

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270017 Konstruování strojů
a technických zařízení
Studijní zaměření: Konstruování výrobních strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přípravek přesného stříhu

Autor: **Bc. Rudolf ŠPITÁLNÍK**
Vedoucí práce: doc. Ing. Václav KUBEC, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Rudolf ŠPITÁLNÍK**
Osobní číslo: **S20N0032K**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace: **Konstruování výrobních strojů a zařízení**
Téma práce: **Přípravek přesného stříhu**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Cílem práce je navrhnout speciální přípravek pro přesný stříh. Parametry přípravku budou vycházet ze specifikace zkušebních zařízení, která provozuje firma COMTES FHT a.s. Konstrukční návrh přípravku bude zahrnovat řešení systému výměny střížných nástrojů. Přípravek bude pevnostně zkontrolován pomocí numerických simulací pro maximální zatížení.

Základní technické údaje:

Tecnické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova práce:

1. Analýza zadání, rešerše
2. Specifikace požadavků
3. Návrh variant řešení
4. Konstrukční návrh vybrané varianty
5. Zpracování výkresové dokumentace

Konzultant: Ing. Danuše Jánská, COMTES FHT a.s.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní části*. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3

[2] RUDOLF, B. *Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce : vysokoškolská učebnice*. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.

Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Václav Kubec, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Václavu Kubcovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Špitálník	Jméno Rudolf	
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270017 „Konstruování strojů a technických zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení doc. Ing. Kubec, Ph.D.	Jméno Václav	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	
NÁZEV PRÁCE	Přípravek přesného stříhu		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	63	TEXTOVÁ ČÁST	49	GRAFICKÁ ČÁST	14
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

ANOTACE	Diplomová práce obsahuje návrh přípravku přesného stříhu pro stíhání a prostřihování plechových polotovarů, tj. výrobu celkem šesti typů plechových vzorků pro mechanické zkoušky. Součástí práce je optimalizace jednotlivých konstrukčních uzlů a MKP pevnostní analýza. K práci je přiložen výkres sestavy stroje a výrobní výkresy vzorků.
KLÍČOVÁ SLOVA	Stříh, prostřih, přípravek, nástroj, mechanické zkoušky

ANOTATION SHEET OF THE DIPLOMA THESIS

AUTOR	Surname Bc. Špitálník	First name Rudolf	
FIELD OF STUDY	N0715A270017 „Design engineering of machines and technical devices “		
SUPERVISOR	Surname doc. Ing. Kubec, Ph.D.	First name Václav	
WORKPLACE	ZČU – FST – KKS		
TYPE OF THESIS	DIPLOMA	BACHELOR	
NAME OF THESIS	Fineblanking tool		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	YEAR OF SUBMISSION	2022
----------------	---------------------------	-------------------	-----	-------------------------------	------

POČET STRAN

TOTAL	63	TEXT PART	49	GRAPHIC PART	14
--------------	----	------------------	----	---------------------	----

ABSTRACT	The diploma thesis contains a design of a fineblanking tool for shear cutting the sheet metal components, i.e. the production of a total of six types of sheet metal samples for mechanical tests. Part of the thesis is the optimization of individual construction nodes and FEM strength analysis. Drawings of the machine assembly and drawings of samples are attached to this thesis.
KEY WORDS	Fineblanking tool, shear cutting, mechanical tests

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod.....	10
2 Teoretická část	11
2.1 Technologie plošného stříhání	11
2.1.1 Působení sil pro rovnoběžné nože.....	12
2.1.2 Působení sil pro šikmé nože.....	12
2.1.3 Přesné stříhání	13
2.2 Mechanické zkoušky	14
2.2.1 Tahová zkouška	15
2.2.2 Nakajima test	16
2.2.3 Hole expansion test	17
2.2.4 Diabolo test	18
3 Praktická část	20
3.1 Shrnutí požadavků.....	20
3.2 Polotovary a materiál	20
3.3 Návrhový výpočet	23
3.3.1 Výpočet střížné síly.....	23
3.4 Návrh konstrukce	23
3.4.1 Konstrukce uchycení střížných nástrojů	24
3.4.2 Konstrukce přidržovačů	25
3.4.3 Konstrukce rámu	27
3.5 Návrh optimalizace jednotlivých konstrukčních uzlů.....	28
3.6 Výsledné konstrukční řešení	33
3.7 Seznam součástí	35
3.8 MKP Analýza.....	36
3.8.1 Simulace přípravku s nástroji pro prostřih.....	38
3.8.2 Simulace přípravku s nástroji pro stříh	40
3.8.3 Shrnutí analýzy	42
4 Závěr	43
5 Použitá literatura	44
6 Seznam obrázků a tabulek	47
7 Seznam příloh	49

Seznam použitých zkratk a symbolů

CNS	National Standards of the Republic of China (Čínská národní norma)
ČSN	Česká technická norma
DIC	Digital Image Correlation (digitální obrazová korelace)
DP steel	Dual Phase (dvoufázová ocel)
EN	Evropská norma
HMH	Huber, von Mises, Hencky hypotéza
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
MKP	metoda konečných prvků
λ [1]	součinitel roztažnosti otvoru
τ [MPa]	mez pevnosti ve smyku
σ_{pt} [MPa]	mez pevnosti v tahu
F [N]	síla
L_0 [mm]	počáteční délka
o [mm]	obvod
S_0 [mm ²]	počáteční průřez
t [mm]	tloušťka

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je vypracování konstrukčního návrhu přípravku pro přesné stříhání plechů, včetně jeho rámu, numerických výpočtů, pevnostní analýzy a následného vyhodnocení. Práce byla vytvořena ve spolupráci se společností COMTES FHT a.s. Vytvoření tohoto stoje má vést k ověření vlivu kvality střížné hrany na mechanické vlastnosti materiálu při jednotlivých experimentech a následně v praxi.

Společnost COMTES FHT a.s. se zabývá vývojem nových technologií, zejména v oblasti tváření, měření a zkoušení součástí, poradenstvím a školením, a v neposlední řadě materiálovým výzkumem. Všechny tyto kategorie jsou vzájemně propojeny a jsou doprovázeny mnoha konstrukčními projekty, výpočtovými aplikacemi a rozsáhlou škálou testování. Z tohoto důvodu vznikla tato práce, která popisuje návrh přípravku pro stříhání plechových vzorků do požadovaného tvaru.

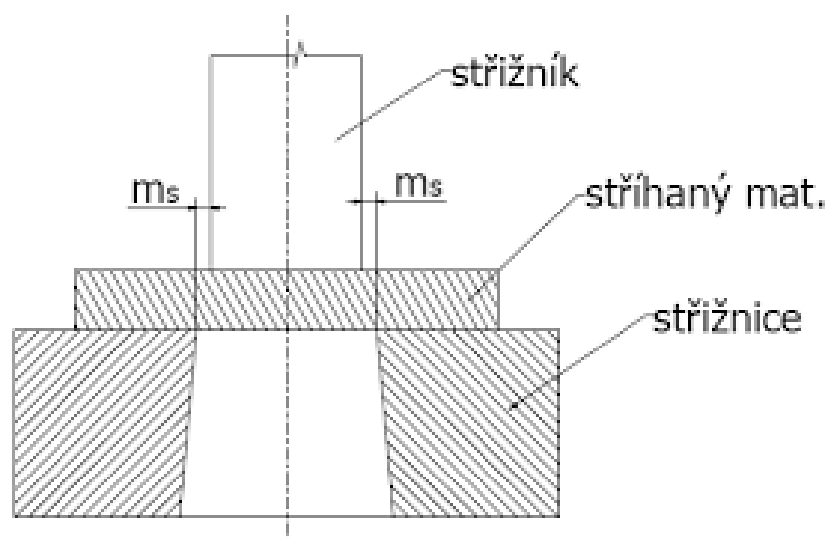
Hlavním požadavkem zadavatele je vytvoření stroje s univerzálním použitím pro šest typů vzorků pro čtyři typy mechanických zkoušek. Konkrétně se jedná o mechanické zkoušky materiálu a zkoušení porušení v oblasti vrubů – Nakajima test, Diabolo test, Hole expansion test a zkouška tahem. Pro každý typ zkoušky se připravuje vzorek plechového výstřižku s charakteristickým tvarem. Tyto vzorky jsou částečně obráběny a částečně stříhány, přičemž se se zkoumá kvalita stříhaných hran. Stříhaný plech je buď hliníkový nebo z vysokopevnostní oceli DP 1200 (mez pevnosti v tahu až 1200 MPa). Z hliníkového plechu se vystřihují vzorky do maximální tloušťky 2,5 mm, zatímco z ocelového plechu se stříhají vzorky o maximální tloušťce 1 mm.

2 Teoretická část

2.1 Technologie plošného stříhání

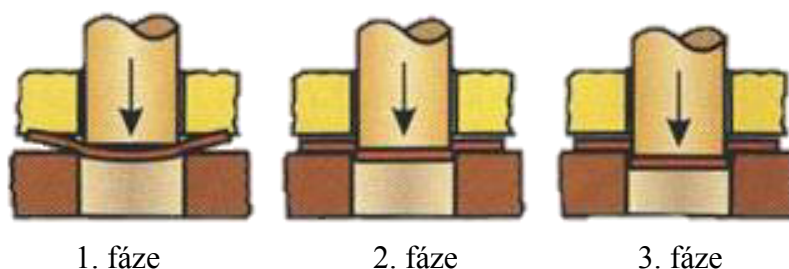
Tuto technologii lze obecně zařadit do technologické skupiny tváření materiálu. Konkrétně lze hovořit o postupném oddělování částí materiálu, a tím k jeho částečnému porušení, nebo úplnému dělení materiálu. Samotný proces stříhání je realizován pomocí střížných nástrojů, zvaných střížník a střížnice. Tyto nástroje tvoří dohromady skupinu, s jejíž pomocí lze materiál stříhat. Technologii lze rozdělit na přesné stříhání, nastříhování, děrování, přistříhování, vystříhování, ostříhování a prostříhování [1, 2].

Střížný proces je založen na vyvození tlaku na střížník, který z jedné strany dosedá na stříhaný materiál. Z druhé strany je tento materiál přitlačen na střížnici, která se nachází v ose stříhaného materiálu, zpravidla pod střížníkem. Tyto nástroje tvoří negativ a pozitiv stříhaného tvaru a jsou vůči sobě odsazeny o střížnou vůli (viz Obrázek 1) [1, 2, 3].



Obrázek 1 – Schématické znázornění technologie stříhání [4]

Principem technologie stříhání je působení protilehlých střížných hran, které vytváří v materiálu smykové napětí. Střížný proces se dělí na 3 základní fáze (viz Obrázek 2). V 1. fázi napětí v materiálu nepřesahuje mez pružnosti, pohybujeme se tak v oblasti pružné (elastické) deformace. Ve 2. fázi již napětí v materiálu překračuje mez kluzu, tím vznikají trvalé plastické deformace. Ve 3. fázi je v materiálu překročeno napětí meze pevnosti ve stříhu a v tom okamžiku začínají ve stříhané oblasti v materiálu vznikat trhliny, které se zvětšují až do jeho oddělení [1, 2, 3, 5].



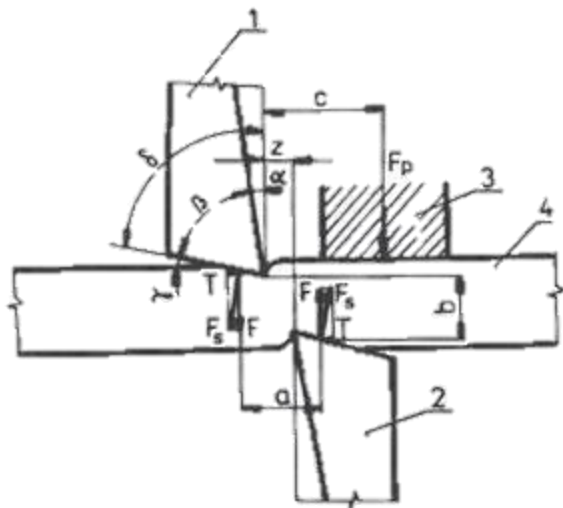
Obrázek 2 – Fáze stříhání [2]

Vlivem tvárnosti a pružné deformace stříhaného materiálu, není tlak od střížníku rovnoměrně rozdělen na stříhanou plochu, a výstřížek tedy není oddělen po celém obvodu ve stejném okamžiku. Právě proto mají stříhané plochy a hrany horší vlastnosti, např. rovinnost ploch a drsnost povrchu. Z toho důvodu je nutné zjistit jaký vliv bude mít kvalita stříhané hrany na výsledné mechanické vlastnosti [1, 2, 3].

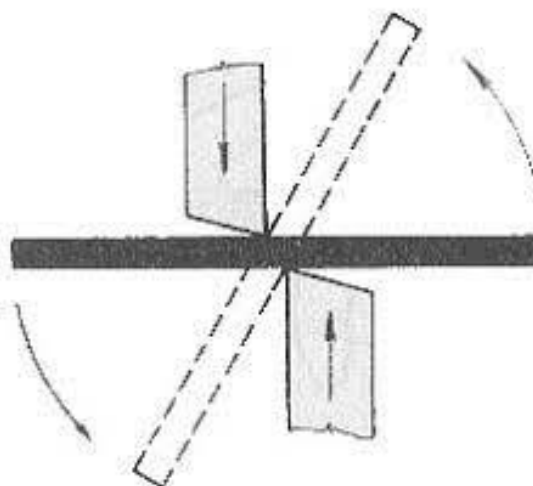
2.1.1 Působení sil pro rovnoběžné nože

Při procesu stříhání je mezi střížníkem a střížnicí mezera. Kvůli této mezeře se střížná síla rozkládá na třecí složku a normálovou složku, díky čemuž vzniká ve stříhaném materiálu ohybový moment, který způsobuje nežádoucí deformaci hran (viz Obrázek 3) [1, 2, 3].

Pro stříhání rovnoběžnými noži je střížný nástroj složen z kolmého střížníku, střížnice a eventuálně z přidržovače. Při této technice je mezi střížníkem a střížnicí nutná střížná mezera, což je polovina střížné vůle. Tato vůle je nutná z důvodu případné kolize nástrojů [1, 2, 3].



Obrázek 3 – Stříhání rovnoběžnými noži; 1 – střížník, 2 – střížnice, 3 – přidržovač, 4 – stříhaný materiál [2]

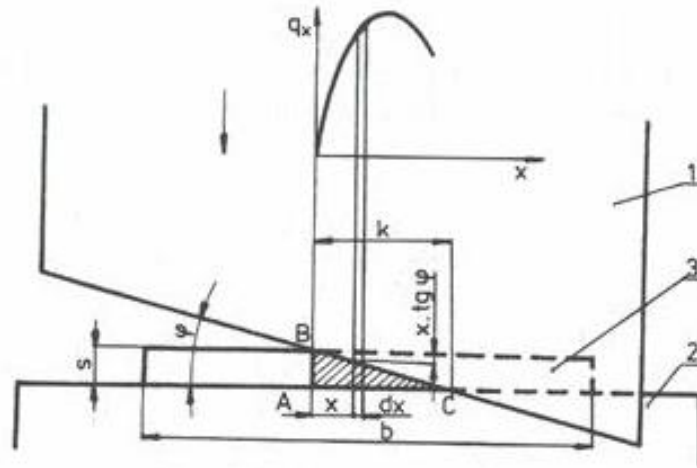


Obrázek 4 – Příklad překlápění stříhaného materiálu bez použití přidržovače [6]

Vlivem střížné mezery vzniká v materiálu moment, který by materiál otáčel ve směru působení střížné síly (viz Obrázek 4). Z toho důvodu je v některých případech nutné použít přidržovač materiálu [1, 3].

2.1.2 Působení sil pro šikmé nože

Při stříhání šikmými noži, se do záběru dostávají jednotlivé hrany střížníku postupně a ne najednou (viz Obrázek 5). Je tedy patrné, že střížná síla i střížná práce budou v případě stříhání šikmými noži mnohem menší než v případě rovnoběžných nožů. Zmenšení střížné síly má za následek snížení napětí v rámu stroje a snížení dynamických rázů [2, 3].



Obrázek 5 – Stříhání šikmým nožem
1 – střížník, 2 – střížnice, 3 – stříhaný materiál [2]

V případě stříhání se šikmými noži může být taktéž použit přidržovač. Rapidně se snižuje potřebná střížná síla, ale střížná práce se nemění. Zešikmení nožů se používá, je-li potřeba snížit střížnou sílu, která by jinak byla větší než síla lisu. Naopak, není vhodné je užívat ke stříhání složitých tvarů. Pro děrování se používá oboustranně zešikmený střížník, jednostranně zešikmený střížník se používá pouze pro nastříhovávání [1, 2, 3].

