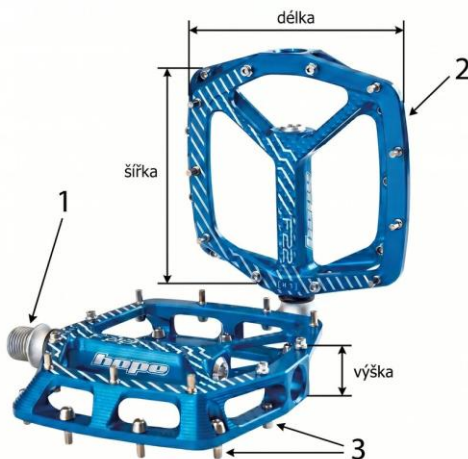
2.3.2 Platformové pedály

Platformové pedály jsou nejrozšířenějším typem pedálů, se kterým se setkáváme na většině rekreačních a dětských kol. V základní podobě se jedná o plochou destičku bez jakéhokoliv upínacího mechanismu, na které jezdec stojí v libovolné obuvi. Tento typ pedálu nevyžaduje žádnou speciální obuv ani trénink, což z něj dělá nejjednodušší a nejdostupnější variantu pro začínající jezdce. [23; 24]

Od těchto základních pedálů se odlišují takzvané MTB platformové pedály, které jsou konstrukčně výrazně propracovanější. Z konstrukčního hlediska se platformový pedál skládá ze tří základních částí, kterými jsou osa, tělo pedálu a piny. Osa společně s ložisky slouží k uchycení pedálu ke klice a zajišťuje jeho rotaci. Tělo pedálu tvoří samotnou platformu, na které spočívá noha jezdce a je navrženo tak aby poskytovalo dostatečnou oporu a stabilitu. Piny jsou malé šrouby vystupující z povrchu těla pedálu, které zajišťují zvýšenou přilnavost mezi pedálem a podrážkou obuvi, přičemž u kvalitnějších modelů jsou tyto piny vyměnitelné. [23; 27]

Těla MTB platformových pedálů jsou vyráběna z různých materiálů podle cenové kategorie. Levnější modely využívají plast nebo kompozit vyztužený skelnými vlákny, dražší modely pak hliníkové a hořčíkové slitiny, které nabízejí vyšší odolnost a nižší hmotnost. [24; 21]

Hlavní výhodou platformových pedálů je univerzálnost, jezdec může použít libovolnou obuv a nohu z pedálu může kdykoliv rychle sundat, což je klíčové v náročném terénu při sjezdových a enduro disciplínách. Nevýhodou oproti nášlapným pedálům je nižší efektivita přenosu síly, jelikož noha není pevně fixována a jezdec zabírá převážně při pohybu nohy směrem dolů. [23; 27]



Obrázek 2-9 Popis platformového pedálu; 1) Osa pedálu; 2) Tělo pedálu; 3) Piny; upraveno z [28]

2.3.3 Pedály s klipsnami

Pedály s klipsnami představují mezistupeň mezi základními platformovými pedály a nášlapnými pedály. Klipsna je kovový nebo plastový košíček přichycený k přední části pedálu, do kterého jezdec zasune špičku boty. Díky tomuto košíčku je noha zachycena ze přední a bočních stran, přičemž doplňkový řemínek přes nárt, který lze utáhnout za jízdy, zajišťuje nohu i shora. Samotná klipsna tedy není samostatným typem pedálu, ale příslušenstvím montovaným na klasický platformový pedál. [14; 23]

Klipsny nevyžadují žádnou speciální obuv a jejich pořizovací cena je výrazně nižší než u nášlapných systémů. Oproti klasickému platformovému pedálu zajišťují lepší fixaci nohy a umožňují jezdcům zabírat i při pohybu nohy směrem nahoru, čímž zvyšují efektivitu šlapání. [14; 25]

Hlavní nevýhodou klipsen je pomalé uvolnění nohy z pedálu, které je možné pouze pohybem nohy dozadu. V případě pádu jezdec nemusí stihnout nohu včas uvolnit, což z klipsen činí méně bezpečnou variantu oproti nášlapným pedálům, kde se noha uvolní automaticky rotací paty. Z tohoto důvodu jsou klipsny v současné cyklistice na ústupu a nahrazují je nášlapné systémy. Dnes je lze najít především u rekreačních jezdců a cyklistů dojíždějících do práce. [25; 26]



Obrázek 2-10 Pedály s klipsnami [29]

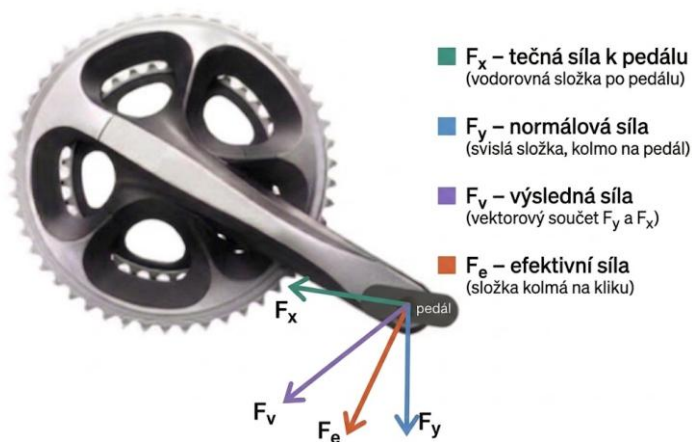
2.4 Silové působení na pedál

Pro správné stanovení zatěžovacího cyklu pedálu při pevnostní a únavové analýze je nezbytné nejprve porozumět biomechanice šlapání. Znalost průběhu cyklu nám pak následně umožní stanovit druh zátěžného cyklu pro únavové zatěžování.

2.4.1 Biomechanika šlapání

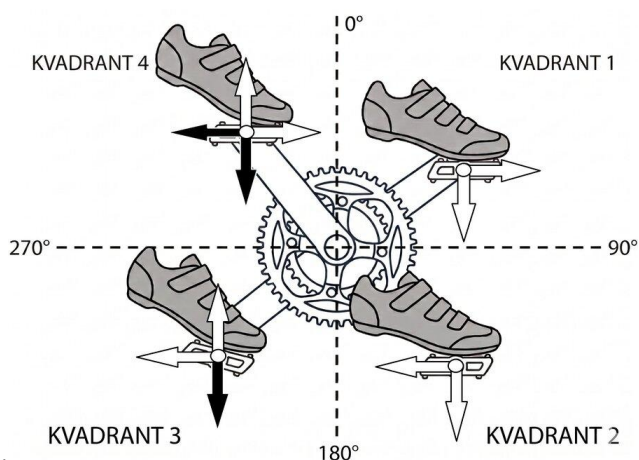
Šlapání je periodický pohyb kdy jedna otáčka kliky odpovídá jednomu cyklu. Dráha, po které se chodidlo jezdce pohybuje je kruhová a její poloměr je určen délkou kliky. Délka kliky zároveň zásadně ovlivňuje moment, který pohání řetězový převod kola.[30; 31; 30]

Sílu působící na pedál lze měřit ve dvou základních složkách, jak je znázorněno na obrázku 2-11. Normálová síla F_y je kolmá k povrchu pedálu, ale její směr závisí na poloze kliky a tečná síla F_x působí vodorovně podél povrchu pedálu. Tyto dvě složky tvoří výslednou sílu F_v jako jejich vektorový součet. Z výsledné síly pak lze zjistit efektivní složku F_e , která je kolmá na kliku, generuje moment na klikový mechanismus a jako jediná vykonává užitečnou práci pohánějící kolo. Druhá složka výsledné síly působí podél kliky a k pohonu kola nepřispívá. Axiální složka působící ve směru osy pedálu do strany se při analýze zatížení zanedbává.[31; 32]



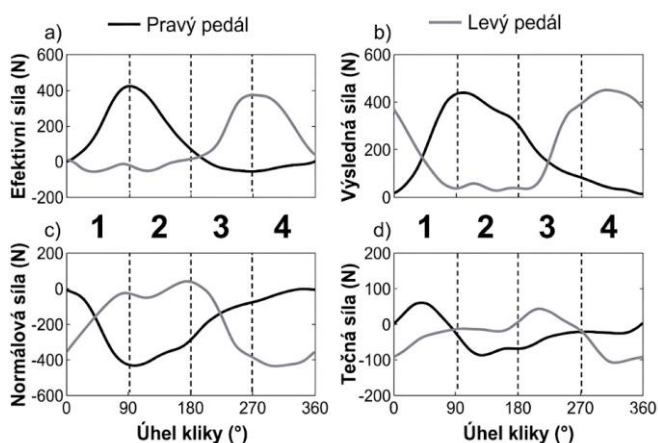
Obrázek 2-11 Síly působící na pedál, upraveno z [31]

Pedálový cyklus lze rozdělit do čtyř kvadrantů. Na obrázku 2-12 jsou znázorněny směry pedálových sil ve čtyřech kvadrantech. Bílé šipky představují ideální směr působení síly pro maximální efektivitu přenosu, černé šipky pak skutečné naměřené hodnoty normálové a tečné síly. Ideálního stavu lze dosáhnout pouze při použití nášlapných pedálů, které umožňují aktivně táhnout pedál nahoru i ve třetím a čtvrtém kvadrantu, jak bylo popsáno v kapitole věnující se typologii pedálů. Druhý kvadrant představuje hlavní pracovní fázi, kdy efektivní síla F_e dosahuje svého maxima při úhlu kliky 90° . Ve třetím a čtvrtém kvadrantu efektivní síla F_e klesá k nule a noha na platformovém pedálu aktivně nepřispívá k pohonu kola. Kontinuitu pohybu klikového mechanismu v této fázi zajišťuje protilehlá klikka, která se v daný okamžik nachází ve své pracovní fázi.[31; 32]



Obrázek 2-12 Pedálový cyklus rozdělený do 4 kvadrantů, upraveno z [31]