2.1.3 Přesné stříhání

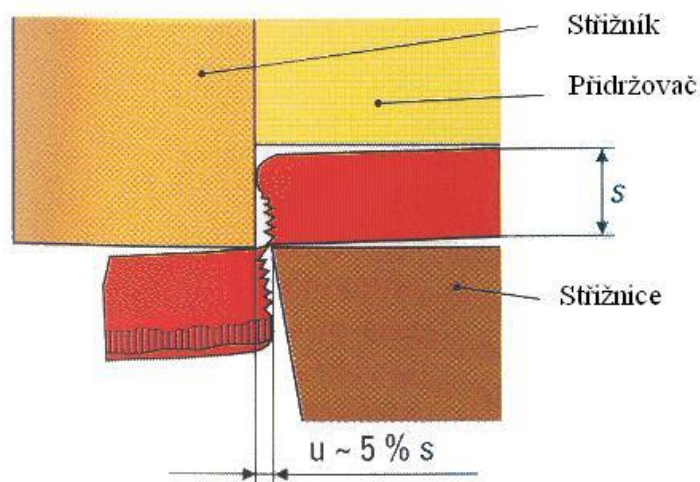
Při stříhání různými technologiemi dosahují výrobky různých hodnot jednotlivých parametrů, jako jsou drsnost povrchu, rovinnost atd. Různých parametrů dosahujeme i při stříhání s rovnoběžnými noži nebo se šikmými noži. Aby se výrobky nemusely dále upravovat například obráběním, je snaha zmenšit střížnou mezeru, resp. střížnou vůli tak, aby se co nejvíce eliminovaly normálové složky napětí, tzn. aby se výsledná napjatost blížila napjatosti při čistému smyku [1, 2, 3].

Při klasickém stříhání s rovnoběžnými noži se střížná mezera pohybuje v rozsahu od 3 % do 10 % tloušťky stříhaného plechu. U přesného stříhání se tato mezera z velké části eliminuje, například až k hodnotě 0,5 % tloušťky plechu. Pro přesné stříhání existuje několik metod [1, 3].

- Stříhání bez vůle
- Stříhání s přidržovačem
- Stříhání s nátláčnou hranou
- Stříhání s nátláčnou hranou a protitlakem
- Stříhání se zápornou vůlí
- Reversní stříhání

Pro stříhání bez vůle se zaoblují hrany střížníku, nebo střížnice. To znamená že se stříhá tzv. bez břitu [2, 3].

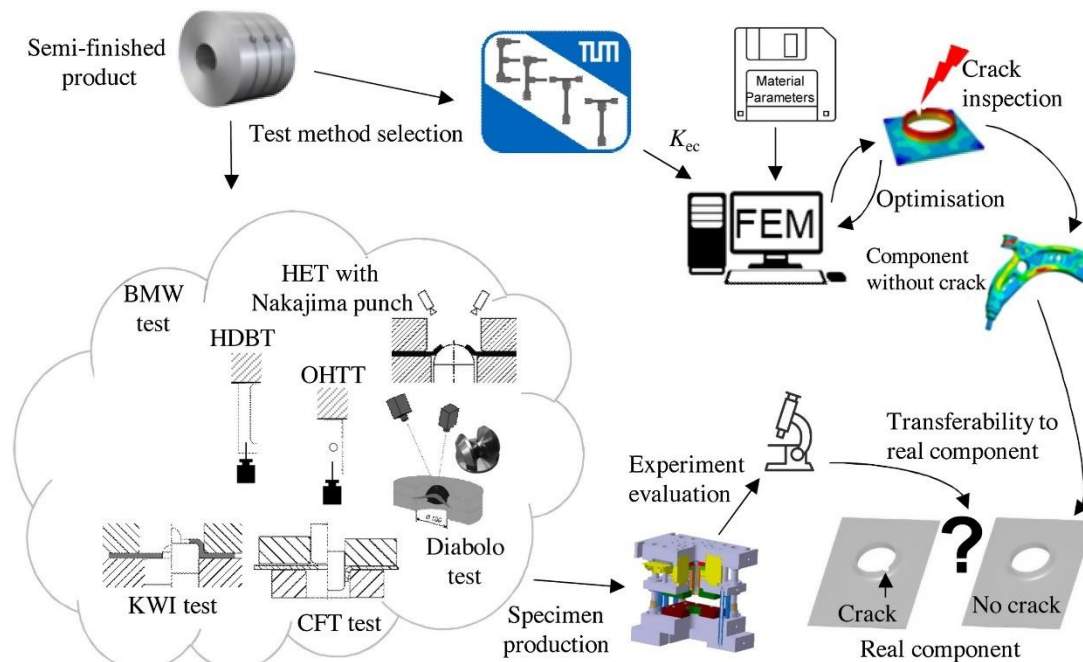
Přidržovač se používá k zamezení ohýbání okrajů stříhaného materiálu a tím ke zlepšení povrchu stříhané plochy (viz Obrázek 6). Vlivem přidržovače vzniká v materiálu tlaková, i tahová složka napjatosti, což mění celkové namáhání v místě stříhu [1, 2, 3].



Obrázek 6 – Stříhání s přidržovačem [2]

2.2 Mechanické zkoušky

Pomocí mechanických zkoušek jsme schopni určovat mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů. Tyto zkoušky se provádí na nejrůznějších typech materiálů a lze u nich sledovat mnoho různých parametrů, ze kterých lze vycházet pro posouzení jejich vlastností. Podle mechanických vlastností materiálu lze následně vhodně vybrat materiál pro konstrukci požadované součásti, nebo lze podle těchto vlastností optimalizovat geometrii a tvar výsledné součásti (viz Obrázek 7).



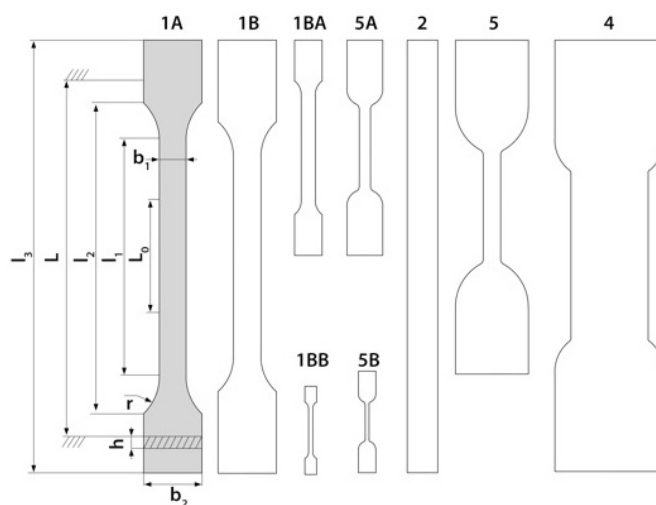
Obrázek 7 – Schéma navrhování součásti podle materiálových zkoušek [7]

Všechny stříhané vzorky jsou z plechového polotovaru. Mechanické zkoušky plechu lze dělit na statické, dynamické a speciální. Níže popsaná kapitola se týká mechanických zkoušek statických, konkrétně zkoušek, kterým budou stříhané vzorky podléhat – tahová zkouška, Nakajima test, Hole expansion test a Diabolo test.

2.2.1 Tahová zkouška

Tato zkouška se řadí mezi základní a nejznámější druhy mechanických zkoušek. Je založena na principu stanovení závislosti síly na prodloužení, resp. napětí na poměrné deformaci materiálu. Tato zkouška je jednou z nepoužívanějších mechanických zkoušek, jelikož je její provedení velice rychlé, jednoduché a má vysokou vypovídající hodnotu. Výhodou této zkoušky je také nepochybně fakt, že ji lze využít téměř pro jakýkoliv druh materiálu. Vzorky pro tuto zkoušku mají charakteristický tvar (viz Obrázek 8) [8, 9, 10].

Zkouška je prováděna plynulým zvyšováním zatížení v tahu vzorku s počátečním průřezem S_0 a počáteční délkou L_0 . Vlivem tohoto zatěžování dochází k deformaci tělesa od pružné deformace až po plastickou, nejčastěji až do jeho porušení [8, 9, 10, 11].



Obrázek 8 – Náhled vzorků pro tahovou zkoušku [12]

Výsledkem tahové zkoušky bývá z pravidla graf závislosti napětí na poměrné deformaci zkoušeného tělesa (viz Obrázek 9). Z tohoto grafu lze následně pomocí určených vztahů nebo přímo odečtením z grafu získat jednotlivé charakteristiky materiálu (viz níže). Zkouška a její parametry jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 6892 *Kovové materiály – Zkoušení tahem* [8, 9, 10].

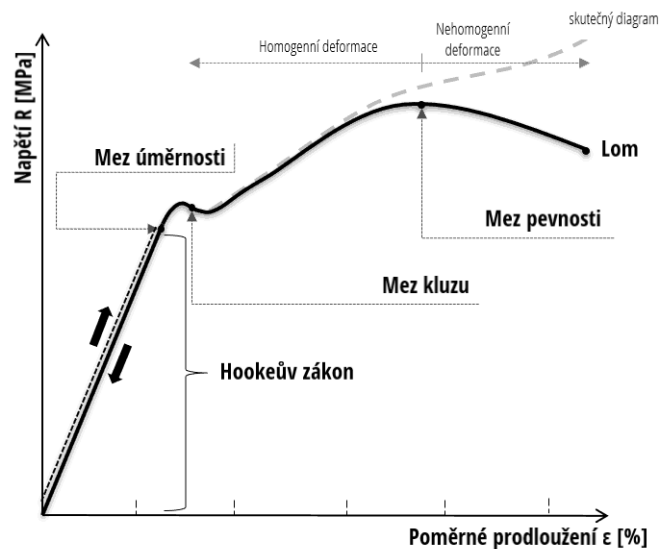
Mez pevnosti je nejvyšší naměřená hodnota napětí v tahu, které je dosaženo, než dojde k porušení tělesa. Typicky je tento stav pohledově rozeznatelný vytvořením tzv. krčku, těsně před samotným porušením tělesa [8, 13].

Mez kluzu je rovna napětí, u kterého začíná docházet plastickým deformacím vlivem prodloužení vzorku. K tomuto prodloužení začne docházet, aniž by rostla hodnota zatížení. Mez kluzu se může u různých materiálů projevat buď jako výrazná, nebo nevýrazná. U strojírenských nebo příliš tvrdých materiálů je mez kluzu spíše nevýrazná, proto se používá tzv. smluvní mez kluzu, která odpovídá 0,2% prodloužení [8, 13].

Tažnost je vlastnost materiálu, která je vyjadřována jako poměr délky zkoušeného tělesa po provedení mechanické zkoušky, a tedy po jeho přetržení, k původní délce tělesa. Hodnota tažnosti se vyjadřuje z pravidla v procentech, vztažených k původní délce [8, 13].

Kontrakce vyjadřuje poměr největšího trvalého zúžení průřezu zkoušeného tělesa k původnímu průřezu. Stejně jako tažnost se kontrakce vyjadřuje v procentech, vztažených k původnímu průřezu [8, 13].

Modul pružnosti v tahu je materiálová konstanta, která popisuje deformace daného materiálu ve směru osy zatížení. Tento modul je základem Hookova zákona, odkud je odvozeno, že je to poměr napětí v tahu a poměrného prodloužení [8, 13].



Obrázek 9 – Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení [14]

2.2.2 Nakajima test

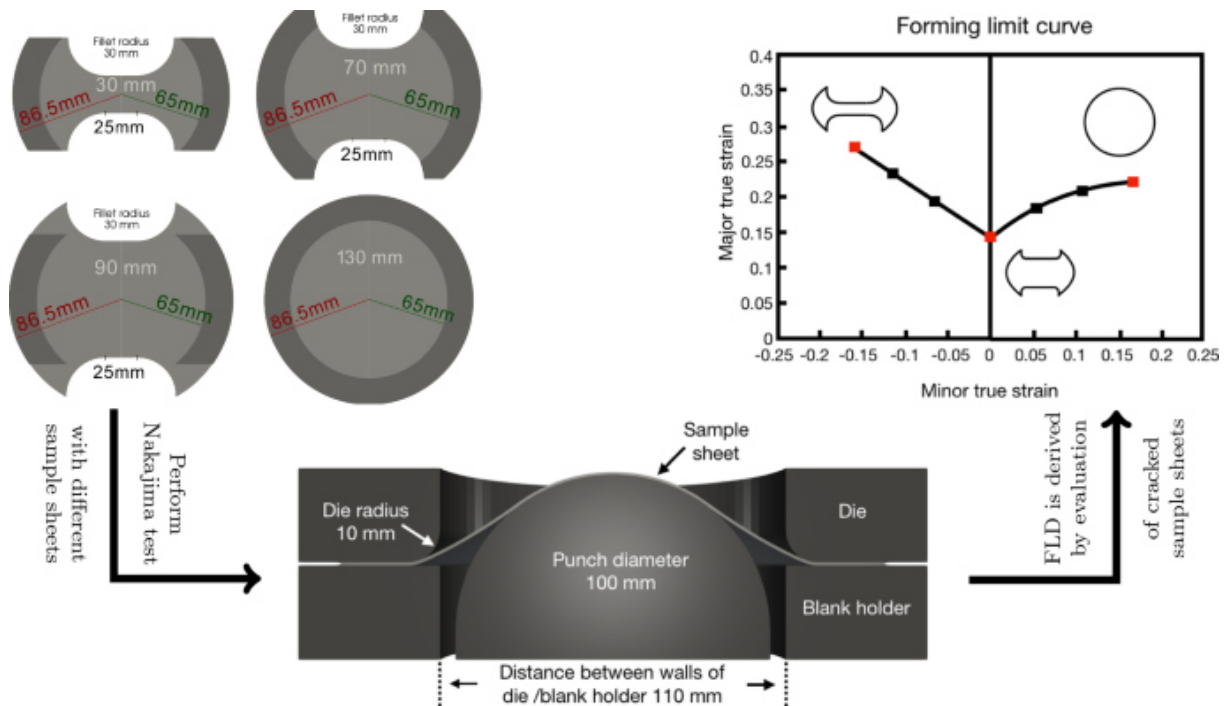
Tato mechanická zkouška je založena na principu tažení zkoušeného tělesa, které má přesně definovaný tvar (viz Obrázek 10). Toto zkušební těleso se vždy upíná pomocí přídržovače, kvůli zamezení vtahování tělesa dovnitř. Zkouška probíhá na lisu, kdy je zkušební těleso taženo pomocí tzv Nakajima tažníku, který je v horní části opatřen kulovou plochou. Těleso se začíná natahovat a zkouška končí, když se začne objevovat v krčku tělesa první trhlinka. Tato trhlinka však musí být maximálně ve vzdálenosti 15 % průměru tažníku od jeho vrcholu. Zkušební tělesa a postup zkoušky jsou přesně popsána normou ČSN EN ISO 12004-2 *Kovové materiály – Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy – Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři* [8, 15].



Obrázek 10 – Náhled vzorků pro Nakajima test [16]

Výsledky této zkoušky jsou zejména maximální hloubka, kdy dochází k vzniku trhliny na zkušebním tělese, nebo mezní lomová křivka [8, 15, 16].

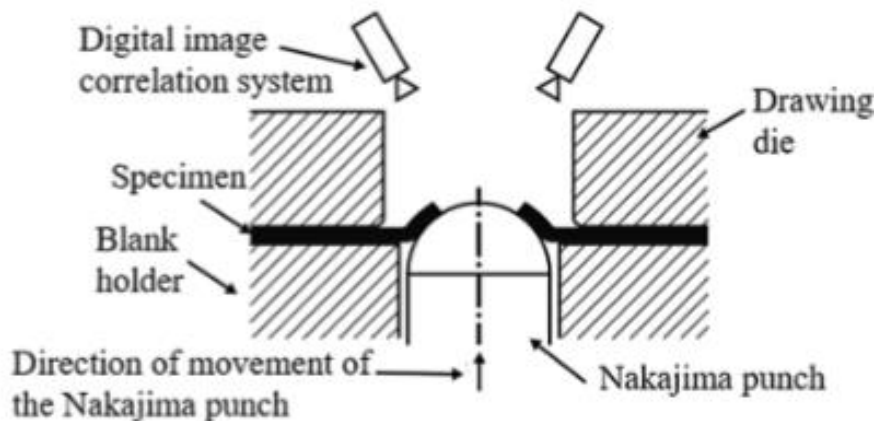
Zkouška také může sloužit k získání tzv. Keeler-Goodwinova digramu, což je provedeno zkoušením několika vzorků, kdy každý vzorek odpovídá konkrétnímu bodu v diagramu a aproximací těchto bodů získáme mezní křivku tvařitelnosti (viz Obrázek 11) [8, 15, 16].



Obrázek 11 – Náhled průběhu zkoušky Nakajima test [17]

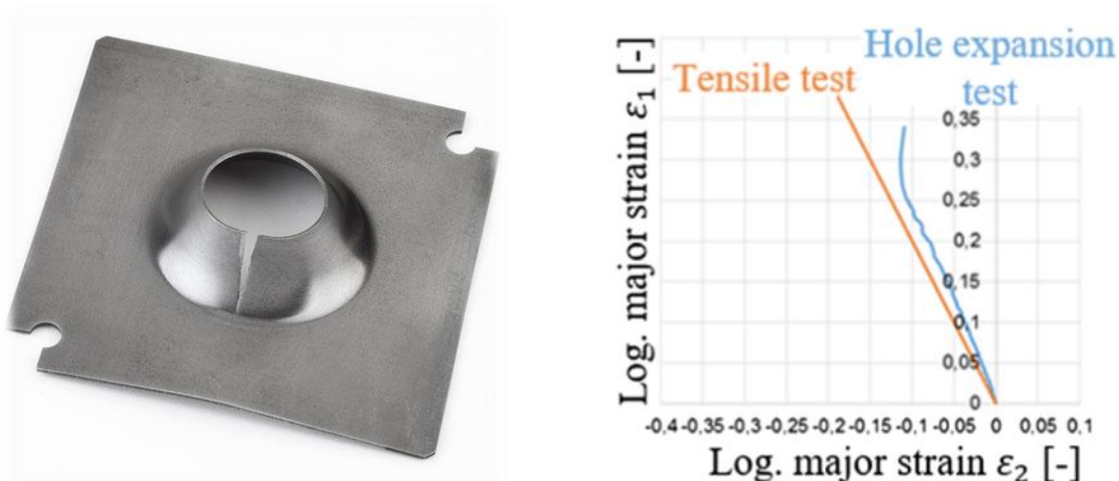
2.2.3 Hole expansion test

Tato zkouška probíhá podobně jako Nakajima test, s kulovým tažníkem o průměru 40–60 mm, ale na tělese jiného tvaru. Zkouší se především kovové plechy o tloušťkách v rozmezí 1–6 mm. Zkoušené těleso zpravidla bývá kruhového nebo čtvercového tvaru s přesným středovým otvorem, většinou zhotoveným stříháním [7, 18].