Z průběhů sil znázorněných na graf 2-1 je vidíme, že normálová síla F_y dosahuje svého maxima při úhlu kliky přibližně 90° a v průběhu celého cyklu zůstává kladná. Efektivní síla F_e má podobný průběh, ale ve třetím a čtvrtém kvadrantu klesá k nule, nebo nabývá záporných hodnot. Tečná síla F_x mění své znaménko v průběhu cyklu. Z charakteru průběhu efektivní síly F_e vyplývá, že zatížení osy pedálu má charakter mívajícího cyklu.[31]

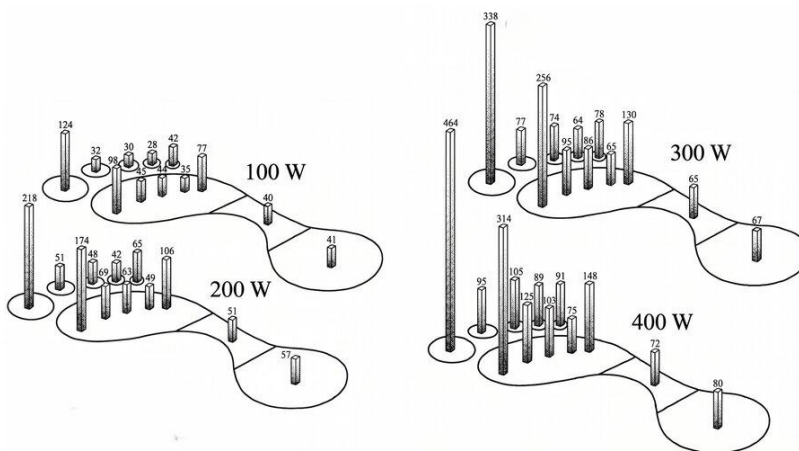


Graf 2-1 Průběhy složek síly působících na pedál v závislosti na úhlu kliky: (a) Efektivní síla, (b) výsledná síla, (c) normálová síla, (d) tečná síla, upraveno z [31]

2.4.2 Rozložení tlaku na pedál

Ke kontaktu chodidla s pedálem dochází v přední části nohy, v oblasti prstů a metatarzů. Dominantní strukturou přenášející tlak na pedál je oblast prvního metatarzu a palce na vnitřní straně nohy, přičemž tlak postupně klesá směrem k vnější části a středu nohy, jak je znázorněno na obrázku 2-13. Přesto jsou při šlapání zatíženy i ostatní části chodidla, střední metatarzy, střed nohy i pata. Tento nepoměr mezi vnitřní a vnější stranou nohy se s rostoucím výkonem jezdce dále roste.[33; 34]

Největší tlak pod chodidlem nastává při úhlu kliky 90° , tedy ve chvíli, kdy efektivní síla F_e dosahuje svého maxima. Výkon jezdce je hlavním faktorem ovlivňujícím velikost tlaku na pedál a s jeho nárůstem nejvíce roste tlak v oblasti vnitřní části přední nohy. [33]



Obrázek 2-13 Rozložení tlaku od chodidla při úhlu kliky 90° při různých výkonech, upraveno z [34]

2.5 Průzkum a analýza trhu platformových pedálů

V současné době máme na trhu poměrně velké množství výrobců zaměřujících se na platformové pedály pro dospělá horská kola. Díky tomu můžeme vybírat z velké a rozmanité palety pedálů. Nabídka na velkých českých e-shopech pokrývá od levnějších plastových a kompozitních pedálů až po prémiové modely u kterých je tělo pedálu zhotovené hliníkových slitin. Tato variabilita umožňuje volbu vhodného poměru mezikte vhodným poměrem mezi hmotností, mechanickými vlastnostmi, kvalitou zpracování, a ne méně důležitou pořizovací cenou. [35; 36; 37; 38]

2.5.1 Segment dětských pedálů

Oproti segmentu určeným pro dospělé cyklisty je dětský segment výrazně omezený, co se týče výběru. V současné době na českém trhu existuje pouze pár exemplářů určených pro dětskou horskou cyklistiku, tyto pedály dost často vyskytují na dvou cenových extrémech. Prvním extrémem jsou pedály pohybující se v jednotkách set korun za pár a na straně druhé tu máme prémiové výrobky, které se cenově pohybují i přes dva tisíce korun za pár. Díky tomuhle rozdělení koncový zákazník má na výběr mezi levným a často nevyhovujícím pedálem pro náročnější jízdu v terénu a drahým, který ve většině případů nedává ekonomicky smysl ho pořizovat pro dítě. Současný přehled dostupných dětských nebo modelů s menšími rozměry na českém trhu je uveden v tabulce 2-1. [35; 36; 37; 38]

Ekonomicky varianty na trhu často naráží na kompromisy, které ovlivňují funkčnost pedálu. Tělo pedálu bývá často vyrobeno ze zmiňovaných plastů (nejčastěji nylon) a kompozitu. Jedním z kompromisů jsou piny. U levných pedálů tyto piny jsou často součástí těla pedálu anebo úplně chybí, tento problém výrazně ovlivňuje přilnavost boty k tělu pedálu a případnou výměnu poškozeného pinu za nový. U levnějších modelů pedálů bývají místo průmyslových ložisek použita volná kuličková ložiska. Kuličky se zde odvalují přímo po ose pedálu a nalisovaném kroužku v těle pedálu, přičemž celé ložisko je staženo speciálně tvarovanou maticí. Toto konstrukční řešení je funkční, avšak servis a výměna v případě opotřebení je náročnější a ve většině případů nemožná než u průmyslových ložisek. Pedály s touto konstrukcí často mají vyšší profil. [35; 35; 36; 37; 38]

Prémiové modely jsou kombinací toho nejlepšího, co nám výrobci dokáží nabídnout. Konstrukce je většinou bez kompromisů. Tělo pedálu je vyráběno ze slitiny hliníku, díky kterému se zvyšuje odolnost těla pedálu a umožňuje nižší profil pedálu. Osy jsou vyráběny z chrom – molybdenové oceli (nečastěji 42CrMo4). Velkou výhodou je využívání průmyslových ložisek, díky nimž pedál je možno lépe servisovat v případě opotřebení ložiska jej vyměnit za nový kus. Piny jsou zde vyměnitelné, často se jedná o malé šrouby s hlavou vnitřním šestihranem anebo se opravdu jedná o kovový unikátní pin, který výrobce nabízí jako příslušenství. Prémiové modely pedálů zpravidla nejsou vybaveny odrazkami, a to jak v dětském, tak v dospělém segmentu. [35; 36; 37; 38]

Absence odrazek představuje v České republice legislativní problém, jelikož dle přílohy č. 8 vyhlášky č. 153/2023 Sb. o schvalování technické způsobilosti vozidel a technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích musí být jízdní kolo provozované na pozemních komunikacích vybaveno na obou stranách obou pedálů odrazkami oranžové barvy. Pedál bez odrazek tak není způsobilý k provozu na pozemních komunikacích, pokud nejsou odrazky nebo světlo odrážející materiály umístěny v blízkosti obuvi jezdce.[39]

Tabulka 2-1 Přehled dostupných modelů včetně vybraných parametrů

Model	Cena (kč)	Rozměr (mm)	Profil (mm)	Matériál těla	Piny	Ložiska	Hmotnost (g/pár)	Odrážka	Zdroj
BTWIN 20"/24"	179	87 × 85	–	Plast	Integrované, plastové	–	–	Ano	[61]
BTWIN 24"/26"/28"	179	97 × 80	–	Plast	Integrované, plastové	–	–	Ano	[62]
PRO-T 630	129	95 × 65	–	Plast	Protiskluzová úprava	Kuličková	272	Ano	[63]
Early Rider Resin Platform (P1)	699	85 × 76	21	Nylonový kompozit	Integrované, plastové	Zapouzďřená	202	Ano	[64]
Early Rider Works Comp	899	94 × 85	20	Hliníková slitina	Integrované, plastové	Zapouzďřená	269	Ano	[65]
Crankbrothers Stamp 1 Small Gen 2	1 599	100 × 100	15,5	Nylonový kompozit	Vyměnitelné, kovové	IGUS kluzné	349	Ne	[51]
OneUp Small Composite	1 299	97,5 × 92	18	Nylonový kompozit	Vyměnitelné, kovové	Kluzné, kuličkové	330	Ne	[66]
Chromag Radar	2 199	93 × 70	13	Hliníková slitina	Vyměnitelné, kovové	Kluzné, kuličkové	300	Ne	[67]

2.6 Aditivní výroba – FDM technologie

Součástí práce je výroba pedálu, při které byla použita metoda FDM (Fused deposition modeling) pro výrobu těla pedálu. Tato metoda patří mezi nejrozšířenější metody aditivní výroby. Metoda funguje na principu, vtlačování termoplastického materiálu ve tvaru struny neboli filamentu do trysky tiskárny. Tryska materiál taví a následně nanáší po vrstvách na tiskovou podložku. Abychom mohli vytisknout model, je potřeba v první řadě mít 3D model součásti, kterou chceme tisknout. 3D model je následně potřeba nahrát do softwaru označovaným jako slicer. Slicer je software, ve kterém se nastavují parametry tisku 3D modelu. Program na jejich základě rozřeže model na jednotlivé vrstvy, propočítá dráhy trysky. Poté se sada instrukcí s parametry tisku exportuje a nahraje do 3D tiskárny, kdy pak následně můžeme začít tisknout. [40]

Jednou z nejdůležitějších vlastností FDM výtisků je jejich nepochybně anizotropie. Výtisky dosahují vyšší pevnosti v rovině nanášení vrstev než ve směru kolmém, kde je mez pevnosti limitována kvalitou adheze mezi jednotlivými vrstvami.[41] Proto je vhodné součásti orientovat tak, aby hlavní osy zatížení byly souběžné s rovinou vrstev.[40]

2.7 Materiály pro technologii FDM

Na trhu máme velký výběr filamentů. Výrobci ke každému filamentu uvádí i jeho materiálové vlastnosti, které v některých případech mohou být zavádějící. Pokud se totiž bavíme o pevnosti, tak výrobci hodnoty stanovují většinou u vzorku vyrobeném vstřikováním. Pokud tedy materiál tiskneme hodnoty se budou lišit, jelikož pevnost ovlivňuje několik faktorů, mezi které patří orientace tisku, výška vrstvy, teplota tisku, vlhkost a stáří filamentu.[41]

Mezi materiály vhodné pro funkční díly patří například PETG a ASA. Každý z těchto materiálů disponuje specifickými vlastnostmi, které jsou popsány v následujících podkapitolách.[42]

2.7.1 PETG

PETG neboli polyethylentereftalát s přídavkem glykolu, patří mezi jeden z levnějších a z nejjednodušších materiálů pro tisk. Jelikož se materiál nekrouť a má malou teplotní roztažnost, umožňuje tisk velkých modelů i na otevřených tiskárnách. Dosahuje poměrně velké pevnosti, houževnatosti a dobré teplotní odolnosti.[42] PETG má ale i nevýhody, mezi které patří náchylnost k stringování a materiál hůře zvládá tisk přepisů a přemostování.[43] Ovšem jeho hlavní nevýhodou je, že se nejedná o UV stabilní materiál, proto není vhodný na dlouhodobé venkovní použití.[44; 42]

2.7.2 ASA

ASA neboli akrylonitril-styren-akrylát je materiál, který vyniká hlavně svojí odolností proti UV záření a teplotní odolností, což z něj činí ideální materiál pro venkovní použití.[45] Jeho tisknutelnost je ale horší, kdy při tisku může docházet k silnému kroucení. Je tedy žádoucí tisk provádět v krytých tiskárnách, kvůli vysoké teplotě tisku. Materiál podobně jako PETG má dobré mechanické vlastnosti jako je rázová houževnatost a pevnost, což z něj dělá vhodný materiál na více namáhané díly. ASA je rozpustný v acetonu, to umožňuje vyhlazování acetonovými párami. [45; 44]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z přehledu současného stavu poznání vyplývá hned několik problémů, které je potřeba řešit při návrhu platformového pedálu pro dětskou horskou cyklistiku.

Průzkum trhu ukázal, že nabídka pedálů pro dětské jezdce je výrazně omezená a pohybuje se na dvou cenových extrémech. Levné modely zpravidla nedisponují vyměnitelnými piny potřebnými pro dostatečnou přilnavost v náročnějším terénu, prémiové modely zase nedávají ekonomicky smysl pro dítě, které kolo za několik sezón přeroste. Na trhu tedy chybí varianta střední cenové kategorie s dostatečnou funkčností s důrazem na servisovatelnost a přijatelnou cenou.

Dalším problémem je nedostatek pedálů přizpůsobených anatomii dětského chodidla, přičemž optimální rozměry platformy je nutné stanovit s ohledem na zvolenou cílovou skupinu.

Při návrhu je také nutné počítat s možností vybavení pedálu odrazkami pro splnění požadavků vyhlášky č. 153/2023 Sb., jelikož právě tento prvek u prémiových pedálů zpravidla chybí.

3.2 Cíl práce

Cílem práce je návrh konstrukce a výroba platformového pedálu pro dětské horské kolo s ohledem na anatomii dětského chodidla. Tělo pedálu bude vyrobeno technologií FDM tisku, osa pedálu bude vlastním konstrukčním návrhem dimenzovaným pevnostními výpočty.

3.2.1 Dílčí cíle práce jsou následující:

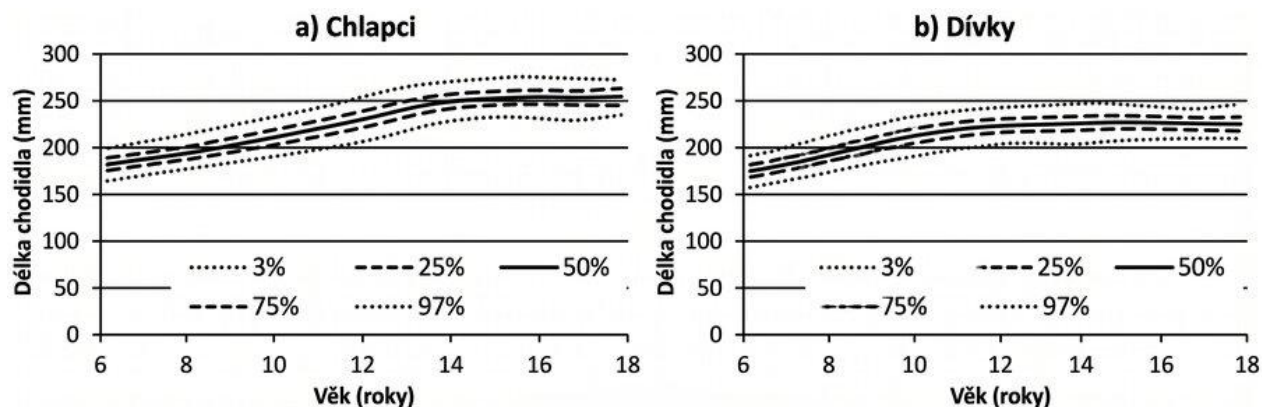
- přehled platformových pedálů komerčně dostupných na trhu
- volba cílové skupiny jezdců a stanovení rozměrů pedálu
- analýza zatížení a pevnostní výpočet osy pedálu
- konstrukce pedálu
- výroba prototypu ve Strojlabu a testování

3.3 Volba cílové skupiny jezdců

Při volbě cílové skupiny jde o stanovení profilu jezdce, pro kterého bude pedál určen, aby bylo možné návrh co nejvíce přizpůsobit jeho potřebám.

Zásadním parametrem je věk jezdce, od kterého se odvíjejí další parametry důležité pro návrh. Vycházíme-li z rozdělení dětských kol, pedál by měl být určen pro kategorii kol začínající na 20 palcích. Minimální věk jezdce odpovídá spodní hranici věkové kategorie pro kola 20", tedy 5 let. Pro stanovení horní věkové hranice byla využita statistická data vývoje růstu nohy zobrazená v grafu 3-1. Z dat vyplývá že po 12. roce života noha během několika let dosáhne své dospělé velikosti v závislosti na pohlaví a poté stagnuje.[46] Jelikož noha kolem 12 let dosahuje rozměrů blízkých dospělé noze, byla jako horní věková hranice zvolena hodnota 11 let.

Cílová skupina je tedy definována jako dětští jezdci do 11 let, přičemž lze předpokládat že většina potenciálních uživatelů se bude nacházet v horní části tohoto věkového rozsahu.



Graf 3-1 Závislosti délky nohy na věku dle pohlaví, upraveno z [46]

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Koncepce těla pedálu

4.1.1 Tvar platformy

Při návrhu tvaru těla pedálu bylo vycházeno z analýzy prémiových platformových pedálů. Výrobci nabízejí dva základní tvarové přístupy. Prvním je symetrický tvar kontaktní plochy pedálu, kdy je plocha rozdělena osou pedálu přesně uprostřed, typický například pro model Trail Roc značky LOOK. [45] Symetrický tvar nese jednu zásadní nevýhodu pro pedály s vyměnitelnými piny, kdy při symetrickém rozdělení nelze umístit piny do stejných pozic na obou stranách pedálu zároveň. Druhým přístupem je nesymetrický tvar, kdy kontaktní plochy jsou vůči sobě posunuty. Příkladem tohoto provedení může být dříve zmíněný Chromag Radar. [46]

Pro navrhovaný pedál byl zvolen nesymetrický přístup. Posunutím kontaktních ploch vůči sobě vznikne geometrie umožňující umístit piny na stejných pozicích na obou stranách pedálu, což zjednodušuje jejich montáž i výměnu. Toto posunutí zároveň umožňuje lepší využití plochy pedálu, jak vyplývá z kapitoly věnující se rozložení tlaku chodidla, většina hmotnosti je přenášena přední částí chodidla, takže zmenšená plocha v zadní části nijak zásadně neovlivňuje funkčnost.

4.1.2 Rozměry platformy

Rozměry platformy jsou pro návrh zásadní, jelikož jak vyplývá z průzkumu trhu, pedálů přizpůsobených menší dětské noze není mnoho. Hlavním faktorem při stanovení rozměrů byla šířka platformy, pro jejíž návrh bylo vycházeno z dat Celostátního antropologického výzkumu. Pro cílovou skupinu jezdců do 11 let dosahuje průměrná šířka nohy chlapců 84 mm. [47] Na základě tohoto údaje byl zvolen rozměr platformy (85 × 85) mm. Zároveň byl záměrně zvolen co nejnižší profil pedálu pro zvýšení stability jezdce a snížení pravděpodobnosti zachycení pedálu v terénu.

4.1.3 Materiál těla pedálu

Součástí práce je i výroba pedálu ve strojní laboratoři. Jelikož se jedná o kusovou výrobu a cílem je navrhnout pedál ve střední cenové relaci, nebyla pro tělo pedálu zvolena hliníková slitina jako u prémiových modelů, a to z čistě nákladových důvodů. Technologie FDM byla pro výrobu těla pedálu jasnou volbou, jelikož fakultní dílna disponuje potřebným vybavením a tato metoda je pro kusovou výrobu ideální. Jak bylo popsáno v kapitole věnující se materiálům pro FDM tisk, oba uvažované materiály ASA i PETG disponují dobrou pevností a houževnatostí. Z těchto dvou materiálů byl zvolen ASA, který i přes obtížnější tisk nabízí zásadní výhodu v podobě UV stability, kterou PETG nedisponuje.[44; 45; 43; 42] Tělo pedálu tak při venkovním použití nebude na slunci degradovat.

4.2 Koncepce osy pedálu

Uchycení osy do kliky je zajištěno za pomoci závitu 9/16" 2OTPI. Jedná se o standart, který nalezneme na většině jízdních kol, kdy jedinou výjimku představují dětská kola do průměru kol 20", kde najdeme závit 1/2"TPI, jak bylo popsáno v kapitole 2-1. Ovšem osy u páru pedálu nejsou stejné a liší se pravá od levé v tom, že na pravém pedálu je pravý a na levém pedálu levý závit.