Obrázek 12 – Schéma průběhu zkoušky Hole expansion test včetně DIC měření [7]

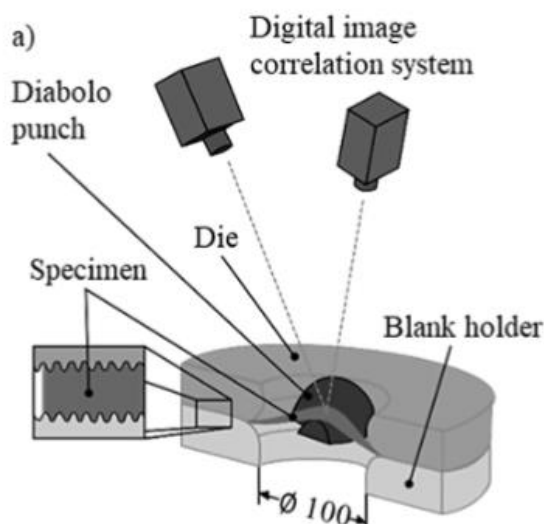
Toto těleso se upne pomocí kruhového přídržovače a následně je středová díra, nejčastěji o průměru 10 mm, pomocí tažníku s kulovou plochou roztahována až do porušení jejího okraje (viz Obrázek 13). Rychlost zkoušky se pohybuje okolo 1 mm/s. Vznik trhlin se sleduje pomocí digitálního obrazového korelačního systému (DIC, viz Obrázek 12). Zkouška podléhá normě ČSN ISO 16630 *Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška rozšiřováním otvoru*. Výsledkem zkoušky je součinitel roztažnosti otvoru λ [7, 19].



Obrázek 13 – Vzorek zkoušky Hole expansion test (vlevo) [20], diagram hlavních deformací (vpravo) [7]

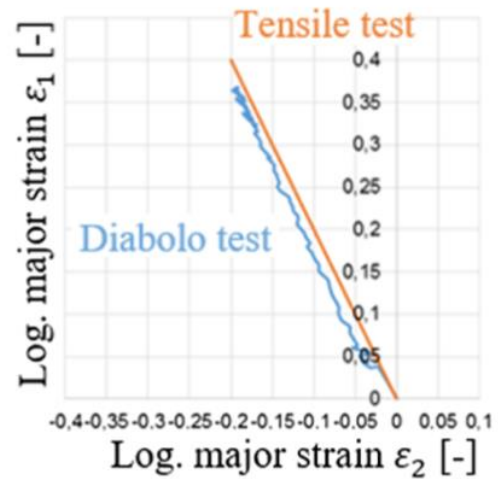
2.2.4 Diabolo test

Stejně jako předchozí mechanické zkoušky Nakajima test a Hole expansion test je tato zkouška realizována pomocí lisu a příslušných nástrojů. Pro tuto zkoušku se stejně jako v předchozích případech upíná zkušební těleso pomocí přidržovače. Nástroj pro tažení vzorku je jiný, v tomto případě tzv. Diabolo tažník (viz Obrázek 15), který má specifický tvar popsáný normou ČSN EN ISO 12004-2 *Kovové materiály – Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy – Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři*. Zkušební těleso, má tvar obdélníku, z jedné strany s obrobenou hranou a z druhé strany stříženou. Velikost zkušebního tělesa bývá typicky 40 mm × 200mm [7, 15].



Obrázek 14 – Schéma průběhu zkoušky Diabolo test včetně DIC měření [7]

Tažník je pomocí lisu vlačován přes těleso tak, aby ho natahoval. Pro snížení koeficientu tření se mezi zkoušené těleso a tažník vkládá teflonová folie. Rychlosti pohybu tažníku a celé zkoušky jsou podobné jako u předchozích zkoušek, tj. 1 mm/s. Zkouška končí v okamžiku, kdy se na tělese v oblasti vniklého krčku začne objevovat trhlinka. Na základě zaznamenané deformace lze posuzovat vznik napětí v tělese. Pro zaznamenávání jednotlivých polí deformací je celá zkouška také monitorována pomocí digitálního obrazového korelačního systému (viz Obrázek 14) [7].



Obrázek 15 – Diabolo tažník (vlevo), diagram hlavních deformací (vpravo) [7]

Obecně lze u jednotlivých zkoušek posuzovat různé parametry, jako například vliv zvoleného tažníku na tvorbu trhlin a vznik deformací, rychlost provedené zkoušky v závislosti na rychlosti vzniku deformace, velikost deformace, vzdálenost vzniku trhliny od místa kontaktu vzorku s tažníkem nebo vliv kvality stříhané hrany na tvorbu trhlin. Kvalita stříhané hrany má velký vliv na průběh i výsledek zkoušky a její tvorba je předmětem této práce. U všech výše uvedených mechanických zkoušek je zkoušené těleso zatěžováno tahovou silou až do vzniku plastických deformací. Všechny tyto zkoušky jsou tedy destruktivní a pro každou jednotlivou zkoušku je nutné vyrobit nový zkušební vzorek. Z tohoto důvodu byl zadán požadavek na vytvoření střížného přípravku k tvorbě jednotlivých zkušebních vzorků s možností nastavení střížných parametrů, kterým se zabývá tato diplomová práce.

3 Praktická část

Úkolem je navrhnout přípravek, kterým lze vyrábět konečné polotovary z výchozích, předem připravených polotovarů pro mechanické zkoušky materiálu Nakajima test, Diabolo test, Hole expansion test a tahovou zkoušku. Jelikož má na provádění mechanické zkoušky významný vliv kvalita okrajů stříhaných hran polotovarů, je třeba dbát zvýšené pozornosti právě na stříh těchto hran. Kvalita hran výstřížků je v rámci technologie přímo ovlivněna nastavením střížných parametrů, jako je například střížná vůle, sklon ostří nástrojů, rychlost stříhu, nebo velikost předřizovací síly. Na přípravek je tedy kladen požadavek možnosti nastavení těchto střížných parametrů.

3.1 Shrnutí požadavků

Základní požadavky, které jsou dány zadavatelem:

- umožnit stříh všech zadaných polotovarů pro všechny druhy mechanických zkoušek
- stříh plechů o maximální tloušťce 1 mm pro ocelový plech a 2,5 mm pro hliníkový plech
- umožnit co možná nejširší paletu nastavení střížných parametrů

Obecně platné požadavky:

- malý počet součástí
- snadná smontovatelnost
- jednoduchá konstrukce
- nízké náklady na výrobu přípravku
- nízké náklady na provoz
- snadná obsluha

3.2 Polotovary a materiál

Jak již bylo popsáno v úvodu práce, polotovary budou vyrobeny z plechů především ze dvou materiálů. Jedná se o hliníkový plech maximální tloušťky 2,5 mm, nebo o ocelový plech z vysokopevnostní oceli DP 1200 (Dual Phase 1200 využívaná např. v automobilovém průmyslu) o maximální tloušťce 1 mm [21].

Přípravek je určen ke stříhu polotovarů pro celkem čtyři druhy mechanických zkoušek. Výchozích i výsledných polotovarů, které budou předem připravené nejčastěji technologií obrábění, nebo taktéž stříhání, bude celkem šest.

Do polotovaru pro mechanickou zkoušku Nakajima test se budou prostříhovat otvory o dvou různých velikostech tak, že mezi otvory zbude krček o šířce buď 40 mm nebo 70 mm. Otvory se budou prostříhovat vždy do polotovaru o vnějším průměru 199 mm. Naopak pro mechanickou zkoušku Hole expansion test se bude stříhat pouze jeden otvor o velikosti 10 mm, ale do dvou různě velkých výchozích polotovarů, s vnějším průměrem 128 mm nebo 199 mm. V rámci stylu stříhu těchto polotovarů budu v práci rozlišovat stříh a prostříh jednotlivých částí. Přehled velikostí polotovarů a nástrojů je uveden v tabulkách níže (viz Tabulka 1 a Tabulka 2).

Tabulka 1 – Přehled velikostí polotovarů a nástrojů pro prostřih, v závislosti na mechanických zkouškách

Prostřih	Velikost polotovaru [mm]		Velikost krčku/střížného nástroje [mm]	
Nakajima test	199		40	70
Hole expansion test	128	199	10	

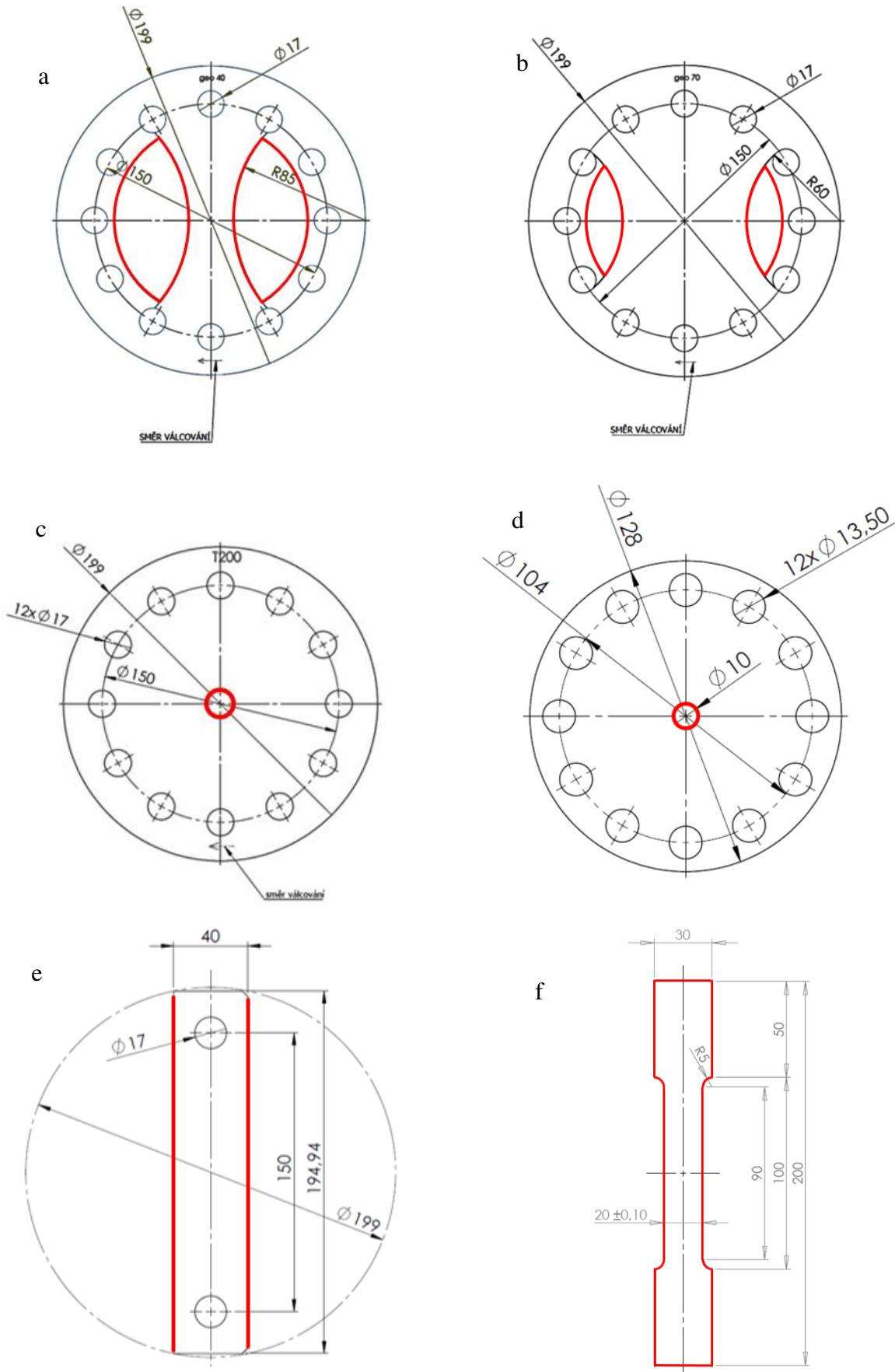
Tabulka 2 – Přehled šířek polotovarů a nástrojů pro stříh, v závislosti na mechanických zkouškách

Stříh	Šířka polotovaru [mm]	Velikost střížných nástrojů [mm]
Tahová zkouška	200	220
Diabolo test	199	220

Do připravených výchozích polotovarů se tedy budou buď prostřihovat otvory, nebo se z nich bude materiál odebírat plošným a tvarovým stříháním. V následujících náhledech výkresů je červeně naznačen obrys, který bude navrhovaným přípravkem oddělován.

Díky faktu, že tvary výchozích polotovarů nejsou tak rozmanité, lze přípravek konstruovat přesně pro konkrétní rozměry a typ. Polotovary jsou tedy rozděleny podle svých tvarů do dvou skupin – prostřih a stříh. Polotovary ve skupině určené pro prostřih (2× Nakajima test a 2× Hole expansion test) mají kruhový tvar, u kterého je vhodné využít jejich symetrii. Naopak skupina s polotovary pro stříh materiálu (tahová zkouška a Diabolo test) se vyznačuje spíše rovnými, plochami stříhu.

V horní části obrázku níže lze vidět polotovary pro Nakajima test (Nakajima 40 – Obrázek 16a, Nakajima 70 – Obrázek 16b), v prostřední části nalezneme polotovary pro Hole expansion test (Hole expansion 199 – Obrázek 16c, Hole expansion 128 – Obrázek 16d) a ve spodní části polotovary pro Diabolo test (Obrázek 16e) a tahovou zkoušku (Obrázek 16f).



Obrázek 16 – Náhled tvarů stříhu v jednotlivých polotovarech [archiv COMTES – upraveno]

3.3 Návrhový výpočet

3.3.1 Výpočet střížné síly

Pro výrobu polotovarů na tomto přípravku jsou určeny dva základní materiály – Ocel DP 1200 a hliník. Každý z těchto materiálů má rozdílné vlastnosti a z každého materiálu se budou vyrábět polotovary různé tloušťky. Z ocelového plechu budou polotovary dosahovat tloušťky maximálně 1 mm, a z hliníkového plechu maximálně 2,5 mm. Pro výpočet střížné síly bylo nutné stanovit tzv. worst case, tedy nejhorší případ zatěžování.

Mez pevnosti v tahu oceli DP 1200 je $\sigma_{pt} = 1200$ MPa, což podle hypotézy HMM (prostorové napjatosti) je $\tau = \frac{\sigma_{pt}}{2}$ (1), z čehož vyplývá, že mez pevnosti ve smyku je $\tau = 600$ MPa. Mez pevnosti v tahu hliníku je $\sigma_{pt} = 240$ Mpa, což ze stejné hypotézy (HMM) vychází, že pevnost ve smyku je $\tau = 120$ MPa.

Jelikož je mez pevnosti v tahu 5× vyšší u oceli, je zřejmé, že větší střížný odpor bude klást ocelový plech, z toho důvodu byl výpočet prováděn právě pro tento materiál.

Největší střížná plocha je u prostříhu polotovaru pro Nakajima test 40:

Obvod: $o = 232$ mm

Tloušťka: $t = 1$ mm

$$S = o \cdot t = 232 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

$$\tau = \frac{F}{S} \Rightarrow F = \tau \cdot S \quad (3)$$

$$F = 600 \cdot 232 = 139\,200 \text{ N} = \mathbf{139,2 \text{ kN}} \quad (4)$$

Celková maximální střížná síla je **139,2 kN**.

Velikost přidržovací síly byla pro návrh a pevnostní analýzu volena jako 20 % střížné síly, což odpovídá hodnotě cca 28 kN. Skutečná síla může být optimalizována podle požadavků daného stříhu.

3.4 Návrh konstrukce

Přípravek jsem se tedy rozhodl rozdělit na dvě hlavní části pro oddělené stříhání těchto dvou skupin polotovarů – část prostříhu a část stříhu. Část přípravku pro prostříhování bude umístěna v ose stroje, stříh druhé skupiny bude prováděn v jiné části celé sestavy přípravku. Jednoosá symetrie stroje bude zachována z důvodu zatížení a zachování tuhosti konstrukce.

Přípravek tedy bude sestávat ze dvou protilehlých částí, na kterých budou připevněny střížné nástroje. Přípravek tedy bude kromě rozdělení na střížnou a prostříhovací část dále rozdělen na pevnou a pohyblivou část. V rámci zachování stability konstrukce bude nejjednodušší ponechat střížnice uložené na spodní pevné části, a naopak střížníky řešit jako pohyblivé a uchytit je na horní pohyblivou část přípravku. Spodní část s uložením střížnic tedy bude součástí pevného rámu, zatímco horní část je nutné uložit na lineární vedení. Jelikož by se v případě horizontálního pohybu pohyblivé části celého stroje musel eliminovat průhyb lineárního vedení od vlastní hmotnosti, bude v rámci zjednodušení konstrukce nejlepší celý rám orientovat na výšku, a lineární posuv pohyblivé části zhotovit jako vertikální. Toto řešení bude navíc příznivě přispívat i k vyvolání dostatečně velké střížné síly, vlivem vlastní hmotnosti pohyblivé části [22, 23].