Každý pedál na trhu má většinou svoji unikátní osu, která je běžně vyráběná z oceli. U levných platformových pedálů, najdeme poměrně mohutnou černěnou ocelovou osu o neuváděném druhu oceli, která zároveň slouží jako vnitřní kroužek, protože tyto pedály nemají klasická ložiska ale pouze kuličky, které se odvalují po ose a po kovové vložce v těle pedálu. Dražší provedení už využívá chrom-molybdenové oceli, a průmyslová ložiska. Osy díky lepší oceli s kombinací s průmyslovými ložisky mohou být užší a tím napomáhat k užšímu profilu pedálu, který má své výhody. Například výrobce Ambit přímo uvádí pro osu svého pedálu HAXN HOITA ocel 42CrMo4.[48]



Obrázek 4-1 Fotka navrhnuté osy

Pro navrhovaný pedál byla zvolena hliníková slitina AW7075-T6511. Srovnání klíčových vlastností obou materiálů je uvedeno v tabulce 4-1. Z tabulky je patrné, že AW7075-T6511 dosahuje přibližně třikrát nižší hustoty než ocel při zachování dostatečné pevnosti pro zatížení od dětského jezdce.[49] Ocel 42CrMo4 je navíc v tepelně zpracovaném stavu obtížněji obrobitelná.[50]

Tabulka 4-1 Základní porovnání materiálů AW7075-T6511, 42CrMo4 [49; 50]

Vlastnost	AW7075-T6511	42CrMo4 (zušlechťená, d ≤ 40 mm)
Hustota (g/cm ³)	2,81	7,90
R _m (MPa)	572	1000–1200
R _e (MPa)	–	750
R _{p0,2} (MPa)	503	–
Tažnost A (%)	6–11	11
Obrobitelnost	Dobrá	Horší

4.3 Volba ložisek

Z analýzy konstrukce komerčně dostupných pedálů vyplývá že výrobci používají tři přístupy k uložení osy. Prvním je systém volných valivých elementů (kuliček) odvalujících se po ose a kovové vložce v těle pedálu, druhým jsou pouze kluzná pouzdra jako například u výrobce Crankbrothers, třetím pak kombinace obou typů ložisek.[51]

Pro navrhovaný pedál byla zvolena kombinace kluzného PTFE ložiska s přírubou a průmyslového kuličkového ložiska, přičemž každé ložisko je axiálně vodící pouze v jednom směru, čímž by měla být prodloužena životnost kuličkového ložiska. Kluzné ložisko bylo umístěno na vnitřní straně osy blíže ke klice, kde působí největší ohybový moment a kde dle kapitoly věnující se rozložení tlaku chodidla vzniká nejvyšší zatížení od jezdce. Větší průměr kluzného ložiska zde zároveň umožňuje zachovat větší průměr osy při nízkém profilu pedálu. Kuličkové ložisko je umístěno na vnější straně, kde je ohybový moment nižší.

4.4 Shrnutí koncepce

Na základě analýzy problému a poznatků z rešerše byly stanovené klíčové parametry pro navrhovaný pedál. Přehled je uveden v tabulce 4-2.

Tabulka 4-2 Shrnutí koncepce

Parametr	Zvolené řešení
Rozměr platformy	85 × 85 mm
Profil pedálu	Co nejnižší
Tvar platformy	Nesymetrický
Piny	Vyměnitelné
Odrážka	Příprava na osazení
Materiál těla	ASA, FDM tisk
Závit osy	9/16" 20 TPI
Materiál osy	AW7075-T6511
Ložiska	Kluzné PTFE s přírubou + průmyslové kuličkové

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Tělo pedálu

Po stanovení koncepčních parametrů popsaných v minulé kapitole bylo přistoupeno k návrhu těla pedálu. Vývoj probíhal postupně, kdy vznikla první funkční verze, která byla následně upravována do finální verze.

5.1.1 Verze první

Po stanovení koncepčních parametrů bylo přistoupeno k návrhu těla pedálu. Původní verze počítala s koncepcí, kdy odrazka bude pouze ve formě samolepky a pedál měl proto pouze rovnou plochu pro její nalepení. Současně vznikla i varianta s dvěma otvory pro uchycení standardní odrazky dostupné v e-shopech, označená jako verze 1b. Tato verze byla tištěna záměrně bez krytky osy za účelem úspory materiálu, jelikož sloužila primárně jako podklad pro ověření základní geometrie a jako základ pro další vývoj. Tělo neobsahovalo žádné odlehčovací otvory a bylo tištěno s vyššími hodnotami perimetrů a výplně. Konstrukce pedálu byla navržena tak aby bylo možné do těla nalisovat kuličkové ložisko kluzné pouzdro a následně nastrčit na osu.

Po vytisknutí bylo zjištěno že některé otvory byly příliš malé v důsledku smršťování materiálu ASA při tisku. Tato verze sloužila i jako zkušební vzorek pro úpravu povrchu acetonovými párami.

5.1.2 Finální verze

Na základě první verze bylo tělo lehce upraveno, kdy přibyly odlehčovací otvory na stranách ostré vnější hrany byly zaobleny. Díky úpravě parametru tisku zmíněných otvorů. Dosáhla finální verze nižší hmotnosti o více než 10 %. Kdy největší roli při snížení hmotnosti nehrály zmíněné otvory, ale upravené parametry tisku jako perimetry, hustota výplně. Porovnání verzí je patrné na obrázku 5-1.

Finální verze byla oproti verzi 1b vytištěna i s krytkou osy, na kterou byl umístěn o-kroužek 14×1 , který složí jako těsnění. Model této verze je součástí přílohy 2.



Obrázek 5-1 Porovnání verzí těla pedálu; vlevo verze 1b, vpravo finální verze

5.1.3 Parametry tisku

Tělo pedálu bylo tištěno na tiskárně Prusa Core One z filamentu Fillamentum ASA s použitím výchozího přednastavení Prusa Sliceru pro daný materiál. Přehled parametrů tisku je uveden v tabulce 5-1. Model byl orientován na plocho, aby hlavní zatížení působilo kolmo na tiskové vrstvy. [41] Kvůli zvětšenému průměru otvoru pro přírubu ložiska byl model tištěn na podporách, mezera nad podporami v ose Z byla snížena na 0,15 mm, při vyšších hodnotách docházelo k chybám tisku. Jako typ výplně byla zvolena struktura Gyroid s hustotou 40 %.

Tabulka 5-1 Přehled parametrů tisku

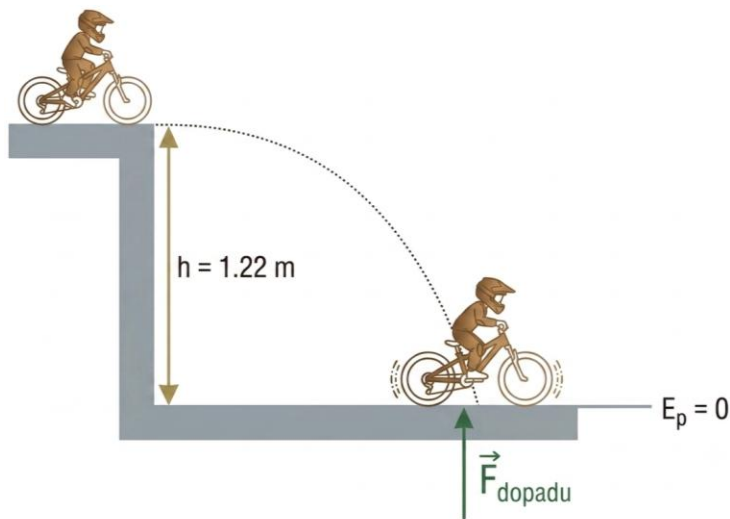
Parametr	Hodnota
Tiskárna	Prusa Core One
Tryska (mm)	0,4
Filament	Fillamentum ASA
Tisková podložka	Texturovaná
Orientace modelu	Na plocho
Typ výplně	Gyroid
Hustota výplně (%)	40
Počet perimetrů	6
Límec (mm)	10
Mezera nad podporami Z (mm)	0,15
Podpory	Ano
Doba tisku (2 ks + krytky)	11 h 23 min
Spotřeba filamentu (g)	128,9
Cena filamentu (Kč)	~114
Cena elektrické energie (Kč)	12,12

5.2 Osa pedálu

Osa byla vyrobena z materiálu EN AW-7075-T6511. Pro zaručení smontovatelnosti bylo potřeba osu navrhnout, tak aby bylo možné nasunout jednotlivé díly. Přesné rozměry osy najdeme ve výkresové dokumentaci Příloze 2.

5.2.1 Pevnostní výpočet osy

Pro stanovení podmínek byla využita norma ASTM F2043-13 (2018), která definuje kategorie kol podle použití. Byla zvolena kategorie 4, pro skoky do výšky $h = 1,22$ m. [52] Modelová situace pro výpočet síly působící při dopadu je vyobrazena na obrázku 5-3. Hmotnost jezdce byla stanovena pro děti do 11 let s percentilem 97 na 54 kg.[53] Budeme uvažovat také průměrnou hmotnost juniorského kola 13 kg, vycházející z poznatků z kapitoly 2-1. Hmotnost vybavení jezdce byla stanovena na 3 kg. Celková hmotnost tedy činí $m = 70$ kg a uvažujeme tíhové zrychlení $g = 9,81$ m/s².



Obrázek 5-2 Modelová situace dopadu [54]

Při výpočtu síly F_{dopadu} budeme vycházet ze základů dynamiky. Nejdříve byla stanovena vertikální rychlost v v okamžiku dopadu kola na zem, která byla vyjádřena ze zákona zachování energie.

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \quad (1)$$

$$m \cdot g \cdot h + 0 = 0 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,22} = 4,89 \text{ m/s} \quad (3)$$

Z definice pro zrychlení a spočteme hodnotu zrychlení. Pro výpočet budeme potřebovat ještě hodnotu času, za kterou je jezdec dokáže potlumit náraz. Pokud by nedocházelo k tlumení nárazu, velikost zrychlení by šla k nekonečnu. Hodnotu času jsme stanovili ze studie zabývající se seskoky parkuristů, kdy čas potlumení nárazu byl měřen ve 3 výškách seskoku 0,9; 1,8 a 2,7 m.[55] Pro náš případ byla konzervativně zvolena hodnota $t = 230 \text{ ms}$.