3.4.1 Konstrukce uchycení střížných nástrojů

Střížné nástroje budou realizovány jako negativ a pozitiv požadovaného tvaru stříhaných hran. Jeden z cílů této práce je uchycení střížných nástrojů, včetně realizace nastavení jejich parametrů. Pro prostřihovací část přípravku bohužel z podstaty technologické operace nelze konstrukčně vyřešit nastavení střížné vůle jinak než výměnou nástroje. Tento problém se tedy týká výstřížků pro zkoušky Nakajima test a Hole expansion test.

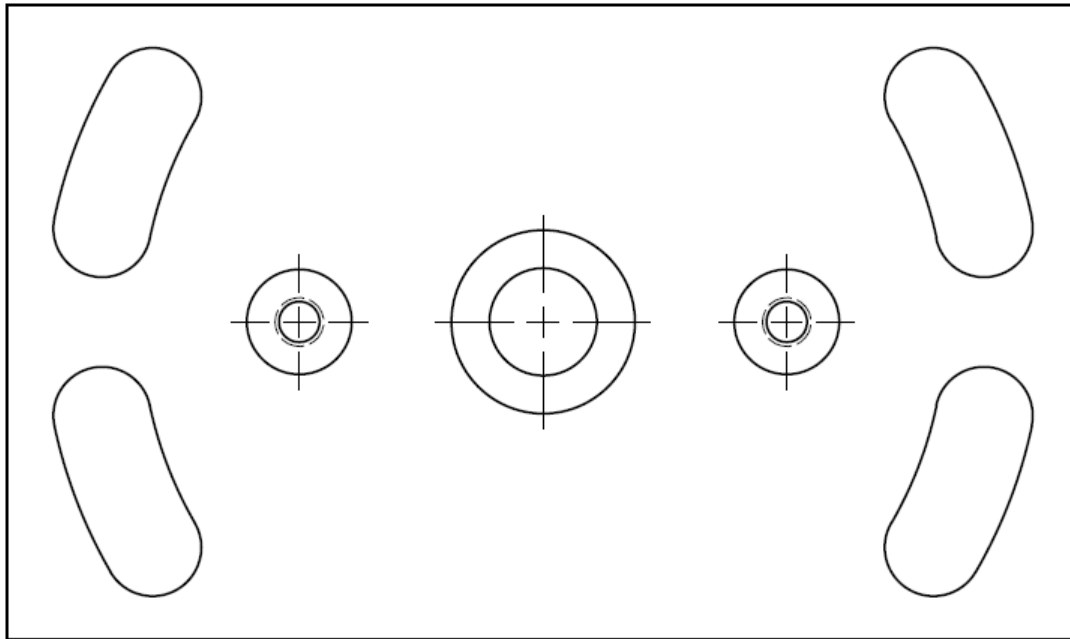
Střížník pro zkoušku Nakajima test bude zhotoven ve dvou sadách, každá po dvou kusech. Střížníky by tedy měli být v upínacím tělese uloženy co nejjednodušším způsobem, ale zároveň se zachováním dostatečné tuhosti uložení. Uchycení střížníků je řešeno pomocí dvou vodících kolíků, o průměrech 12 mm (pro velikost krčku 40 mm) a 8 mm (pro velikost krčku 70 mm). Kvůli zachování tuhosti a jednoduché výměně jsou kolíky součástí těla střížníku. Pevné spojení střížníků s upínacím tělesem zajišťují zapuštěné šrouby M10 a M5 s vnitřním šestihranem (ČSN EN ISO 4762) po jednom kusu v každém střížníku, uložené mezi kolíky.

Střížnice pro Nakajima test budou kruhové desky se střížnými otvory, uloženy pevně v ose přípravku a přichyceny čtyřmi zapuštěnými šrouby M24 s vnitřním šestihranem (ČSN EN ISO 4762). Taktéž budou zhotoveny dvě varianty pro prostřih polotovarů pro obě zkoušky. Střížné otvory ve střížnicích budou průchozí, kvůli odvádění odděleného materiálu. Čelní plocha střížnic bude sloužit k umístění stříhaného polotovaru. Pro přesné ustavení do konkrétní polohy pro stříhání je tato čelní plocha opatřena dvojicí výstupků na roztečné kružnici 150 mm, které zapadají do kruhových děr po obvodu polotovaru.

Střížník pro zkoušku Hole expansion bude pouze jeden, uloženy v centrální svislé ose přípravku, která odpovídá ose střížnice. Tento nástroj bude v upínacím tělese našroubován pomocí závitu M12, pro zajištění dorazu je střížník vyhotoven s kuželovitým osazením, jež pak plynule přechází do přesného průměru pro stříhání materiálu. Tento střížník je odnímatelný z důvodu snazší údržby, ostření nástroje a kvůli snazšímu provedení ostatních střížných operací.

Střížnice pro zkoušku Hole expansion bude konstruována stejně jako v obou předchozích případech, bude mít kruhový tvar a bude na upevňovací těleso přichycena čtveřicí stejných šroubů. Pro uchycení polotovaru bude nástroj opatřen taktéž dvojicí protilehlých výstupků, které zapadají do kotvících děr v polotovaru. Otvor pro prostřih polotovaru bude umístěn přesně uprostřed nástroje a bude mít pouze tvar přesné díry o průměru 10 mm.

Střížníky pro tahovou zkoušku a Diabolo test budou také umístěny na pohyblivé části přípravku a střížnice na části pevné. Tyto nástroje budou výměnné, uloženy mimo osu prostřihu, tedy mimo osu přípravku. Kvůli různé délce nástrojů, bude jejich horizontální rovina stříhu položena výš než rovina stříhu nástrojů pro prostřih (Nakajima a Hole expansion). U tohoto nástroje již lze vyřešit nastavení střížné vůle a sklon střížníku. Střížník bude tedy umístěn na boční ploše upínacího tělesa a bude uchycen pomocí pevných kolíků a centrálního šroubu. Čtveřice kolíků budou součástí upínacího tělesa, na které bude dosedat nástroj s drážkami o tvaru částí kružnice tak, aby bylo možné nástroj naklápět a měnit tím sklon ostří střížníku. Zároveň je možné nástroj na kolících posouvat otáčením středového šroubu a měnit tak střížnou vůli mezi nástroji, který je našroubován do závitu v upínacím tělese (viz Obrázek 17).



Obrázek 17 – Schématické znázornění střížníku pro Diabolo test

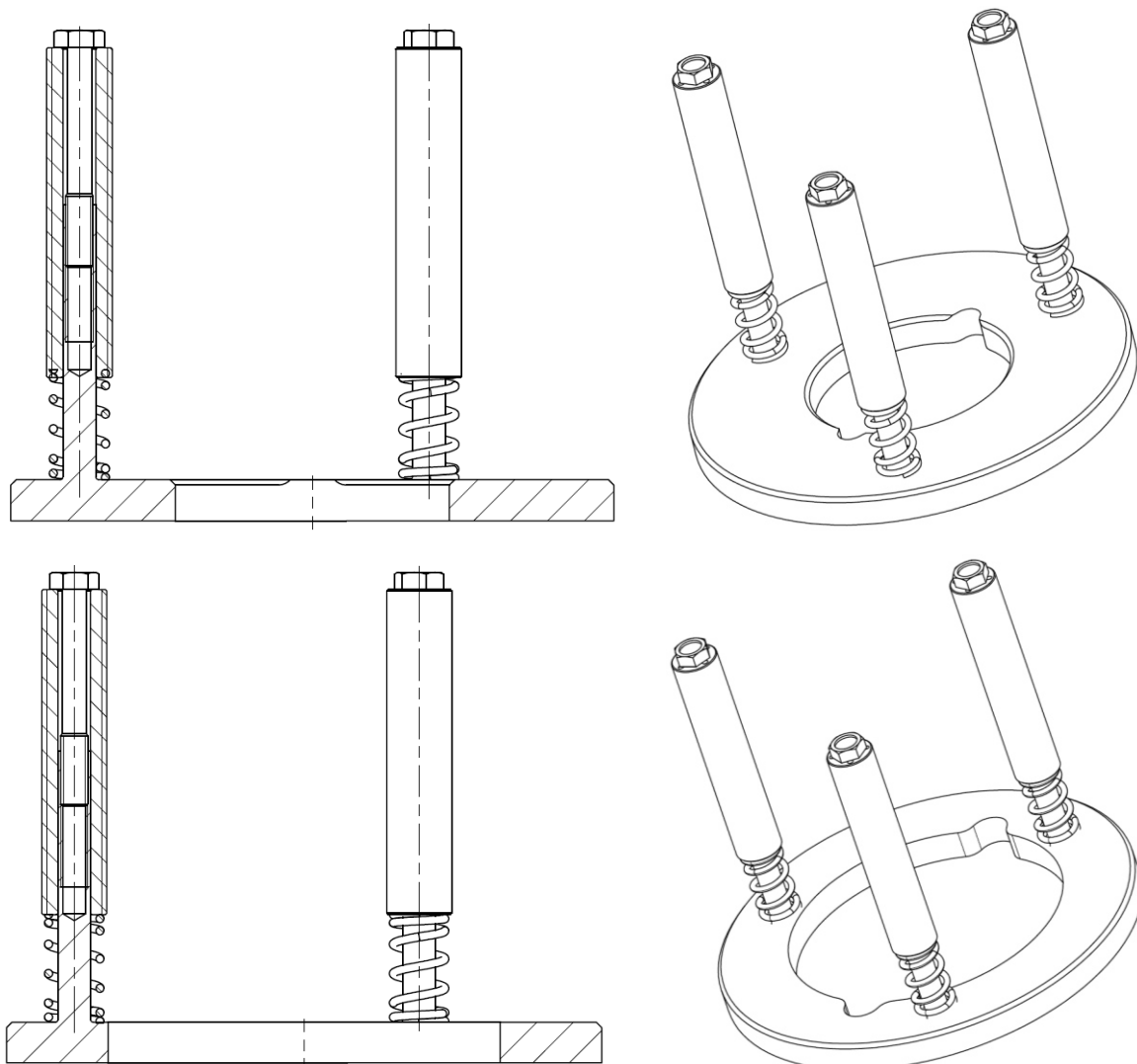
Střížnice pro tahovou zkoušku a Diabolo test bude v tomto případě ve tvaru kvádrů, uložena na horizontálně orientované rovné ploše se čtveřicí vertikálních vodících kolíků pro její přesné uložení. Delší rozteč kolíků bude větší než maximální délka vkládaného polotovaru, aby bylo možné vložit pás materiálu, a z něj následně oddělovat jednotlivé kusy. Kvůli uložení přidržovače na horní ploše střížnice, musí mít kolíky dvojnásobnou délku, než je tloušťka samotné střížnice. Střížnici je možné konstruovat jako oboustrannou a v případě stříhu vzorku pro tahovou zkoušku nebo Diabolo test se střížnice pouze otočí o 180° .

3.4.2 Konstrukce přidržovačů

Přidržovače budou z důvodu velkých rozdílů rozměrů jednotlivých polotovarů zapotřebí tři, jeden pro část stříhu a dva pro část prostříhu. Jelikož tvářecí síly jsou mnohonásobně menší než např. u technologie tažení, není třeba přidržovač materiálu konstruovat tak robustní. Nicméně přidržovač také velmi významně ovlivňuje kvalitu stříhaných hran a okrajů, proto je nutné jej konstruovat tak, aby bylo možné alespoň částečně nastavovat některé z parametrů – přidržovací sílu, vzdálenost přidržovače od stříhané hrany atd.

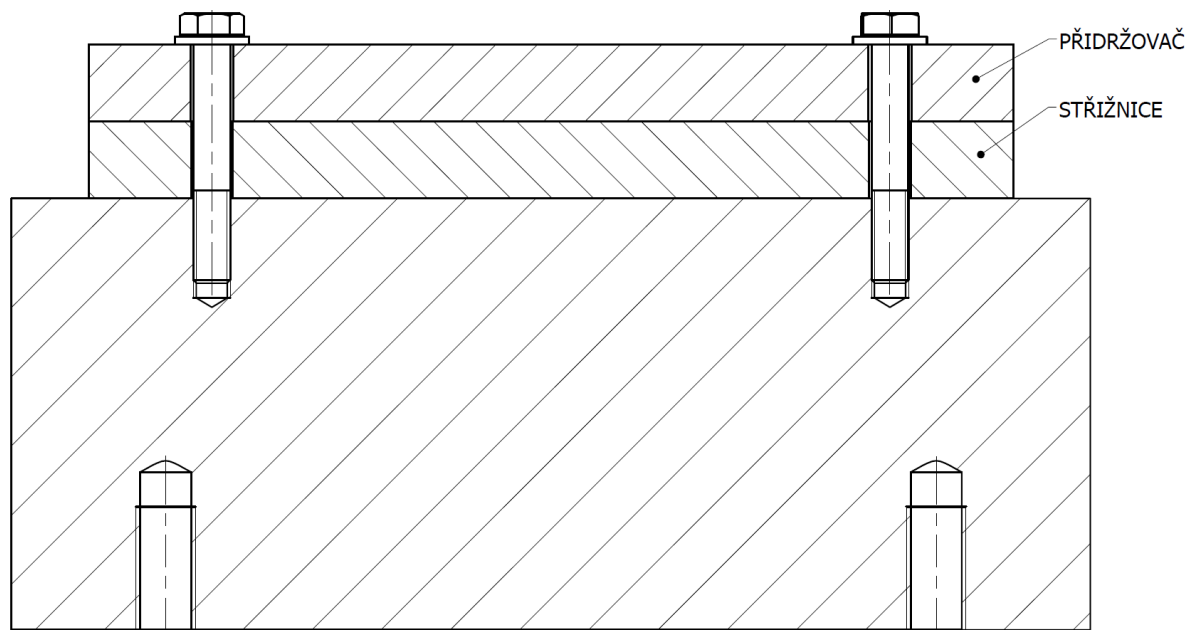
Přidržovače pro prostříh bohužel nelze zkonstruovat tak, aby bylo možné nastavit přidržovací vůli, ze stejného důvodu jako u střížných nástrojů. Je však možné vyřešit nastavení přidržovací síly, kterou lze realizovat tlačnými vinutými pružinami. Tělesa obou přidržovačů pro prostříh budou mít tvar prstenců s rozdílným vnitřním průměrem pro každý polotovar (viz Obrázek 18). Vertikální posuv bude řešen trojicí svislých vodících tyček, rozmístěných na roztečné kružnici o průměru 170 mm, po 120° . Tyto vodící tyčky budou v horní části opatřeny vnitřním závitem M10, kde budou umístěny šrouby sloužící pro nastavení velikosti přidržovací síly a zároveň zdvihu přidržovače. Díky axiálně posuvným válcovým plochám vodících tyček, lze tedy pomocí šroubů nastavit předepnutí vinutých pružin a tím i zdvih přidržovače. Vlivem závislosti zdvihu na předpětí pružin tedy nebude možné regulovat tyto parametry jednotlivě, proto bude mechanismus přidržovačů opatřen o trojici součástí, které umožní samostatné nastavení těchto parametrů. Vodící tyčky přidržovačů budou nasunuty do vnitřní válcové plochy pouzdra, jehož vnější válcová plocha bude opatřena závitem. Prostřednictvím tohoto závitu budou pouzdra našroubována do horního upínacího tělesa. Povolením, nebo utážením

závitových pouzder se bude měnit pracovní zdvih přidržovače při zachování předpětí vinutých pružin. Závitová pouzdra budou procházet celou tloušťkou upínacího tělesa. Z horní čelní plochy jsem pouzdra opatřil otvory pro nastavení klíčem (na kruhové matici). O spodní čelní plochu pouzder se budou opírat zmíněné tlačné vinuté pružiny.



Obrázek 18 – Schématické znázornění přidržovačů pro Hole expansion 108 (výše)
a Hole expansion 128 a Nakajima test (níže)

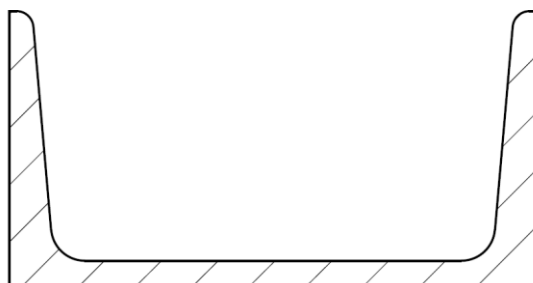
Přidržovač pro stříh bude oproti prostříhu umístěn na pevné části přípravku. Svým tvarem bude hodně podobný střížnici pro tahovou zkoušku a Diabolo test. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že otvory pro uložení na pevných kolících z upínacího tělesa budou oválné, což umožní posuv přidržovače, a tím možnost nastavení působíště přidržovací síly a vzdálenost hrany přidržovače od hrany střížnice. Vyvození přidržovací síly je možné řešit dvojicí šroubů, umístěných mezi pevnými kolíky na kratší straně přidržovače (viz Obrázek 19).



Obrázek 19 – Schématické znázornění přídržovače pro stříh

3.4.3 Konstrukce rámu

Rám jsem se rozhodl navrhnout jako co nejjednodušší sestavu, aby výsledná konstrukce byla co nejsnáze sestavitelná, neměla příliš vysokou hmotnost, sestávala z co nejnižšího počtu součástí a byla variabilní. Celou konstrukci tedy budu realizovat jako šroubovanou z klasických konstrukčních U-nosníků 125 × 65 × 6 × 8 (CNS 1490) (viz Obrázek 20), a čtyřmi vodícími sloupy.

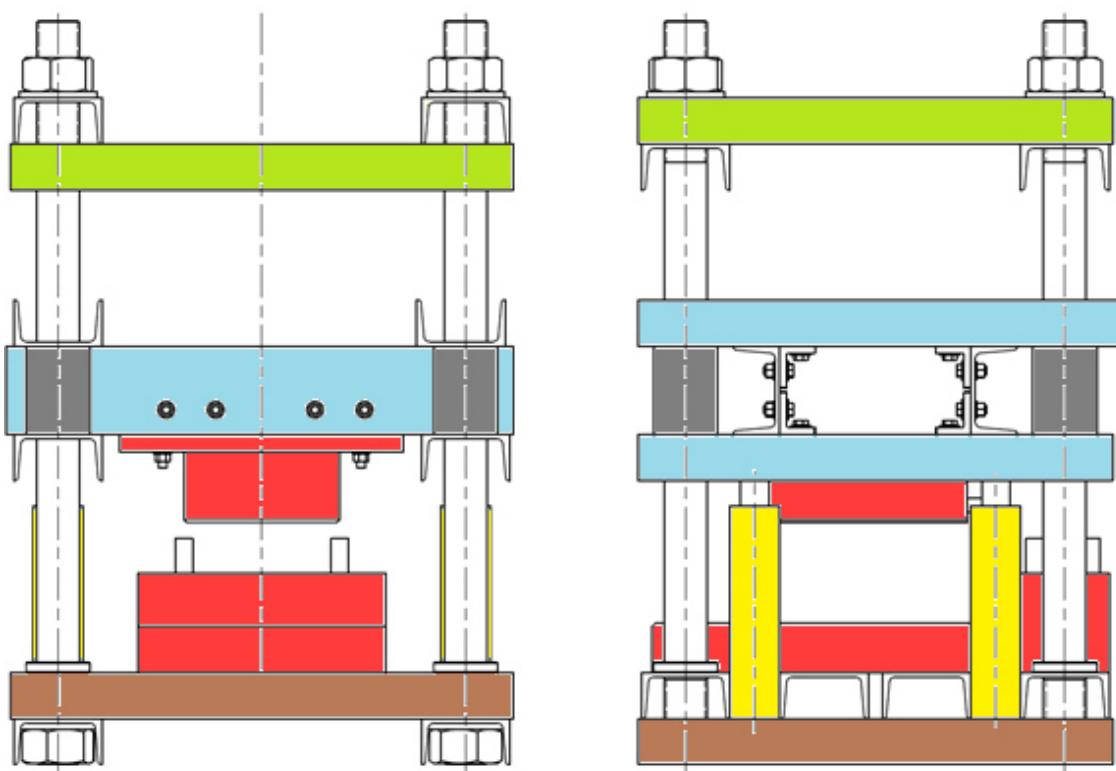


Obrázek 20 – Náhled průřezu U-nosníku

Nosníky na sebe budou kladeny ve spodní části rámu jako dva podélníky, na které se umístí čtyři příčníky. Na tyto příčníky bude pomocí šroubů uchyceno spodní upínací těleso. Půdorys rámu tedy bude tvořit obdélník o rozměrech 660 × 710 mm. V rozích rámu, kde jsou na sobě kolmo položeny nosníky budou otvory o průměru 65 mm pro průchod vodících sloupů. Sloupy jsou silnostěnné trubky o vnějším průměru 60 mm, opatřené na každém z konců metrickým závitem M60 × 5,5. Ve spodní části má závit délku 120 mm a ve vzdálenosti 130 mm od čela trubky se nachází válcové osazení o průměru 90 mm a výšce 15 mm, které zde bude sloužit jako opěrná část pro uložení nosníků s možností jejich předepnutí. Na opačném konci je taktéž metrický závit M60 × 5,5 o délce 160 mm a ve vzdálenosti 180 mm od druhé čelní plochy se také nachází válcové osazení, které se na tento sloup připevní koutovým svarem při montáži rámu. Pomocí koncových závitů na sloupech se celý rám sešroubuje šestihrannými maticemi M60 × 5,5. Celá sestava rámu vytváří tři traverzy.

Mezi horní a dolní pevnou traverzou se nachází pohyblivé posuvné příčnický, jež společně se čtyřmi podélníky tvoří prostřední pohyblivou traverzu. Mezi těmito prostředními pohyblivými podélníky se na každém vodícím sloupu nachází sevřená lineární valivá kuličková ložiska LBCR 60 A-2LS s vnitřním průměrem 60 mm od firmy SKF. Celá prostřední traverza je sešroubována pomocí L-úhelníků, šroubů M12 × 35 (ČSN 02 1201) a matic M12 (ČSN EN 24032). Na středové pohyblivé traverze se nachází i upínací deska se střížnými nástroji, která je pevně spojena příčnický taktéž pomocí L-úhelníků a šroubů. Do této desky je shora zhotoven otvor kvůli přístupu pro nastavení polohy přídržovače (viz výše). Celková výška přípravku je 1050 mm (v místě vrcholu vodících sloupů), výška po horní nejvýše položený nosník je 940 mm (viz Obrázek 21) [24].

Na spodních podélnících mezi příčně uloženými nosníky se budou nacházet čtyři hydraulické válce pro umožnění pohybu prostřední traverzy a pro vyvolání potřebné střížné síly. Uloženy budou mezi jednotlivými nosníky, opřené o plochy spodních podélníků, kde budou také přišroubovány čtveřicí šroubů M10 na každém válci. Tyto hydraulické válce jsem volil dvojčinné, aby bylo možné ovládat přípravek do obou směrů a nebylo potřeba žádných dalších součástí pro umožnění vratného pohybu. Pro tento pohyb jsem vybral univerzální hydraulické válce Genborx HHYG 10250S, s nosností 10 tun. Válce tedy budou vykonávat pracovní pohyb při zpětném pohybu tahem a zdvih přípravku bude realizován tlakem pístnic. Zdroj pracovního tlaku média a externí hydraulický okruh se všemi náležitostmi je libovolný a není předmětem řešení této práce [25].



Obrázek 21 – Schématické znázornění celého stroje:

zelená – horní traverza, modrá – pohyblivá traverza, hnědá – spodní traverza, červená – upínací tělesa, žlutá – hydraulické válce, šedá – lineární valivá ložiska

3.5 Návrh optimalizace jednotlivých konstrukčních uzlů

Některá řešení technických celků (uzlů) přípravku se v průběhu konstrukce neukázala být příliš vhodná, případně vůbec realizovatelná nebo by mohla být provedena lépe. V rámci

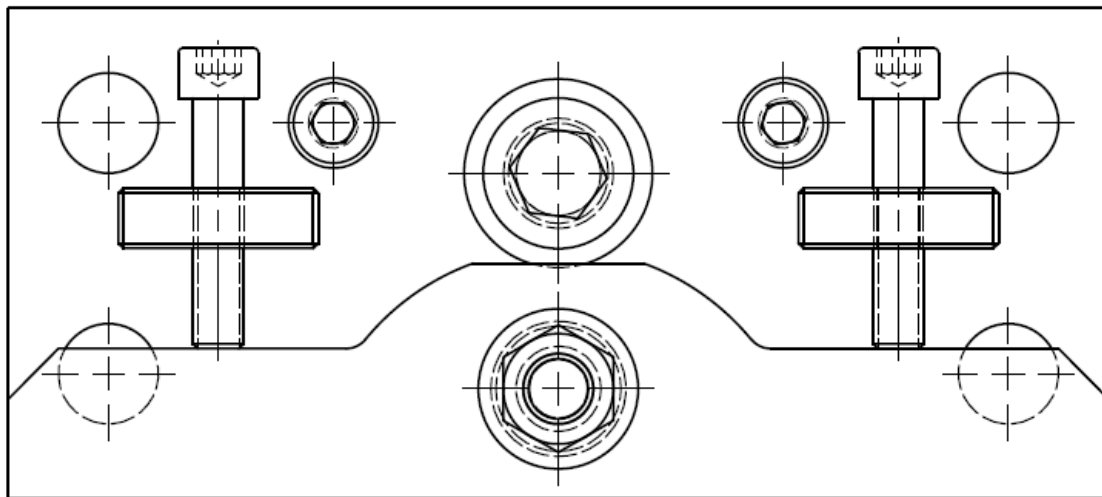
variantního řešení jsem se rozhodl upravit některé části konstrukčního návrhu a zpracovat je do tabulky variantních řešení (viz Tabulka 3).

Tabulka 3 – Variantní řešení a výběr vhodné varianty (červené ohraničení)

Díl	Stávající řešení	Další možnosti řešení
Střižník pro stříh	Nástroj součástí pohyblivého držáku <ul style="list-style-type: none"> Nízká opora nástroje ve vedení 	Nástroje uloženy na jednom držáku <ul style="list-style-type: none"> Dobrá opora nástrojů Možnost upnutí různých nástrojů Snazší výměna Úspora materiálu
Střižnice pro Diabolo test a tahovou zkoušku	Oboustranný nástroj <ul style="list-style-type: none"> Nižší počet součástí Úspora materiálu 	Zvláštní nástroje pro každou zkoušku <ul style="list-style-type: none"> Větší počet součástí
Střižnice pro Hole expansion test	Tři zvláštní nástroje pro každou prostřihovací zkoušku <ul style="list-style-type: none"> Větší počet součástí Možnost zaměnitelnosti dílů 	Oboustranná střižnice Nakajima 40 <ul style="list-style-type: none"> Nižší tuhost střižnice Oboustranná střižnice Nakajima 70 <ul style="list-style-type: none"> Vyšší tuhost střižnice Lepší podepření materiálu
Upnutí přídržovače pro tahovou zkoušku a Diabolo test	Upnutí pomocí šroubů se šestihrannou hlavou <ul style="list-style-type: none"> Nutnost použití nářadí 	Upnutí pomocí excentrických pák <ul style="list-style-type: none"> Rychlejší upínání Snazší regulace přídržovací síly
Vodící sloupky	Navaření kruhové rozpěrné vložky <ul style="list-style-type: none"> Obtížná smontovatelnost Nutnost vytvoření svaru Tepelné ovlivnění sloupů 	Použití závitové rozpěrné vložky <ul style="list-style-type: none"> Možnost regulace zdvihu hydraulických válců Snazší smontovatelnost Rozebíratelnost
Hydraulické válce	Spodní uložení čtyř válců <ul style="list-style-type: none"> Nízká střižná síla Nízký zdvih 	Horní uložení čtyř válců <ul style="list-style-type: none"> Možnost použití větších válců Lepší přístup Horní uložení dvou válců uprostřed <ul style="list-style-type: none"> Velké zatížení horních nosníků Velká deformace rámu

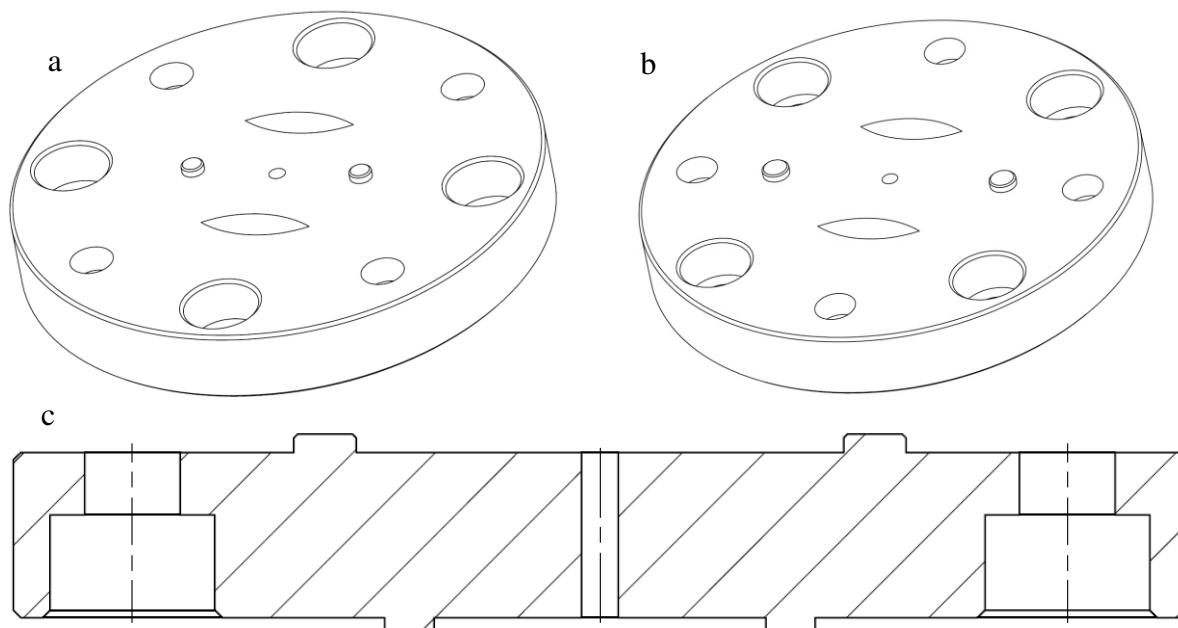
Nastavení sklonu střížníků pro stříh se nezdá být vhodně vyřešeno, s ohledem na přenášené zatížení. Rozložení sil v oválných drážkách by nevytvářelo dostatečnou oporu pro přenesení potřebného zatížení ve vertikální složce síly. Z tohoto důvodu, jsem v další variantě realizoval uchycení střížníků jako dvoudílné. Jedna část bude držák obou střížníků, zajišťující axiální posuv a tím změnu střížné vůle, a druhá část budou samotné střížníky. Držák střížníků bude deska se čtyřmi přesnými otvory pro vodící kolíky z upínacího tělesa. Bude opatřen centrálním otvorem pro šroub, kterým lze nastavit střížnou vůli a dvojicí menších otvorů pro stavěcí šrouby k ustavení do přesné polohy. Dále dvěma horizontálně orientovanými obdélníkovými výstupky se závitovými otvory pro šrouby, kterými lze nastavit sklon ostří a ve spodní části pevným válcovým čepem zajištěným maticí, který bude sloužit pro uložení střížníků. Pro přehlednost by bylo vhodné doplnit držák o gravírovanou stupnici k určení sklonu ostří.

Střížníky budou vypadat kromě střížné hrany stejně. Podlouhlé těleso přibližně tvaru kvádrů, s jedním otvorem uprostřed, pro uchycení na držák těchto střížníků. Díky jednomu upínacímu bodu bude výměna těchto nástrojů velice snadná (viz Obrázek 22).



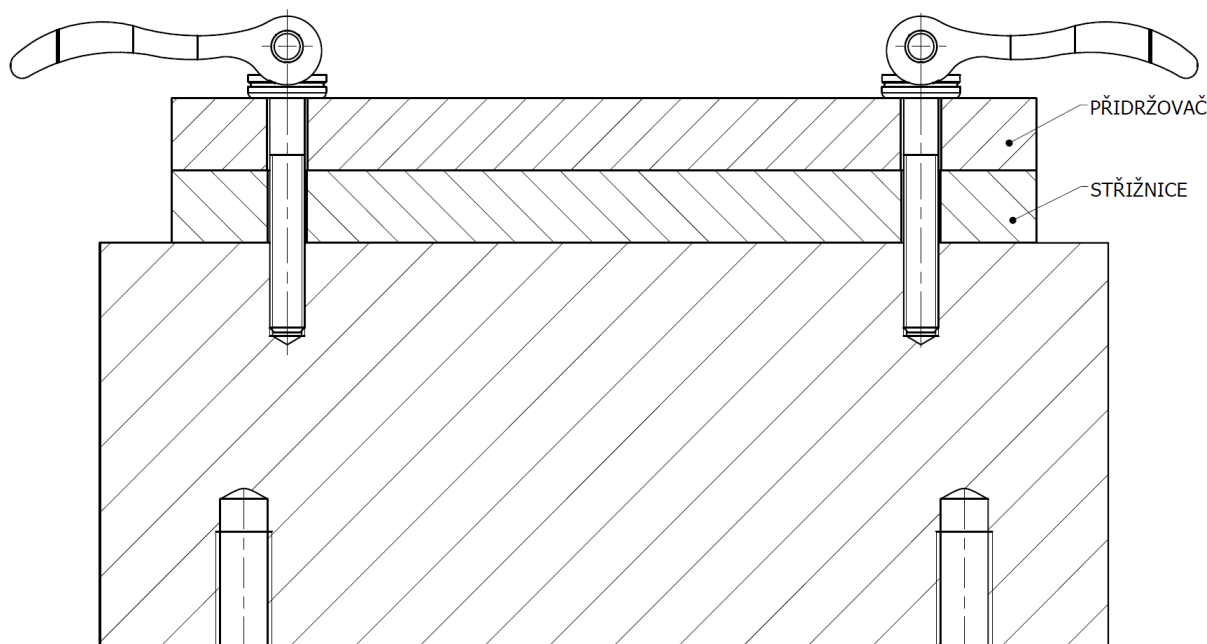
Obrázek 22 – Schéma uložení střížníku pro Diabolo test a Tahovou zkoušku

Střížnice pro zkoušku Hole expansion může být také řešena tak, aby nemuselo existovat další těleso. Lze ji zhotovit na druhé straně některé ze střížnic pro zkoušku Nakajima. Jako nejvhodnější se pro tuto variantu zdá být střížnice pro zkoušku Nakajima s krčkem 70 mm, která má menší otvory ve střížnici, tím je zajištěna její dostatečná tuhost. Nástroj bude třeba kromě středového otvoru s průměrem 10 mm doplnit z druhé strany o čtveřici otvorů se zahloubením pro šrouby M24 se zápustnou hlavou. Čelní plochu střížnice je nutné doplnit také o dvojici výstupků o průměru 13,5 mm na roztečné kružnici 104 mm pro přesné ustavení polotovaru (viz Obrázek 23). Kvůli výstupkům s větší roztečí 150 mm, je také nutné ve spodním upínacím tělese zhotovit pro tyto výstupky vybrání, aby mohla střížnice správně dosednout.