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

$$a \cdot dt = dv \quad (5)$$

$$\int_0^t a \cdot dt = \int_0^v dv \quad (6)$$

$$\int_0^{0,230} a \cdot dt = \int_0^{4,89} dv \quad (7)$$

$$a \cdot 0,230 = 4,89 \quad (8)$$

$$a = \frac{4,89}{0,23} = 21,26 \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

Po určení zrychlení a hmotnosti, jsme F_{dopadu} vyjádřili za pomoci 2. Newtonova zákona.

$$F_{dopadu} = m \cdot a = 70 \cdot 21,26 = 1\,488,20 \text{ N} \quad (10)$$

Pro získání síly na jeden pedál $F_{pedál}$ byla F_{dopadu} vydělena dvěma, jelikož tato síla se rovnoměrně rozloží mezi oba pedály.

$$F_{pedál} = \frac{F_{dopadu}}{2} = \frac{1488,2}{2} = 744,10 \text{ N} \quad (11)$$

Síla na pedál dále byla rovnoměrně rozdělena mezi kuličkové ložisko a kluzné pouzdro. Vycházíme z rozložení tlaku z kapitoly 2-4. Toto rozložení je konzervativnější pro náš následný výpočet ohybového momentu na osu. Síla tedy $F_{ložiska}$ bude poloviční než síla na pedál $F_{pedál}$.

$$F_{ložiska} = \frac{F_{pedál}}{2} = \frac{744,10}{2} = 372,05 \text{ N} \quad (12)$$

Pro výpočet osy na ohyb zašroubované osy v klice, rozdělíme osu na dva modely. První model bude vetknutá osa zatížena dvěma silami $F_{ložiska}$ a druhá část nacházející se v klice bude uvažována jako předepjatý šroub. Detailní postup v příloze 1.

Dle výpočtů v příloze 1, byly stanoveny potenciálně nebezpečné průřezy A, B, C a D. Jako kritický se ukázal průřez B. Kdy napětí z M_{oB} ohybového momentu do bodu B a průřezového modulu W_o v ohybu v bodě B. Jelikož se jedná o houževnatý materiál podle Shigley, tak σ_{oB} je zároveň maximální normálové napětí pro statické zatížení. Bezpečnost k_b byla vypočítaná jako podíl smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a napětím σ_{oB} .

$$M_{oB} = F_{ložiska} \cdot (54 + 5,5) + F_{ložiska} \cdot 5,5 =$$

$$M_{oB} = 372,05 \cdot (54 + 5,5) + 372,05 \cdot 5,5 = 24\,183,25 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (13)$$

$$\sigma_{oB} = \frac{M_{oB}}{W_{oB}} = \frac{24\,183,25}{\frac{\pi \cdot d_B^3}{32}} = \frac{24\,183,25}{\frac{\pi \cdot 10^3}{32}} = 246,33 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$k_b = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{oB}} = \frac{503}{246,33} = 2,04 \quad (15)$$

5.2.2 Výpočet únavového zatěžování

Výpočet byl primárně prováděn podle knihy Konstruování strojních součástí. [56] Podmínky pro zatěžovací cyklus vycházely z normy ISO 4210-8. [57] Pedál je tedy zatěžován hmotností 80 kg dle normy ISO 4210-8.[57] Cyklus dle kapitoly 2-4 byl zvolen jako míjivý. Vyšetřované místo tedy bylo opět místo B, ale nyní je síla pro únavové zatížení F působící na ložisko 392,4N. Kompletní výpočet uveden v Příloze 1.

Pro výpočet maximálního napětí $\sigma_{max}^{B_{unav}}$ byl určen součinitel vrubu $\beta = 1,3$ a ohybový moment $M_o^{B_{unav}} = 25\,506 \text{ N} \cdot \text{mm}$.

$$\sigma_{max}^{B_{unav}} = \frac{M_o^{B_{unav}}}{W_{oB}} \cdot \beta = \frac{M_o^{B_{unav}}}{\frac{\pi \cdot d_B^3}{32}} \cdot \beta = \frac{25\,506}{\frac{\pi \cdot 10^3}{32}} \cdot 1,3 = 337,74 \text{ MPa} \quad (16)$$

K určení korigované meze únavy σ'_{Co} byla použita Marinova rovnice.[56]

$$\sigma'_{Co} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot \sigma_C = 0,838 \cdot 1,08 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 159 = 117 \text{ MPa} \quad (17)$$

Následně bylo stanoveno ekvivalentní napětí σ_{ar} vycházející z Goodmanova kritéria.[58] Ekvivalentní napětí nám umožnilo použít postup výpočtu pro počet cyklů, pro materiály bez trvalé meze únavy, mezi které se řadí i hliníkové slitiny.[58]

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}} = \frac{168,87}{1 - \frac{168,87}{572}} = 239,51 \text{ MPa} \quad (18)$$

Byly stanoveny koeficienty a a b pro výpočet počtu cyklů N časované pevnosti.

$$N = \left(\frac{\sigma_{Ar}}{a} \right)^{\left(\frac{1}{b} \right)} = \left(\frac{239,6}{1122} \right)^{\left(\frac{1}{-0,1128} \right)} = 902\,341 \text{ cyklů} \quad (19)$$

Vypočtená životnost 9krát převyšuje minimální počet cyklů požadovaný normou.[57] Ačkoliv se může jednat o zdánlivé předimenzování, je nutné zohlednit odlišné únavové chování materiálů. Zatímco u běžně používaných ocelových os lze předpokládat dosažení trvalé meze únavy (neomezené životnosti), hliníkové slitiny tuto vlastnost postrádají. Navržená osa tak vykazuje časovanou únavovou pevnost odpovídající vypočtené hodnotě počtu cyklů v oblasti vysokocyklové únavy.

5.2.3 Utahovací moment osy

Pro zajištění spolehlivé funkce pedálu je nutné stanovit předepsaný utahovací moment. Spoj osy s klikou funguje na principu předepjatého šroubu, přičemž vhodná orientace závitů (levý a pravý) zamezuje samovolnému povolování. Při dotažení na utahovací moment bude část osy nacházející se v klice namáhána pouze na tah. Detailní výpočet v Příloze 1. Utahovací moment byl počítán pro stejné podmínky jako únavový výpočet osy. Síla přepětí byla stanovena $F_i = 7\,848\text{ N}$. A konečný utahovací moment M byl stanoven vzorcem:

$$M = K \cdot F_i \cdot d = 0,1315 \cdot 7\,848 \cdot 0,014288 = 14,75\text{ N} \cdot \text{m} \quad (20)$$

5.2.4 Výroba

Výroba probíhala ve školní dílně, pod Ústavem strojírenské technologie na VUT. Osa pedálu byla vyrobena z tyčového polotovaru Tyč EN AW-7075-T6511 $\varnothing 25 \times 105$ na konvenčním soustruhu. Soustružením byly zhotoveny jednotlivé průměrové stupně osy včetně závitu 9/16" 20TPI. Plochy pro klíč byly následně vyrobeny na frézce za použití děličky. Plochy pod ložisky byli následně broušeny na soustruhu. Výkres osy je součástí přílohy 2.



Obrázek 5-3 Fotka výroby osy na soustruhu

5.3 Ložiska

Otáčení těla pedálu vůči ose zajišťuje kuličkové ložisko ZEN 686-2Z nalisované v těle pedálu z vnější strany a kluzné PTFE přírubové pouzdro SKF PCMF 101209 E z vnitřní strany blíže ke klíci.[59; 60] Kuličkové ložisko je sevřeno mezi osazením na ose a podložkou s maticí, kluzné pouzdro je axiálně vedeno přírubou opřeno o osazení. Obě ložiska jsou tedy axiálně vodící pouze v jednom směru. Utahovací moment matice přímo určuje předpětí uložení a musí být nastaven tak aby bylo zamezeno axiálnímu posuvu ložiska při zachování jeho volného otáčení. Vzdálenost mezi ložisky v těle pedálu byla navržena, tak aby vznikla malá vůle vůči osazení na ose a vnitřním kroužkem kuličkového ložiska pro zajištění smontovatelnosti a kompenzaci tepelné roztažnosti.

5.3.1 Výpočet životnosti ložisek

Ložiska byla počítána pro stejné zatížení jako osa při únavovém zatěžování.[57] Podmínky výpočtu životnosti odpovídají zatížení osy silou $F = 392,4 \text{ N}$ při frekvenci otáčení $n = 100 \text{ min}^{-1}$. [57] Tato síla působí v radiálním směru. Při výpočtu životnosti ložisek nebyla uvažována axiální síla, jelikož jak bylo popsáno v kapitole 2-4 axiální složka při šlapání se zanedbává. Při sprintu jezdec kolo vyklání do stran a působením do pedálu jej zase rovná. Síla od nohy tedy pořád působí kolmo k pedálu.

Životnost kluzného pouzdra byla vypočítána za pomoci kalkulátoru výrobce. Výsledná hodnota životnosti byla stanovena na 926 hodin. Protokol o z kalkulátoru v Příloze 3.

Základní životnost kuličkového ložiska L_{10h} byla stanovena výpočtem z knihy Konstruování strojních součástí ze základní rovnice životnosti.[56] Základní dynamická únosnost ložiska $C = 1\,082 \text{ N}$ byla převzata z katalogu výrobce.[60] Exponenciální závislost trvanlivosti na zatížení a^l je pro kuličkové ložisko (s bodovým stykem) rovno 3.

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{F}\right)^{a^l} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{1082}{392,4}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 100} = 3494,17 \text{ h} \quad (21)$$

Obě ložiska dosahují vysokých hodnot životnosti pro dané zatížení, přičemž limitujícím prvkem je kluzné pouzdro. Jelikož se jedná o průmyslová ložiska standardních rozměrů, jsou běžně dostupná a jejich výměna při servisu pedálu je snadná.

5.4 Testování

Navržené pedály byly prakticky otestovány na terénní trati v lese o délce 10 km. Testování provedl jezdec o hmotnosti 50 kg na juniorském horském kole PELLIS. Pedály během testování nevykázaly žádné funkční závady. Zvolené piny M2 se ukázaly jako vhodná volba v podrážce obuvi nebyly citelné a noha na pedálu dobře držela. Pedál sice při protáčení vykazoval lehce vyšší odpor, ale po jízdě se tento odpor lehce snížil. Po testování nebyly zjištěny žádné zásadní nedostatky.



Obrázek 5-4 Fotka finálního pedálu na kole po testovací jízdě

5.5 Náklady

Přehled nákladů na výrobu jednoho páru pedálů je uveden v tabulce 5-2. Ceny jednotlivých komponent vychází z aktuální nabídky českých na trhu. Jelikož osa byla vyráběna ve škole v nákladech se neprojevila cena za výrobu. Osa tedy byla naceněna u poskytovatelů kusové výroby a průměrná cena za kus se pohyboval kolem 2 200 Kč. Pokud by se jednalo o sériovou výrobu cena by byla jistě nižší, většinu ceny tvoří poplatek za využití obráběcích strojů. Celková cena páru pedálů bez započtení externí kusové výroby činí 333,22 Kč. Nejedná se tedy o drahý pedál, co se týče materiálu.



Obrázek 5-5 Fotka finálního pedálu s odrazkami

Tabulka 5-2 Přehled nákladů na výrobu jednoho páru

Položka	Množství	Cena (Kč)
Filament Fillamentum ASA	128,9 g	114,36
Elektrická energie (tisk)	11 h 23 min	12,12
Kuličkové ložisko ZEN 686-2Z	2 ks	44,45
Kluzné pouzdro SKF PCMF 101209 E	2 ks	27,18
Šroub DIN 912 M2 × 8 (piny)	32ks	43,90
Matka DIN 934 M2	32	3,71
O-kroužek 14 × 1	2 ks	2
O-kroužek 18 × 1	2 ks	2
Matka M6	2 ks	1
Podložka M6	2 ks	2
Odrázky	4 ks	36
Polotovary osy AW7075-T6511 Ø25 × 105	2 ks	44,5
Celkem	–	333,22

6 DISKUZE

6.1 Zhodnocení výsledků ve vztahu k zadání a rozbor poznatků

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout platformový pedál pro dětské horské kolo (MTB), který svými rozměry optimálně reaguje na anatomická specifika dětského chodidla, a vyplnit tak mezeru na současném trhu. Průzkum trhu ukázal, že komerční nabídka je v dětském segmentu silně polarizovaná – levné produkty postrádají základní bezpečnostní a funkční prvky (jako jsou průmyslová ložiska nebo vyměnitelné piny), zatímco prémiové modely jsou pro rodinný rozpočet neekonomické vzhledem k rychlému růstu dětí.

Předložený konstrukční návrh plně naplňuje stanovené zadání. Spojením aditivní výroby (3D tisku) těla pedálu a vlastního vývoje ocelové osy se podařilo vytvořit cenově dostupnou, plně servisovatelnou a bezpečnou alternativu. Rozměry platformy (85×85) mm byly exaktně odvozeny z dat antropologického výzkumu pro zvolenou cílovou skupinu 5 až 11 let, čímž bylo eliminováno riziko používání předimenzovaných pedálů pro dospělé, které u dětí negativně ovlivňují biomechaniku šlapání a stabilitu v terénu.

6.2 Ověření počátečních hypotéz a číselné charakteristiky

Počáteční hypotéza předpokládala, že kombinace aditivně vyrobeného plastového těla a subtilní kovové osy dokáže odolat extrémnímu dynamickému zatížení typickému pro jízdu na horském kole (včetně skoků a pádů), aniž by došlo k destrukci či ohrožení mladého jezdce. Tato hypotéza byla matematicky a analyticky ověřena na základě číselných charakteristik:

- **Pevnost osy při dopadu:** Pro nejnepríznivější modelovou situaci (dopad ze skoku z výšky $h = 1,22$ m dle normy ASTM F2043-13 pro kategorii kol 4) byla uvažována hmotnost jezdce na hranici 97. percentilu pro daný věk (54 kg) spolu s hmotností kola (13 kg) a výbavy (3 kg). Výpočet kritického průřezu osy z materiálu EN AW-7075-T6511 prokázal maximální normálové napětí v ohybu $\sigma_{oB} = 246,33$ MPa. Vzhledem k smluvní mezi kluzu materiálu $R_{p0,2} = 503$ MPa činí vypočtená statická bezpečnost $k_b = 2,04$. Výsledná hodnota bezpečně překračuje strojírenský standard a potvrzuje integritu osy.

- **Životnost uložení:** Kombinace kuličkového ložiska a kluzného PTFE pouzdra prokázala optimální provozní vlastnosti. Životnost kluzného pouzdra byla na základě kalkulátoru výrobce stanovena na 926 hodin čistého provozu. Při průměrném ročním nájezdu dětského jezdce se jedná o životnost, která spolehlivě pokrývá celé období, než dítě z dané velikosti kola vyroste.

6.3 Upozornění na zjednodušení, vnesené chyby a nedostatky

Při analytických výpočtech a simulacích byla přijata některá zjednodušení, která mohou do reálného chování systému vnášet odchylky:

1. **Ideální přenos sil při dopadu:** Dynamický výpočet síly při dopadu uvažoval absolutně tuhé chování komponent a lineární tlumení pneumatik. V reálných podmínkách dochází k absorpci energie skrze flexi rámu, práci odpružené vidlice/tlumiče a pokrčení kolen samotného jezdce, což znamená, že reálné špičkové zatížení osy bude pravděpodobně nižší než vypočtené – výpočet tak zůstává na straně bezpečné nadrozměrnosti.
2. **Anizotropie 3D tisku:** Pevnostní rozboru těla pedálu uvažovaly materiál jako izotropní monolit. Technologie FDM (Fused Deposition Modeling) však z principu nanášení vrstev vykazuje anizotropní chování (nižší soudržnost mezi vrstvami v ose Z). Tento nedostatek byl kompenzován optimalizací tiskových parametrů (vhodná orientace modelu na tiskové podložce, zvýšená teplota tavení a hustota výplně), reálnou rázovou houževnatost plastového těla vůči nárazům na kameny by však bylo vhodné ověřit experimentálním destruktivním testováním na rázovém kladivu.
3. **Zjednodušený únavový cyklus:** Výpočet únavové životnosti osy podle normy ISO 4210-8 pracoval s konstantním míjivým zatížením simulujícím cyklické šlapání s konstantní silou. Skutečný provoz v terénu vykazuje náhodný charakter zatěžování (stochastický proces) s amplitudami vyvolanými nerovnostmi terénu, což klasický výpočet nedokáže plně podchytit.

6.4 Rozbor dalších funkcí designérského návrhu

Psychologická funkce konstrukčního návrhu silně apeluje na psychiku mladého jezdce a jeho vnímání vlastní bezpečnosti. Agresivnější, technický vzhled platformy s integrovanými piny evokuje design profesionálních dospělých pedálů ze segmentu enduro/downhill, což zvyšuje sebevědomí dítěte a jeho pocit sounáležitosti s cyklistickou komunitou. Klíčovým psychologickým faktorem je eliminace strachu ze sklouznutí nohy. Pocit stoprocentní adheze boty k pedálu dává jezdcovi jistotu v zatáčkách a technických pasážích, což odstraňuje mentální bloky a zrychluje proces učení pokročilých technik jízdy v terénu. Možnost volby barevného provedení těla pedálu (díky široké škále dostupných barev filamentů pro 3D tisk) navíc umožňuje personalizaci kola, což posiluje pozitivní citovou vazbu dítěte ke sportovní aktivitě.

Sociální a ekologická funkce Z pohledu společenských zájmů projekt podporuje zdravý životní styl, rozvoj motorických dovedností dětí a trávení volného času v přírodě tím, že odstraňuje finanční bariéru pro vstup do bezpečné horské cyklistiky. Z ekologického hlediska představuje návrh radikální odklon od konceptu "jednorázového spotřebního zboží". V případě mechanického opotřebení nebo destrukce plastového těla při nárazu na překážku není nutné vyhazovat celý produkt. Osa, ložiska, piny i odrazky jsou zachovány a znovu použity; lokálně se vytiskne pouze nové plastové tělo. Tím se minimalizuje množství vznikajícího odpadu (tzv. právo na opravu – Right to Repair). Navíc volba materiálů jako PETG nebo plně recyklovatelné formy ASA omezuje ekologickou stopu ve srovnání s energeticky náročným odléváním a frézováním hliníkových slitin.

Ekonomická funkce a marketingová analýza

- **Cenová kategorie a aproximativní cena:** Produkt spadá do střední cenové kategorie, která na trhu dosud chyběla. Zatímco nejlevnější nefunkční plasty stojí kolem 200 Kč a prémiové hliníkové pedály přesahují 2 000 Kč, výrobní náklady tohoto návrhu se pohybují v řádu stovek korun. Přibližná cena materiálu na tisk jednoho páru těl (materiál ASA/PETG) činí cca 80–120 Kč, cena kupovaných komponentů (ložiska, PTFE pouzdra, piny, odrazky, spojovací materiál) je zhruba 250 Kč. Vlastní výroba osy soustružením z polotovaru EN AW-7075-T6511 při hromadnějším odběru materiálu vychází na cca 150 Kč za pár. Celková materiálová cena za pár pedálů se pohybuje okolo 500 Kč, což představuje zlomkovou cenu oproti komerčním high-end modelům při zachování srovnatelných užitečných vlastností.

- **Studie trhu cílové skupiny:** Cílovou skupinou jsou rodiče dětí ve věku 5–11 let, které se aktivně věnují cyklistice, navštěvují bikeparky nebo jezdí v cyklistických oddílech. Tito rodiče si uvědomují důležitost bezpečnosti, ale zároveň zvažují ekonomickou efektivitu investic, jelikož komponenty mají kvůli růstu dítěte omezenou morální životnost na 2 až 3 sezóny.

7 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá komplexním vývojem a konstrukčním návrhem platformového pedálu pro dětská horská kola (MTB). Hlavním motivem bylo vytvořit produkt zohledňující anatomická specifika dětských jezdců ve věku 5 až 11 let, který zajistí vysokou úroveň bezpečnosti a zároveň nabídne finančně dostupnou a servisovatelnou alternativu k polarizovanému trhu.