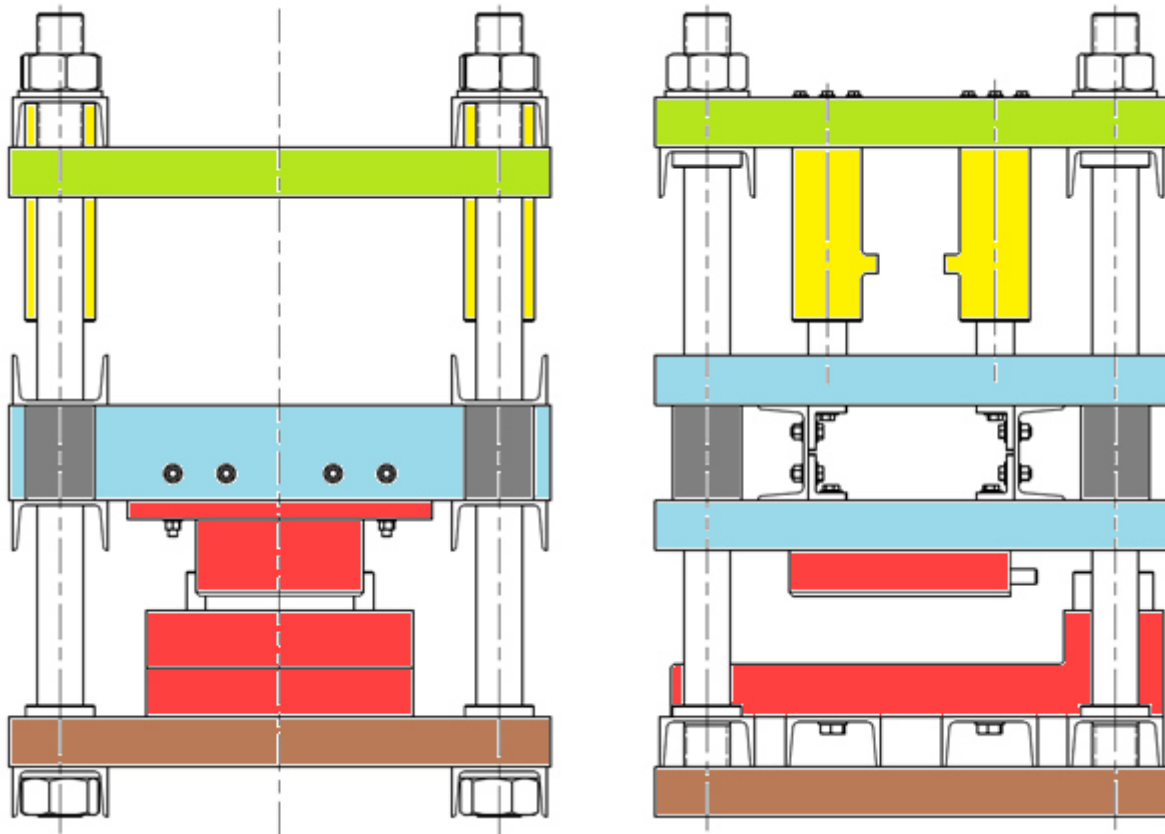
Obrázek 23 – Náhled kombinované střížnice Nakajima 70 a Hole expansion
(a) Hole expansion test 108, (b) Hole expansion test 128, (c) řez střížnicí

Vyvození přidržovací síly u přidržovače pro stříh polotovarů pro tahovou zkoušku a Diabolo test jsem v další variantě uvažoval vyvození přidržovací síly místo klasických metrických šroubů se šestihlannou hlavou, dvojicí excentrických pák. Vhodný komponent je nastavitelná excentrická nerezová páka s vnějším metrickým závitem M12, který bude procházet skrz přidržovač i střížnici (viz Obrázek 24). Těmito pákami lze nastavit požadovanou přidržovací sílu a excentrickým mechanismem snadno zajistit nebo uvolnit [26].



Obrázek 24 – Schéma střížnice a přidržovače u stříhu

Umístění hydraulických válců se ukázalo být nevhodné zejména kvůli nízkému zdvihu a kvůli nedostatečnému dimenzování sřížné síly. Z toho důvodu jsem se rozhodl umístit hydraulické válce do horní části přípravku, mezi horní a prostřední traverzu, tj. mezi horní podélníky, kde budou válce přišroubovány za svojí spodní plochu a mezi pohyblivý podélník, kam budou přišroubovány pístnice. Tím že se změní potřebný zdvih, mohu přípravek osadit jinými válci, které navíc disponují větší silou. Do přípravku jsem tedy volil hydraulické válce Carl Stahl Hi-Force HDA 256 se zdvihem 152 mm a nosností 25 t v tlaku a 10 t v tahu. Počet válců zůstane stejný, dva na každé straně, ve směru roviny symetrie. Výhodou je, že válce mohou vynaložit větší sílu v tlaku než v tahu a jsou umístěny v prostoru, kde zjednoduší montáž, připojení, servis a zvýší se přístupnost pracovního prostoru (viz Obrázek 25) [27].



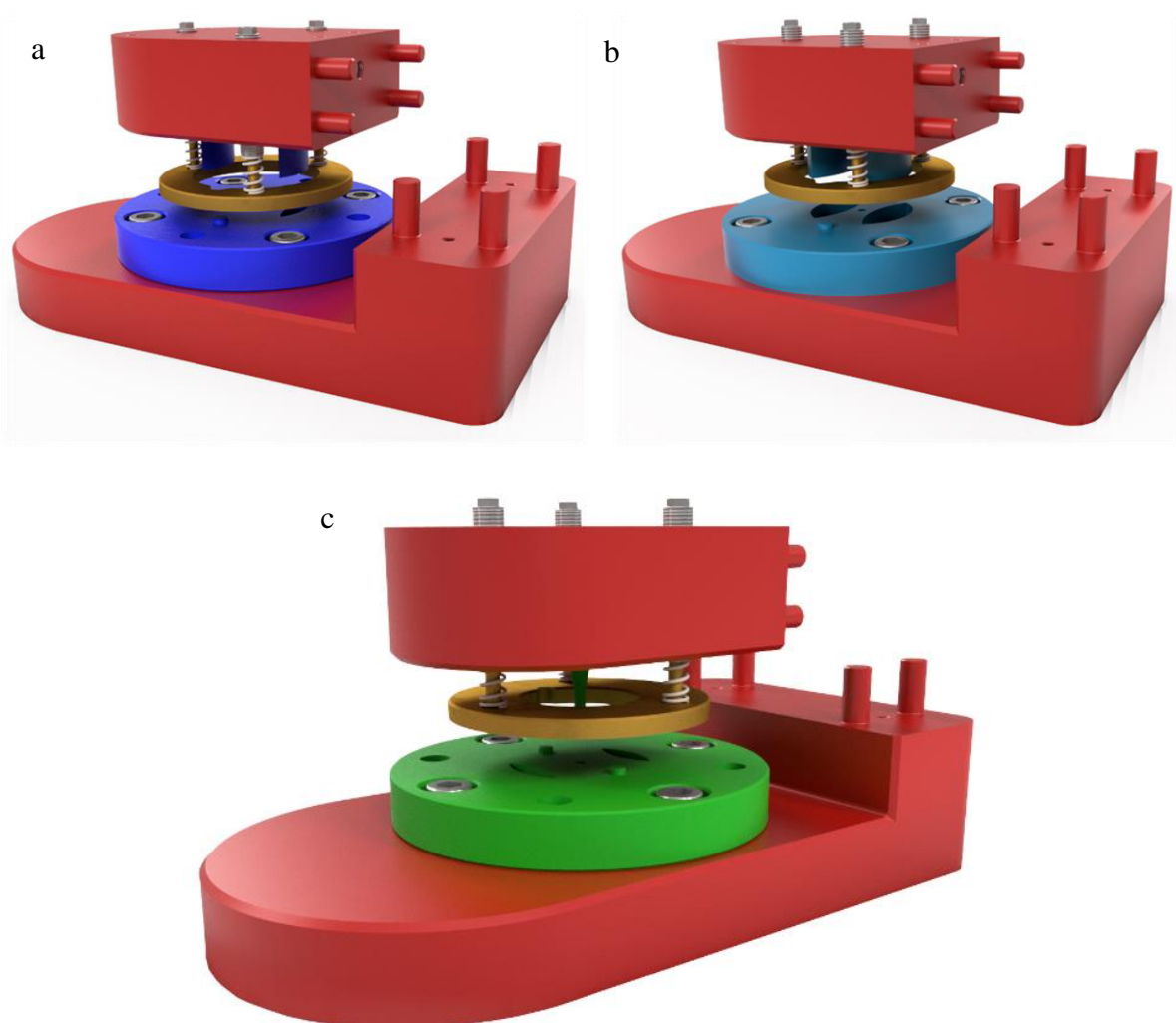
Obrázek 25 – Schéma rámu s horním uložením hydraulických válců

Vodící sloupy, respektive jejich opěrnou plochu pro zajištění polohy nosníků lze také vyřešit lépe. V druhé variantě jsem se válcové osazení u horního okraje sloupu, původně řešené navařením kruhové silnostěnné rozpěrné vložky, rozhodl realizovat pomocí závitu. Tato vložka bude tedy vytvořena taktéž se závitem $M60 \times 5,5$ a na sloup bude našroubována. U sloupu bude tedy zapotřebí závit prodloužit alespoň na 200 mm. Samotnou vložku jsem zesílil z 15 mm tloušťky na 20 mm, kvůli únosnosti závitu a zajištění dostatečné tuhosti spoje. Jelikož jsou hydraulické válce umístěny v horní části rámu, znamená to, že při vyvolání sřížné síly bude tato závitová rozpěrná vložka odlehčována. Výhodou této varianty je, že posuvem vložek lze nastavit výšku celého rámu a tím i vzdálenost uložení hydraulických válců.

3.6 Výsledné konstrukční řešení

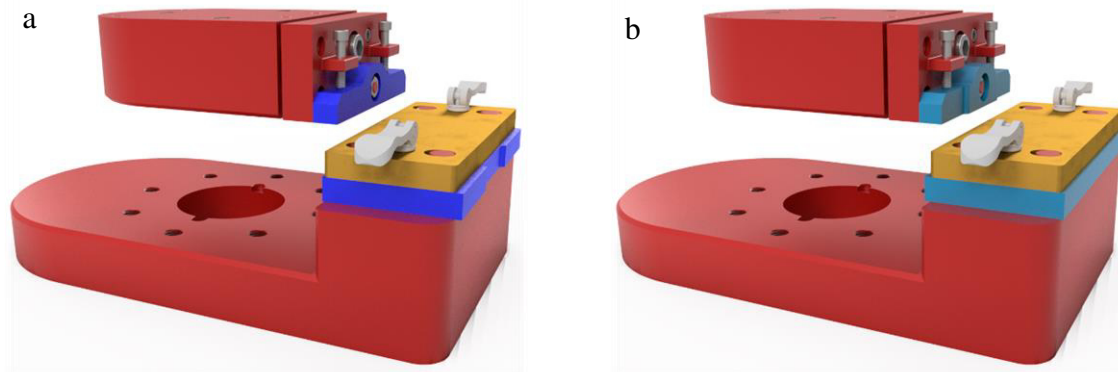
V rámci konečného konstrukčního návrhu jsem zvolil ze všech navržených variant optimální řešení, které splňuje co největší škálu zadaných požadavků. Konečné řešení tedy zahrnuje přípravek rozdělený na dvě oddělené části, na kterých lze realizovat stříh i prostřih jednotlivých polotovárů.

V prostřihovací středové části je možné vytvářet polotovary pro obě verze mechanické zkoušky Nakajima test a prostřihovat obě verze vstupního polotovaru pro mechanickou zkoušku Hole expansion. U prostřihování všech těchto polotovárů je možné nastavení střížné síly a střížné rychlosti pomocí hydraulických válců, nastavení polohy a počátku vyvození přidržovací síly závitovými pouzdry a v neposlední řadě nastavení velikosti přidržovací síly přidržovače stlačením pružin. Nastavení střížné vůle bohužel není v tomto případě možné vyřešit jinak než výměnou střížných nástrojů, celkově je možné stříhat čtyři typy výstřížků na dvou nástrojích (viz Obrázek 26).



Obrázek 26 – Náhled uložení nástrojů pro prostřih
(a) Nakajima 70, (b) Nakajima 40, (c) Hole expansion

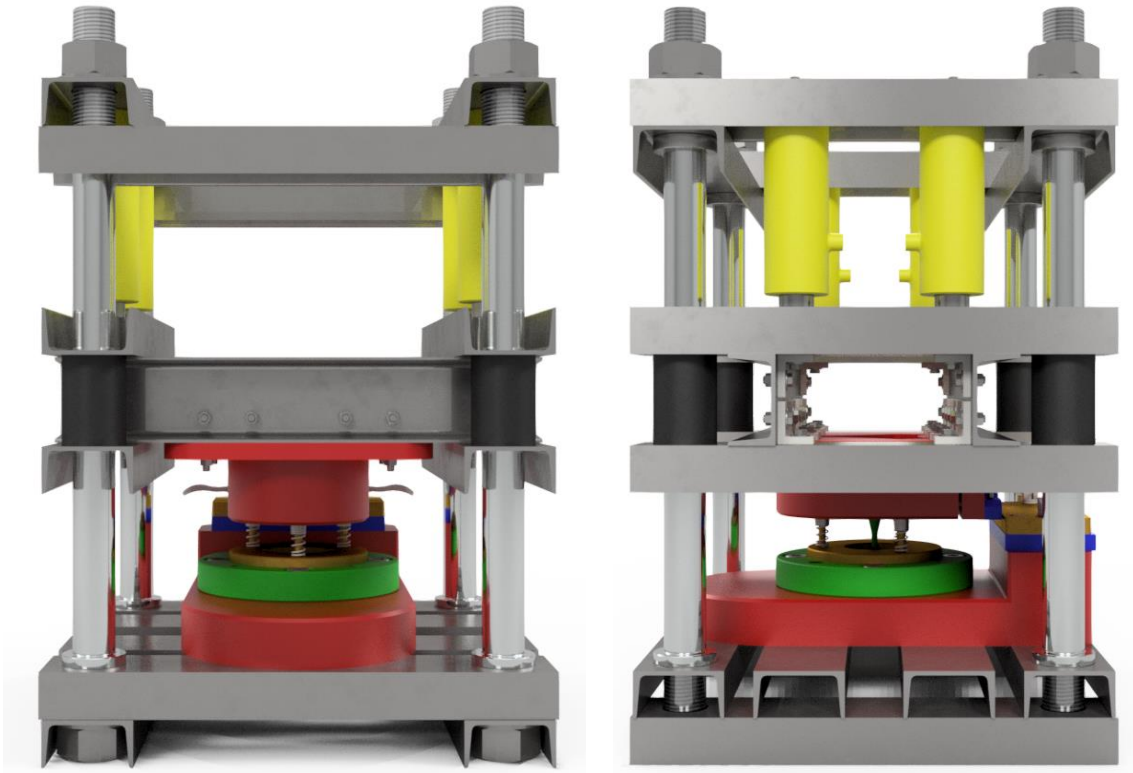
Ve střížné části lze také vytvářet oba typy požadovaných polotovarů, tedy pro tahovou zkoušku i pro Diabolo test (viz Obrázek 27). V této části přípravku lze v rámci nastavení parametrů měnit také rychlost stříhu a střížnou sílu, taktéž díky hydraulickým válcům. Střížnou vůli lze měnit pomocí vodících kolíků a centrálního šroubu, přes otočný čep pak podélný sklon ostří obou střížníků. Díky oválným drážkám v přídržovači lze ustavovat jeho polohu vůči střížnici a pomocí dvojice excentrických pák i přídržovací sílu.



Obrázek 27 – Náhled uložení nástrojů pro stříh
(a) Diabolo test, (b) tahová zkouška

Rám přípravku je šroubovaný z U-nosníků $125 \times 65 \times 6 \times 8$ mm, složený dohromady ze tří traverz. Spodní traverza je tvořena dvěma podélníky, na kterých jsou příčně uloženy čtyři příčníky. V rozích jsou tyto podélníky a příčníky spojeny pomocí závitů na čtyřech vodících sloupech a sevřeny mezi osazením a maticí $M60 \times 5,5$. Na příčnicích je přišroubována pevná část přípravku – upínací deska střížnic. Prostřední traverza je jako jediná pohyblivá ve vertikální ose, což umožňuje čtveřice lineárních valivých ložisek, umístěných na vodících sloupech, které jsou sevřeny mezi dvěma podélníky. Mezi těmito podélníky jsou napříč na výšku uloženy dva příčníky, ke kterým je přichycena pohyblivá část přípravku. Horní traverza je řešena obdobně jako spodní, jen příčníky jsou stejně jako podélníky pouze dva.

Pohon celého stroje zajišťují čtyři hydraulické válce, umístěné mezi horní a prostřední traverzou. Jsou opřeny o horní podélníky, kde jsou přichyceny šrouby, pístnicemi tlačí na pohyblivou traverzu, kde jsou taktéž přišroubovány (viz Obrázek 28). Maximální síla, kterou jsou hydraulické válce schopny vyvodit, je dostatečná jak na stříh, tak i na zvednutí pohyblivé traverzy a jeho případné vyproštění z prostříženého polotovaru. Jako zdroj hydraulického tlaku bude připojena externí jednotka.



Obrázek 28 – Náhled konečné sestavy stroje

3.7 Seznam součástí

Společné součásti přípravku:

- Spodní pevné upínací těleso nástrojů
- Horní pohyblivé upínací těleso nástrojů
- Upínací deska pro pohyblivé těleso

Součásti přípravku pro prostřih:

- Střížnice pro Nakajima test 40
- Střížnice pro Nakajima test 70 + střížnice pro obě varianty Hole expansion test
- Střížníky pro Nakajima test 40
- Střížníky pro Nakajima test 70
- Střížník pro Hole expansion test
- Přidržovač pro Nakajima test + Hole expansion 199
- Přidržovač pro Hole expansion test 128
- Závitová pouzdra
- Pružiny

Součásti přípravku pro stříh:

- Držák střížníků pro Diabolo test a tahovou zkoušku
- Střížník pro Diabolo test
- Střížník pro tahovou zkoušku
- Střížnice pro Diabolo test + střížnice pro tahovou zkoušku
- Přidržovač pro Diabolo test + přidržovač pro tahovou zkoušku
- Excentrické páky

Součásti rámu:

- U-nosníky $125 \times 65 \times 6 \times 8$ mm s průchody pro sloupy
- U-nosníky $125 \times 65 \times 6 \times 8$ mm bez průchodů pro sloupy
- Vodicí sloupy
- Závitové opěrné podložky
- Lineární valivá ložiska
- L-úhelníky

Normalizované (nakupované) součásti:

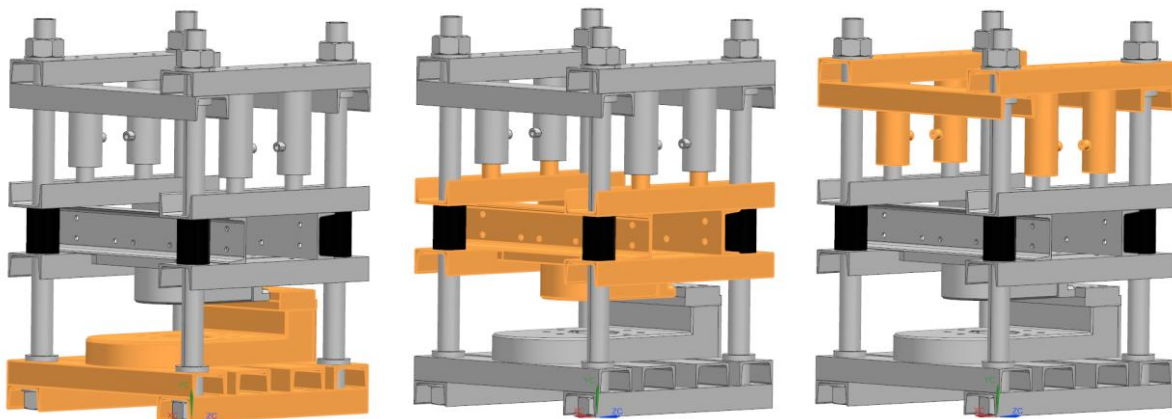
- Šrouby
- Matice
- Podložky
- Hydraulické válce

3.8 MKP Analýza

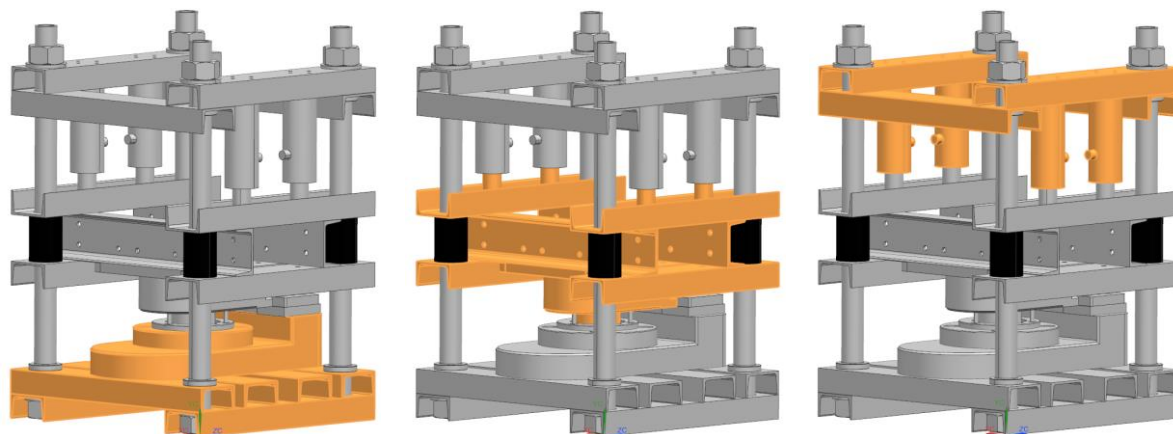
Jelikož je přípravek určen ke stříhu součástí, musí být schopen vyvodit dostatečně velkou sílu k porušení stříhaných ploch. K překonání střížného odporu, vyvolaného samotným materiálem podle jeho materiálových parametrů je potřeba vyvodit dostatečně velkou střížnou sílu.

Přípravek je osazen čtveřicí hydraulických válců. Které jsou schopny vyvolat několikanásobně vyšší sílu, než je potřebná střížná síla. Střížná síla byla analyticky stanovena na 139 200 N. Při samotném procesu stříhu a překonání odporu materiálu je celá konstrukce přípravku namáhána kombinovaným zatížením. Pro přibližné stanovení chování rámu a jednotlivých parametrů jsem provedl pevnostní analýzu metodou konečných prvků, pomocí softwaru Siemens NX.

Z důvodu větší excentricity u stříhu jsem simulaci provedl zvlášť pro zatíženou část prostříhu a zvlášť pro zatíženou část stříhu. Simulace jsem prováděl tak, že jsem nejprve ze soustavy odebral součásti, které by nijak zásadně neovlivnily výslednou deformaci, nebo průběh napětí (např. šrouby, L-úhelníky atd.). Následně jsem sestavu zjednodušil ve smyslu další redukce součástí tím, že jsem spojil tělesa na úrovni modelu do větších objemových celků. Výsledkem byli tři hlavní uzly podle jednotlivých traverz sestavy a čtyři vodicí sloupy (viz Obrázek 29 a Obrázek 30).



Obrázek 29 – Náhled sloučených součástí pro simulaci stříhu

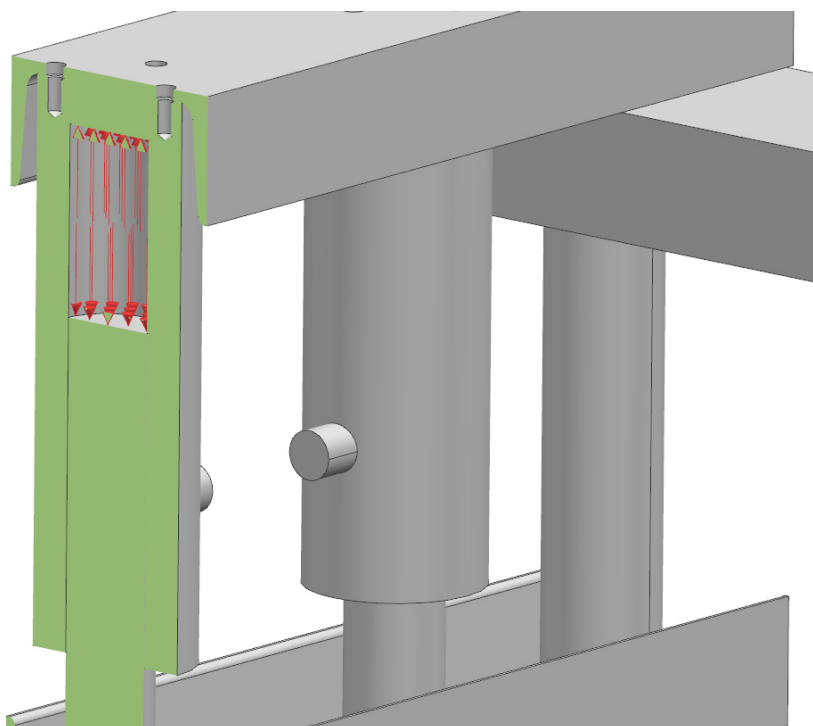


Obrázek 30 – Náhled sloučených součástí pro simulaci prostřihu

Takto zjednodušenou sestavu již bylo možné nasít'ovat elementy s meziuzly CTETRA (10) a opatřit ji jednotlivými okrajovými podmínkami. V obou případech jsem postupoval stejně, spodní čelní plochy vodících sloupů jsem zabezpečil proti pohybu do jednotlivých směrů tak, aby úloha byla staticky určitá.

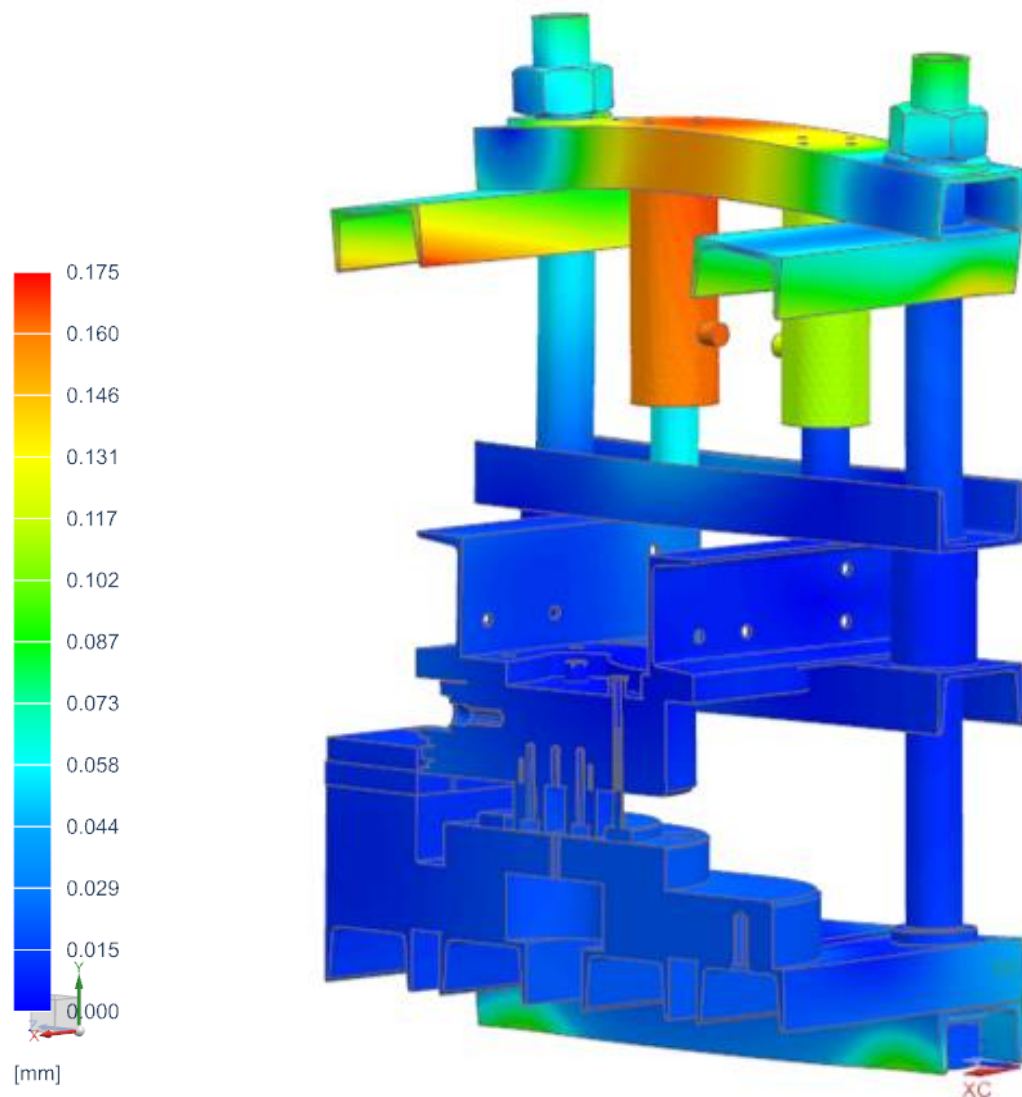
Zatížení modelu jsem provedl silou v každém z hydraulických válců. Sílu jsem rozdělil počtem válců, tedy v každém válci působí síla 34 800 N, a její působení jsem v každém hydraulickém válci volil dvakrát, na čelní plochu pístnice a na dno hydraulického válce (viz Obrázek 31).

V modelu jsem dále uvažoval předpětí sloupů v oblastech uložení spodní a horní traverzy. Toto předpětí jsem realizoval pomocí funkce offset, mezi horními a dolními maticemi $M60 \times 5,5$ a jejich podložkami, umístěnými pod nimi. Hodnota offsetu, která byla stanovena na 0,027 mm, vychází z diagramu předepnutého šroubového spoje.



Obrázek 31 – Znázornění zatížení sestavy v prostředí Siemens NX

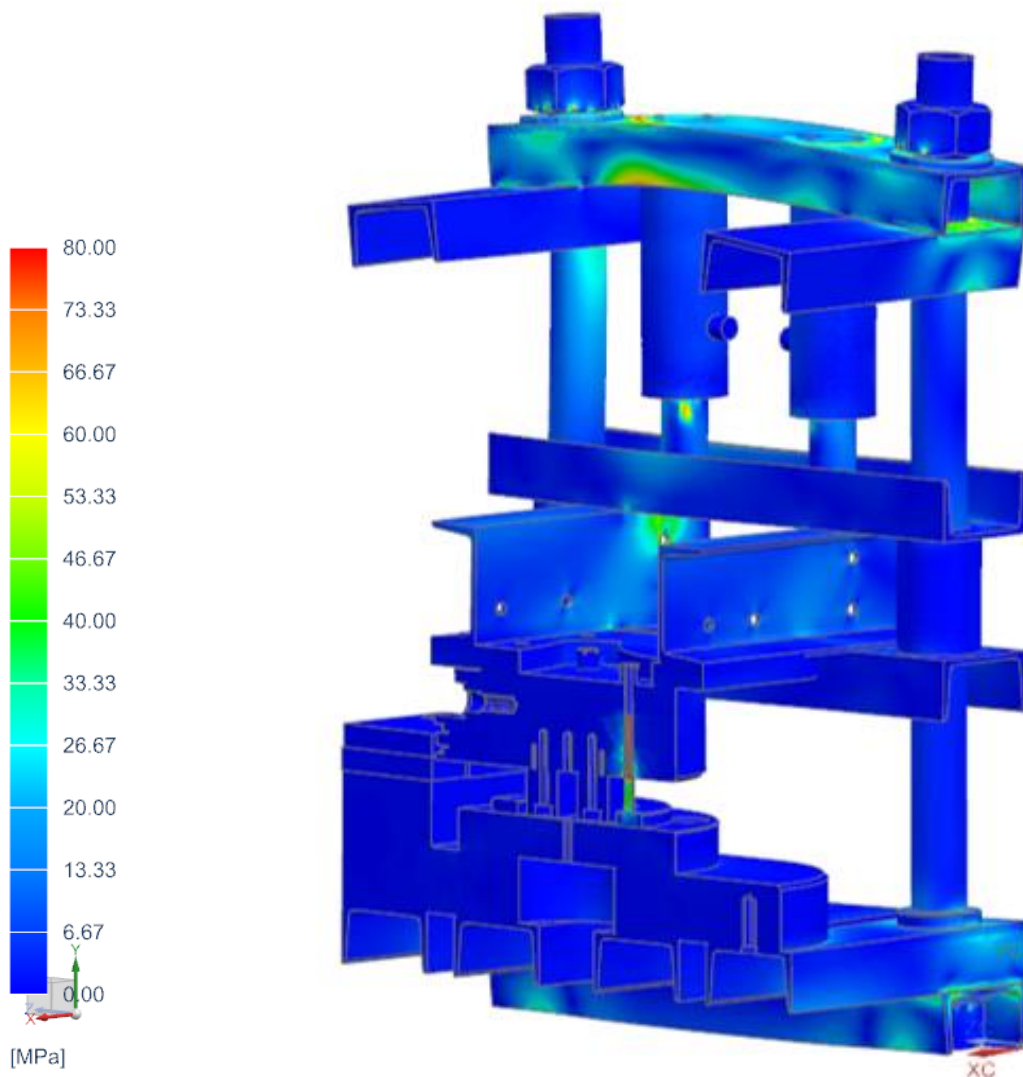
3.8.1 Simulace přípravku s nástroji pro prostřih



Obrázek 32 – Přípravek s nástroji pro prostřih (poloviční řez) – posunutí ve všech směrech

Ze simulace přípravku s nástroji pro prostřih je z hlediska posunutí zřejmé, že přípravek se nedeformuje natolik zásadně, by mohla změna geometrie ovlivnit proces stříhu, nebo samotný výsledek. Největší posunutí se vyskytuje na horním podélníku, od jednoho z hydraulických válců, tato deformace však dosahuje pouze cca 0,17 mm. Další oblast s velkou deformací se nalézá na jednom z horních příčníků, na tuto oblast, ale není třeba brát větší zřetel, jelikož vzhledem k povaze zatížení a spojení rámu je jasné, že se zde reálně žádná deformace neobjeví.