Všechny cíle stanovené v zadání práce byly plně splněny:

- Na základě antropologických dat byly definovány optimální rozměry platformy (85×85 mm).
- Byl realizován konstrukční návrh kombinující aditivně vyrobené (3D tištěné) plastové tělo z materiálu ASA a osu z materiálu EN AW-7075-T6511 s kombinovaným uložením (kuličkové ložisko a kluzné PTFE pouzdro).
- Analytické pevnostní výpočty potvrdily vysokou mechanickou odolnost osy vůči statickému i dynamickému zatížení při kritickém dopadu ze skoku z výšky 1,22 m (statická bezpečnost $k_b = 2,04$). Výpočet uložení prokázal dostatečnou provozní životnost 926 hodin čistého provozu.
- Návrh integruje odrazové prvky a splňuje tak legislativní požadavky pro provoz na pozemních komunikacích.

Zobecněním výsledků práce je ověření koncepce, že technologii aditivní výroby FDM lze úspěšně aplikovat na finální produkci dynamicky namáhaných sportovních komponentů. Princip lokálně vyměnitelného těla při zachování kovového jádra (Right to Repair) představuje udržitelný a ekonomický směr vývoje. Výrobní cena jednoho páru pedálů (cca 500 Kč) prokazuje vysokou ekonomickou konkurenceschopnost návrhu.

Vzhledem k vneseným zjednodušením se v navazujícím studiu otevírají tyto oblasti pro další řešení:

1. **Experimentální verifikace:** Realizace fyzických zkoušek prototypu na rázovém kladivu a únavové zkušební stoličce pro ověření reálné soudržnosti vrstev 3D tisku a provedení statické zkoušky ohybem k ověření pevnostních charakteristik osy.
2. **Topologická optimalizace:** Využití pokročilých kompozitních filamentů (např. PACF s uhlíkovými vlákny) a optimalizace tvaru těla pro další snížení hmotnosti.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SCHINDLER SPOL. S R.O. Jakou zvolit velikost dětského kola? *Mojekolo.cz* [online]. 2025 [cit. 2026-04-10]. Dostupné z: https://www.mojekolo.cz/jakou-zvolit-velikost-detskeho-kola/#:~:text=Table_title=%20Tabulka%20velikost%C3%AD%20d%C4%9Btsk%C3%BDch%20kol%20Table_content:%20header:,%20%7C%20V%C3%BD%C5%A1ka%20postavy:%20125%2D140%20cm%20%7C
- [2] Průvodce velikostmi kol Canyon. *Canyon.com* [online]. 2026, 26.02.2026 [cit. 2026-04-12]. Dostupné z: <https://www.canyon.com/cs-cz/blog-content/rada/system-velikosti-kol-canyon/b29092022.html>
- [3] Dětská odrážedla. *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-12]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/jizdni-kola/detska-kola-a-odrazedla/detska-odrazedla/>
- [4] GHOST Powerkiddy 12. In: *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-12]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/ghost-powerkiddy-12-dirty-blue-metallic-lime/>
- [5] Dětská kola 16." *Mojekolo.cz* [online]. 2026 [cit. 2026-04-12]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/jizdni-kola/detska-kola-a-odrazedla/detska-kola-16/?page=2>
- [6] CTM TOMMY. *Ctm.sk* [online]. [cit. 2026-04-12]. Dostupné z: <https://www.ctm.sk/cz/p/tommy-16-2026>
- [7] Jak vybrat dětské kolo. *Kola-radotin.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-24]. Dostupné z: <https://www.kola-radotin.cz/nakupni-radce/jak-vybrat-detske-kolo>
- [8] Dětská kola 20." *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-24]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/jizdni-kola/detska-kola-a-odrazedla/detska-kola-20/>
- [9] Dětská kola 24." *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-24]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/jizdni-kola/detska-kola-a-odrazedla/detska-kola-24/>
- [10] Hellion X20. In: *Earlyrider.com* [online]. c2026 [cit. 2026-04-24]. Dostupné z: <https://eu.earlyrider.com/en-cz/products/hellion-x20-kids-mountainbike>
- [11] Dětská kola a odrážedla. *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/jizdni-kola/detska-kola-a-odrazedla/>
- [12] Dětská kola 26." *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/jizdni-kola/detska-kola-a-odrazedla/detska-kola-26/>

- [13] MORÁVEK, Zdeněk. *Horská kola, hlavní disciplíny a vývoj horského kola* [online]. Liberec, 2019 [cit. 2026-03-28]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/1b3f09c3-fda7-4725-8767-a8dda4bafcac/content>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta přírodovědně humanitní a pedagogická. Vedoucí práce Mgr. Radim Antoš.
- [14] HADLAND, Tony a Hans-Erhard LESSING. *Bicycle design an illustrated history* [online]. Cambridge: The MIT Press, 2014. ISBN ISBN 978-0-262-02675-8.
- [15] Replica of pedals for a Michaux velocipede. In: *Sterba-bike.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://www.sterba-bike.cz/produkt/replika-pedalu-pro-velociped-michaux?lang=EN>
- [16] Penny Farthing Bicycle. *Sciencemuseumgroup.org.uk* [online]. 2025 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8421051/penny-farthing-bicycle>
- [17] Rattrap pedal. *Merriam-Webster* [online]. c2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/rattrap%20pedal>
- [18] *In The Beginning* [online]. 2024 [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: <https://www.roveramerica.com/in-the-beginning>
- [19] Icons of cycling: Look's revolutionary clipless pedals. *Cycling Weekly* [online]. 7 April 2015 [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: <https://www.cyclingweekly.com/news/product-news/look-clipless-pedals-165379>
- [20] SHIMANO PEDALING DYNAMICS. *Bike.shimano* [online]. [cit. 2026-05-03]. Dostupné z: <https://bike.shimano.com/en-UK/stories/article/spd.html>
- [21] Pedal Progression – the story of DMR. *Factory Jackson* [online]. April 9th, 2015 [cit. 2026-05-04]. Dostupné z: <https://factoryjackson.com/2015/04/09/pedal-progression-the-story-of-dmr/>
- [22] DMR Bikes Bicycles & Dirt Since 1995. *DMR bikes* [online]. c2026 [cit. 2026-05-04]. Dostupné z: <https://dmrbikes.com/pages/dmr-bikes-timeline-and-history>
- [23] CONROY, Katelyn Elisabeth. *Physiological and Mechanical Comparisons between Clipless and Flat Pedals* [online]. Las Vegas, 2021 [cit. 2026-05-25]. Dostupné z: <https://oasis.library.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5286&context=thesesdissertations>. Diplomová práce. University of Nevada.
- [24] Jak vybrat pedaly na kolo. *Bike-shop* [online]. c2026 [cit. 2026-05-10]. Dostupné z: <https://www.bike-eshop.cz/jak-vybrat-pedaly-na-kolo>
- [25] Jak vybrat pedály. *Ski a bike centrum radotín* [online]. c2026 [cit. 2026-05-10]. Dostupné z: <https://www.kola-radotin.cz/nakupni-radce/jak-vybrat-pedaly>

- [26] Jak si vybrat pedály na kolo. *Axit.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-10]. Dostupné z: <https://www.axit.cz/clanky/jak-si-vybrat-pedaly-na-kolo/>
- [27] Flat or clipless pedals: which are right for you? *Bike radar* [online]. c2026 [cit. 2026-05-10]. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/flat-or-clipless-pedals-which-is-right-for-you>
- [28] *F22 Pedals* [online]. In: . c2026 [cit. 2026-05-20]. Dostupné z: <https://20twentystore.com/products/hope-tech-f22-pedals?variant=55826193383808>
- [29] Pedály cyklistické s klipsnou. In: *Fitsport.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-04-20]. Dostupné z: <https://www.fitsport.cz/pedaly-cyklisticke-s-klipsnou>
- [30] WILSON, David Gordon a Theodor SCHMIDT. *Bicycling science* [online]. Fourth edition. The MIT Press, 2020 [cit. 2026-05-16]. ISBN ISBN 978-0-262-53840-4. Dostupné z: <https://dokumen.pub/bicycling-science-4th-edition-0262538407-9780262538404-0262357534-9780262357531.html>
- [31] BINI, Rodrigo R. *Pedal force effectiveness in Cycling: a review of constraints and training effects* [online]. Murcia: urnal of Science and Cycling, 2013 [cit. 2026-05-16]. ISSN 2245-8051. Dostupné z: <https://www.jsc-journal.com/index.php/JSC/article/view/32/73>
- [32] *Biomechanics of Cycling* [online]. Bukurešť: Sciendo, 2010 [cit. 2026-05-16]. Dostupné z: <http://archive.sciendo.com/SSR/ssr.2010.xix.issue-1-2/v10237-011-0012-0/v10237-011-0012-0.pdf>
- [33] *Effect of Power Output and Pedaling Cadence on Plantar Pressures in Professional Cyclists with Overuse Injuries* [online]. MDPI, 2026 [cit. 2026-05-08]. ISSN 2075-4663. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/sports14050184>
- [34] *In-Shoe Pressure Distributions for Cycling With Two Types of Footwear at Different Mechanical Loads* [online]. Human Kinetics, 1995 [cit. 2026-05-17]. ISSN 1065-8483. Dostupné z: <https://journals.humankinetics.com/view/journals/jab/11/1/article-p68.xml>
- [35] Pedály. *Decathlon* [online]. 2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.decathlon.cz/vsechny-sporty/sluzby/pedaly>
- [36] Pedály. *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/cyklistika/komponenty/pedaly/>
- [37] Pedály dětské. *Pepebike* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.pepebike.cz/pedaly-detske/>
- [38] Pedály. *Kupkolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: https://www.kupkolo.cz/komponenty-na-kolo_k982/pedaly_k105/

- [39] Vyhláška č. 153/2023 Sb., o schvalování technické způsobilosti vozidel a technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. In: *Sbírka zákonů*. 2023, částka 72, číslo 153.
- [40] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* [online]. Second edition. New York: Springer, [2015] [cit. 2026-03-28]. ISBN 978-1-4939-2112-6. Dostupné z: https://repo.darmajaya.ac.id/3831/1/Additive%20Manufacturing%20Technologies_%203D%20Printing%2C%20Rapid%20Prototyping%2C%20and%20Direct%20Digital%20Manufacturing%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf
- [41] *Determination of Mechanical Properties of Materials Used for 3D Printing* [online]. 2020 [cit. 2026-05-18]. ISSN 1213–2489. Dostupné z: https://journalmt.com/artkey/mft-202002-0008_determination-of-mechanical-properties-of-materials-used-for-3d-printing.php
- [42] Filament Material Guide. *Prusa3d.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/filament-material-guide>
- [43] PETG. *Prusa3d.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [44] PETG vs. ABS vs. ASA: Který materiál je nejlepší pro mechanické díly? *3dfil.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: <https://www.3dfil.cz/materialy-3dtisk/petg-abs-asa-ktery-material-je-nejlepsi/>
- [45] ASA. *Prusa3d.com* [online]. c2026 [cit. 2026-05-18]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809
- [46] *Standard growth of the foot arch in childhood and adolescence—Derived from the measurement results of 10,155 children* [online]. 2014 [cit. 2026-05-18]. ISSN 1268-7731. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1268773114000642?via%3Dihub>
- [47] Tělesné rozměry – tabulky. *Szu.gov.cz* [online]. [cit. 2026-05-19]. Dostupné z: https://szu.gov.cz/wp-content/uploads/2024/05/6.CAV_4_Telesne_rozmary-tabulky.pdf
- [48] *Flat Pedal Limited Edition HAXN HOITA* [online]. c2026 [cit. 2026-05-19]. Dostupné z: <https://ambit-components.com/en/components/pedals/flat-pedal-limited-edition-haxn-hoita>
- [49] WONG, Peter. Aluminum 7075 vs Steel & 6061: Strength, Uses & More. *PTSMAKE.com* [online]. 2025, 11.4.2025 [cit. 2026-05-22]. Dostupné z: <https://www.ptsmake.com/aluminum-7075-vs-steel-6061-strength-uses-more/>
- [50] Přehled vlastností oceli 42CrMo4 (42CrMoS4). *Dspace.cvut.cz* [online]. [cit. 2026-05-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/server/api/core/bitstreams/188e6001-ee67-4e57-9126-9a2210a8ab5a/content>

- [51] Pedály Crankbrothers Stamp 1 Small, Gen 2. *Kupkolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: https://www.kupkolo.cz/pedaly-crankbrothers-stamp-1-small-gen-2_z137546/
- [52] ASTM INTERNATIONAL. *Standard Classification for Bicycle Usage*. 2018.
- [53] RŮSTOVÉ GRAFY [online]. 2001 [cit. 2026-05-19]. Dostupné z: https://szu.gov.cz/wp-content/uploads/2022/12/6.CAV_5_Rustove-grafy.pdf
- [54] Modelová situace dopadu z 1,22m. In: GOOGLE. *GEMINI* [online]. 2026 [cit. 2026-05-21]. Dostupné z: <https://gemini.google.com>
- [55] Kinematic Analyses of Parkour Landings from as High as 2.7 Meters. *Journal of Human Kinetics* [online]. 2020, 72(72), 15-18 [cit. 2026-05-21]. Dostupné z: doi:10.2478/hukin-2019-0123
- [56] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, HARTL, Martin a Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: Vutium, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [57] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 8: Pedal and crank test methods*. Second edition. Geneva: ISO, 2023.
- [58] NORTON, Robert L. *MACHINE DESIGN An Integrated Approach* [online]. Sixth Edition. Worcester, Massachusetts: Pearson Education, 2020 [cit. 2026-05-22]. ISBN 0-13-518423-1. Dostupné z: <https://studylib.net/doc/27836599/machine-design-an-integrated-approach--robert-norton---z-...>
- [59] PCMF 101209 E. *Skf.com* [online]. [cit. 2026-05-22]. Dostupné z: <https://www.skf.com/sg/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCMF%20101209%20E>
- [60] 686-2Z. *Zen.biz* [online]. [cit. 2026-05-22]. Dostupné z: https://www.zen.biz/tech_drawing?tabname=Miniature%20Metric%20Series&tab=miniature_metric_series&ref=686-2Z&i=8
- [61] BTWIN Pedály 20"/24." *Decathlon* [online]. 2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: https://www.decathlon.cz/p/pedaly-20-24-cerne/_/R-p-197493?mc=8480266&c=%C4%8CERN%C3%81
- [62] BTWIN Pedály na 24, 26 a 28 palcová kola. *Decathlon* [online]. 2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: https://www.decathlon.cz/p/pedaly-na-24-26-a-28-palcova-kola-cerne/_/R-p-201396?mc=8537949&c=%C4%8CERN%C3%81
- [63] Pedál PRO-T 630 plast kuličkový protiskluzový dětský. *Pepebike* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.pepebike.cz/pedal-pro-t-630-plast-kulickovy-protiskluzovy-detsky/>

- [64] Pedály EARLY RIDER Resin Platform. *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/pedaly-early-rider-resin-platform/>
- [65] Pedály EARLY RIDER Works Comp. *Mojekolo.cz* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.mojekolo.cz/pedaly-early-rider-works-comp/>
- [66] Pedály OneUp Small Composite. *Pepebike* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.pepebike.cz/pedaly-oneup-small-composite/>
- [67] Dětské pedály Chromag Radar. *Pepebike* [online]. c2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: <https://www.pepebike.cz/pedaly-detske-chromag-radar/?variantId=223072&hgtid=749f0444-a1be-4f02-9c84-826a016d23a0>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratk

MTB	Mountain biking
FDM	Fused Deposition Modeling
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
PTFE	polytetrafluorethylen
XC	Cross-Country
DH	Downhill
SPD	Shimano Pedaling Dynamics
BMX	Bicycle Motocross
PETG	Polyethylentereftalát s příměsí glykolu
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate
UV	Ultrafialové záření
TPI	Threads Per Inch

9.2 Seznam symbolů a veličin

h	Výška
m	Celková hmotnost
g	Tíhové zrychlení
E_{p1}, E_{p2}	Potenciální energie
E_{k1}, E_{k2}	Kinetická energie
v	Rychlost

a	Zrychlení
t	Čas
F_{dopadu}	Síla při dopadu
$F_{pedál}$	Síla působící na pedál
$F_{ložiska}$	Síla působící na ložisko
M_{oB}	Ohybový moment v bodě B
σ_{oB}	Normálové napětí v bodě B
W_{oB}	Kvadratický modulu v ohybu pro bod B
d_B	Průměr průřez v bodě B
k_b	Bezpečnost v bodě B
$R_{p0,2}$	Smluvní mez v kluzu
R_m	Mez pevnosti
F	Síla působící na ložisko při únavovém zatěžování
$\sigma_{max}^{B_unav}$	Maximální normálové napětí v místě B pro únavové namáhání
β	Součinitel vrubu
σ_C	Mez únavy pro 5×10^8 cyklů
σ'_{Co}	Korigovaná mez únavy
k_a	Součinitel jakosti povrchu
k_b	Součinitel velikosti
k_c	Součinitel zatěžování
k_d	Součinitel teploty
k_e	Součinitel spolehlivosti
k_f	Součinitel dalších vlivů
σ_{ar}	Ekvivalentní napětí
σ_a	Amplituda normálového napětí
σ_m	Střední normálové napětí
N	Počet cyklů

a, b	Koeficienty pro stanovení počtu cyklů
M	Utahovací moment
K	Součinitel pro výpočet utahovacího momentu
F_i	Síla předpětí
d	Střední průměr závitu
n	Počet otáček
C	Základní dynamická únosnost
a^l	Exponenciální závislost trvanlivosti na zatížení
L_{10h}	Základní životnost ložiska v hodinách

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 2-1 Odrážedlo GHOST Powerkiddy 12 [4]	14
Obrázek 2-2 Dětské kolo 16" CTM TOMMY [6]	15
Obrázek 2-3 Dětské kolo 20" Hellion X20 [10]	15
Obrázek 2-4 Replika pedálů z roku 1870 [15]	17
Obrázek 2-5 Ranný rat-trap pedál s kuličkovými ložisky pole Bowna [14]	18
Obrázek 2-6 Patent Williama Rankina z roku 1890[14]	19
Obrázek 2-7 DMR V12 z roku 1995 [21], upraveno	21
Obrázek 2-8 Horský nášlapný pedál Shimano XTR [20].....	23
Obrázek 2-9 Popis platformového pedálu; 1) Osa pedálu; 2) Tělo pedálu; 3) Piny; upraveno z [28]	24
Obrázek 2-10 Pedály s klipsnami [29]	25
Obrázek 2-11 Síly působící na pedál, upraveno z [31]	26
Obrázek 2-12 Pedálový cyklus rozdělený do 4 kvadrantů, upraveno z [31]	27
Obrázek 2-13 Rozložení tlaku od chodidla při úhlu kliky 90° při různých výkonech, upraveno z [34]	29
Obrázek 4-1 Fotka navrhnuté osy.....	38
Obrázek 5-1 Porovnání verzí těla pedálu; vlevo verze 1b, vpravo finální verze	42
Obrázek 5-2 Modelová situace dopadu [54]	44
Obrázek 5-3 Fotka výroby osy na soustruhu.....	48
Obrázek 5-4 Fotka finálního pedálu na kole po testovací jízdě	50
Obrázek 5-5 Fotka finálního pedálu s odrazkami	51

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1 Přehled dostupných modelů včetně vybraných parametrů	31
Tabulka 4-1 Základní porovnání materiálů AW7075-T6511, 42CrMo4 [49; 50]	39
Tabulka 4-2 Shrnutí koncepce	40
Tabulka 5-1 Přehled parametrů tisku	43
Tabulka 5-2 Přehled nákladů na výrobu jednoho páru	52

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výpočty
Příloha 2	Výkresy, 3D modely
Příloha 3	Výpočtový protokol z kalkulátoru SKF pro ložisko