Naopak v oblasti uložení nástrojů, nebo v samotných nástrojích se téměř žádná deformace neobjevuje, což zajišťuje vysokou přesnost realizovaného stříhu. Další deformace se projevuje buď v horních částech sloupů, nebo ve spodních podélnících v oblasti uložení sloupů. Tyto posunutí se pohybují kolem hodnoty 0,1 mm. Kromě horní traverzy, sloupů v jejich horní části a spodních podélníků se tedy už téměř žádné posunutí v prostřihovací části neobjevuje (viz Obrázek 32).

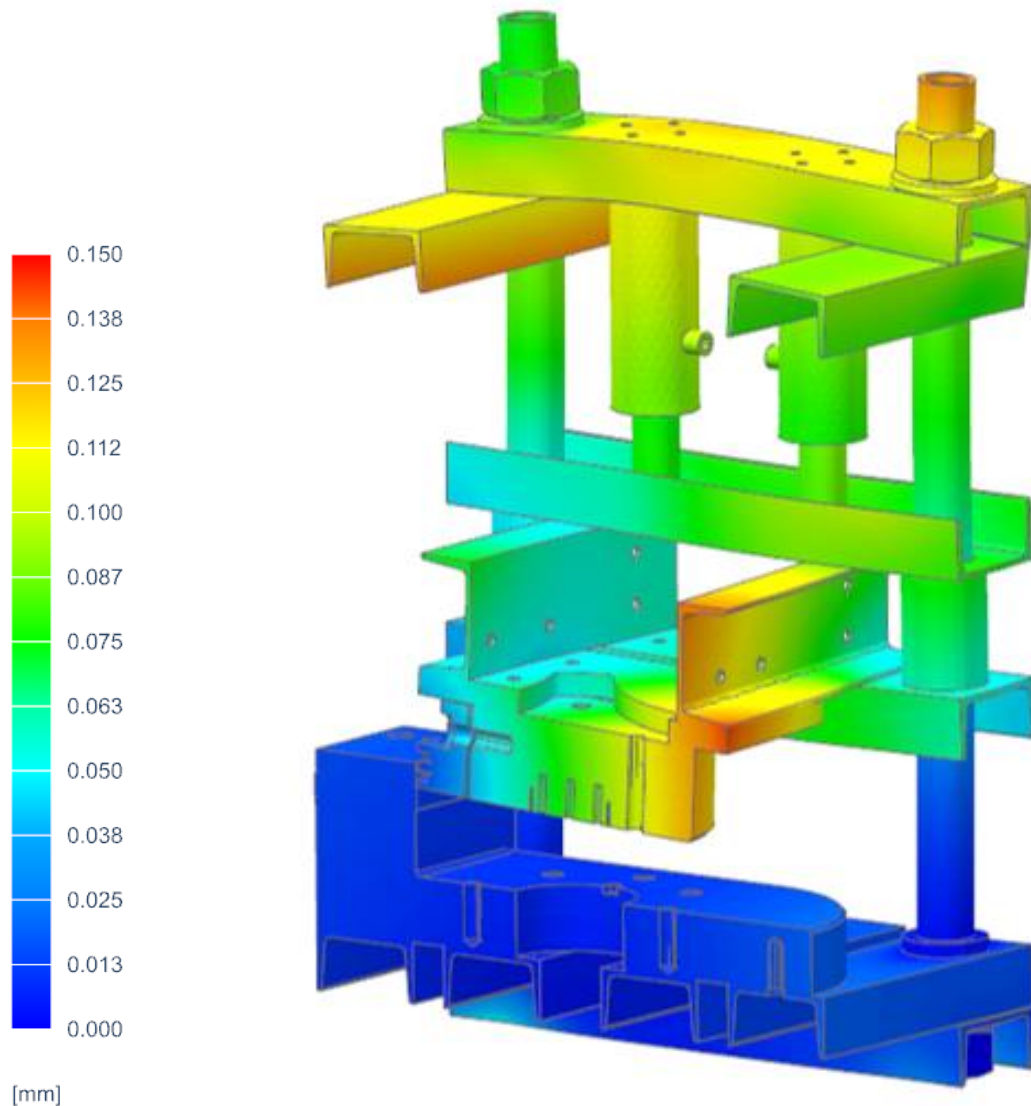


Obrázek 33 – Přípravek s nástroji pro prostřih (poloviční řez) – redukované napětí von Mises

Obdobné výsledky lze najít v simulaci přípravku z hlediska redukovaného napětí, podle hypotézy von Mises. Při podrobnějším prozkoumání jsou vidět oblasti s největším napětím mezi 50 až 75 MPa. Lokálně se objevují místa s napětím vyšším než 75 MPa, například v místě styku hydraulického válce a horního podélníku.

Dále se v modelu vyskytují napěťové špičky, které jsou ovlivněny okrajovými podmínkami a je možné je zanedbat (viz Obrázek 33).

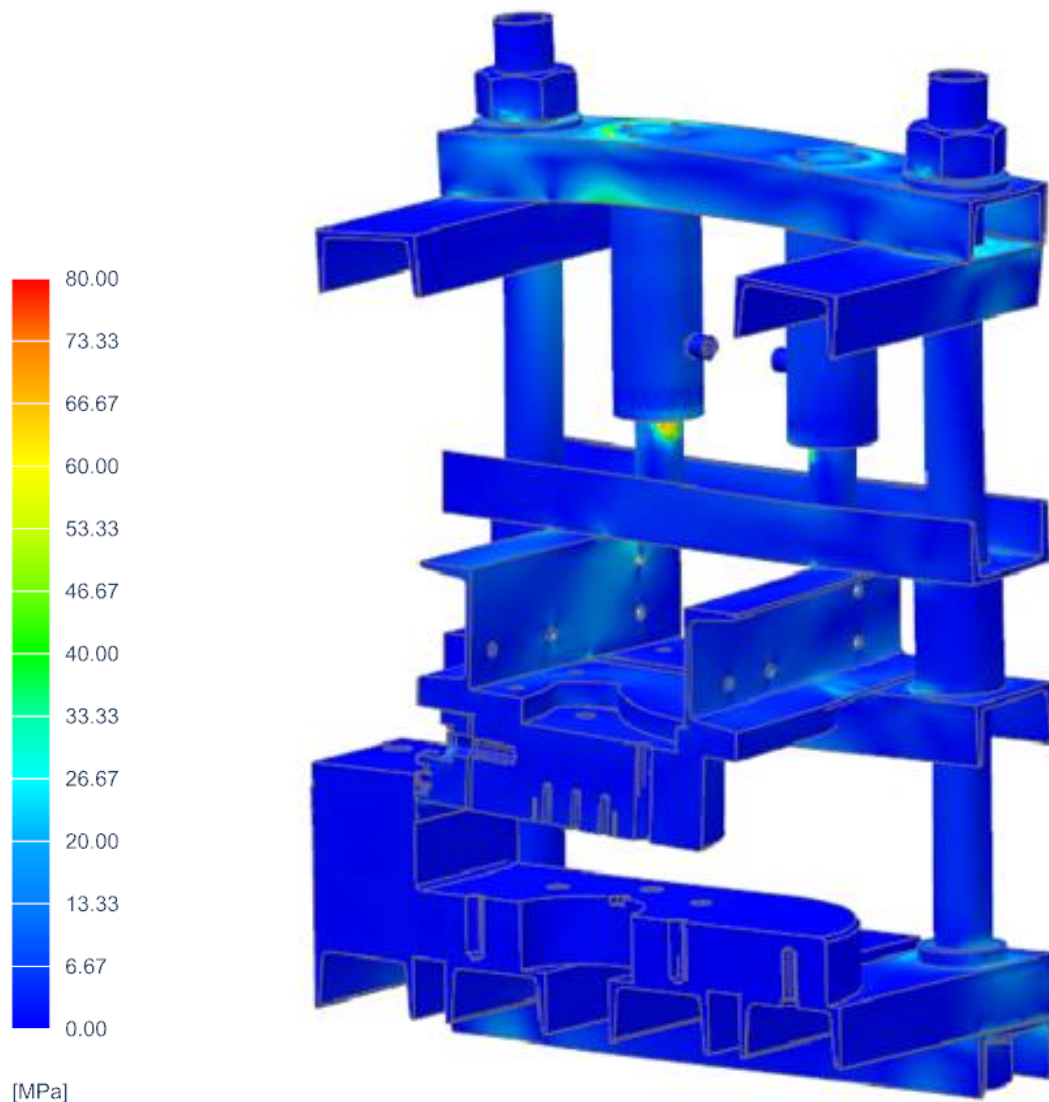
3.8.2 Simulace přípravku s nástroji pro stříh



Obrázek 34 – Přípravek s nástroji pro stříh (poloviční řez) – posunutí ve všech směrech

V simulaci přípravku s nástroji pro stříh je taktéž vidět, že hodnoty posunutí nedosahují vysokých hodnot. Oblast s největším posunutím je uprostřed svisle orientovaného příčnicku, který je vzdálenější od místa stříhu. Z důvodu velkého vyložení je nosník více namáhán, a jeho průhyb v nejhorším místě činí přibližně 0,15 mm. Další významná oblast se nachází opět na horním podélníku, který je namáhán od hydraulických válců. Zde však hodnoty posunutí dosahují přibližně 0,12 mm.

Soustava v tomto případě nedosahuje takových extrémů jako předchozí varianta, a hodnoty deformace jsou zde nižší. Je však zřejmé, že se deformuje na větší části konstrukce. Opět zde můžeme vidět deformaci horních příčníků, která je způsobená zjednodušeným výpočtovým modelem (viz Obrázek 34).



Obrázek 35 – Přípravek s nástroji pro stříh (poloviční řez) – redukované napětí von Mises

V případě simulace přípravku pro stříh z hlediska redukovaného napětí jsou výsledky velmi podobné simulaci přípravku pro prostříh. Největší výkyvy hodnot lze zaznamenat opět v horních podélnících, v oblastech spojení hydraulických válců s těmito podélníky. Zde napětí dosahuje hodnot kolem 46 MPa.

Kromě horních nosníků se objevují zvýšené hodnoty na površích pístnic hydraulických válců, zde hodnoty dosahují kolem 56 MPa. Dále se objevuje zvýšené napětí na místech jako jsou styčné plochy vodících sloupů a jednotlivých nosníků, zde však ale nejsou hodnoty napětí příliš významné (viz Obrázek 35).

3.8.3 Shrnutí analýzy

Pevnostní analýzu sestavy přípravku jsem prováděl ve dvou variantách, zvláště pro zatížení prostřihovací část a zvláště pro část stříhu. U obou variant jsem vyhodnocoval posunutí a redukované napětí podle hypotézy von Mises.

Z jednotlivých hodnot posunutí a napětí, které dosahují v obou případech maximálně 0,18 mm a 80 MPa, pro obě varianty vyplývá, že na stroji bude možné provádět potřebné technologické operace. Tyto operace lze provádět bez trvalé změny jeho geometrie, nebo dokonce poškození samotného přípravku, nebo jeho rámu.

Na přípravku není plánováno vytvářet velký počet jednotlivých polotovarů. Bude sloužit spíše ke kusové výrobě, z toho důvodu není třeba konstrukci dimenzovat proti dynamickému cyklickému zatížení.

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout přípravek přesného stříhu, s vlastním samostatným rámem, na kterém by bylo možné vytvářet vzorky pro následné mechanické zkoušky. Přípravek byl navržen pro společnost COMTES FHT a.s., která bude díky přípravku schopna vyrábět si vlastní vzorky pro mechanické zkoušky a posuzovat tak vlastnosti materiálů.

Na vzorcích budou následně prováděny zkoušky Nakajima test, Hole expansion test, Diabolo test a tahová zkouška. Všechny tyto zkoušky jsou destruktivní a jsou tahového charakteru. Zkoušky probíhají až do chvíle vzniku trhliny na stříhaných okrajích vzorků. Na průběh a výsledky zkoušek má zásadní vliv kvalita těchto stříhaných hran. Na kvalitu těchto hran mají naopak přímý vliv jednotlivé technologické parametry stříhu, jako jsou např. střížná vůle, přidržovací vůle, velikost střížné síly, velikost přidržovací síly a rychlost stříhu, nebo nastavení sklonu ostří střížných nástrojů. Z toho důvodu musel být přípravek navržen tak, aby bylo možné tyto parametry nastavovat a libovolně samostatně měnit.

Celý přípravek jsem navrhl tak, aby bylo možné upravovat co nejvíce technologických parametrů, u co největšího počtu stříhaných polotovarů. Samotný přípravek jsem rozdělil na dvě samostatné části, kde bude zvlášť prováděn stříh materiálu a zvlášť prostříh materiálu. Přípravek je navržen jako dvě tělesa, umístěná proti sobě, na kterých jsou uloženy nástroje. Na spodním pevném tělese jsou uloženy střížnice, zatímco na horním pohyblivém tělese jsou uloženy střížníky. U stříhu se mi podařilo vyřešit nastavení všech potřebných parametrů, včetně nastavení parametrů přidržovače. U prostříhu vzhledem k technologii není možné realizovat nastavení střížné vůle jinak než výměnou nástrojů. Ostatní parametry je však možno upravovat libovolně (v mezích stroje).

Přípravek stříhu a prostříhu je uložen v samostatně navrženém rámu, který je řešen jako šroubovaná konstrukce z U-nosníků, silnostěnných trubek s osazením jako vodících sloupů a z unášecí desky, na které je připevněno pohyblivé upínací těleso nástrojů. Rám je rozdělen na tři traverzy, z nichž jsou horní a spodní traverzy pevné a prostřední traverza vertikálně posuvná pomocí lineárních valivých ložisek na vodících sloupech. Rám je snadno sestavitelný a smontovatelný pomocí šroubových spojů, případně L-úhelníků.

Vlivem vzniku napjatosti v celém stroji od střížného odporu bylo nutné jej zkontrolovat z pevnostního hlediska. To jsem realizoval pomocí MKP analýzy prostřednictvím softwaru Siemens NX. Simulace jsem prováděl na dvou výpočtových modelech, které představovali samostatné zatížení od stříhu a od prostříhu. Sledovanými parametry byly posunutí a redukované napětí dle hypotézy von Mises. Obě varianty měly velice podobné výsledky, přičemž model stříhu je vykazoval nepatrně lepší – redukované napětí zde dosahovalo maximální hodnoty přibližně 75 MPa a posunutí maximálních hodnot přibližně 0,17 mm. Vzhledem k těmto výsledkům jsem usoudil, že konstrukce stroje není z pevnostního hlediska nijak ohrožena, a při úvaze, že stroj vyrobí jen několik jednotek kusů vzorků, není třeba brát v úvahu ani dynamické zatížení konstrukce a její cyklické namáhání.

Navržené konstrukční řešení vyhovuje všem požadavkům, jak zadaných společností COMTES FHT a. s., tak požadavkům na výrobu, smontovatelnost a funkčnost. Výkresová dokumentace se nachází v příloze této práce.

5 Použitá literatura

- [1] ŽÁK, Ondřej. *Výroba plechové součásti stříháním* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10787.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. EVA Šmehlíková, Ph.D.
- [2] Technologie plošného tváření – stříhání. *Katedra strojírenské technologie: Technologie II* [online]. Liberec: TUL Liberec, 2018 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm
- [3] SPURNÝ, Petr. *Technologie plošného tváření v hromadné výrobě* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5326.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
- [4] VÁVRŮ, Roman. *Konstrukce postupového střížného nástroje* [online]. Liberec, 2009 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2757/bc_17249.pdf?sequence=.
Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Zelený, Ph.D.
- [5] TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ KOVŮ. *Katedra vozidel a motorů: Fakulta strojí Technická univerzita v Liberci* [online]. Liberec: CLICQUO, 2022, 2010 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886>
- [6] Naklánění materiálu při stříhání. In: *ELUC: Stříhání kovů* [online]. Olomouc: MŠMT [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1865>
- [7] FEISTLE, Martin, Roland GOLLE a Wolfram VOLK. Edge crack test methods for AHSS steel grades: A review and comparisons. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2022, **302** [cit. 2022-05-24]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117488
- [8] KŘÍŽ, Tomáš. *Vliv způsobu přípravy zkušební vzorku na deformace zjišťované systémem Aramis* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84821/F2-BP-2019-Kriz-Tomas-BP_Tomas_Kriz_KOMPLETNI.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. František Tatiček Ph.D.
- [9] Zkouška tahem. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tahem
- [10] ČSN EN ISO 6892. *Kovové materiály – Zkoušení tahem: Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 1/21. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [11] Proč zkoušíme základní mechanické vlastnosti. *Přírodovědecká fakulta: Katedra fyziky* [online]. Ústí nad Labem: UJEP, 2022 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~mkormund/P232/Vlastnosti_zkousky.pdf

- [12] Různé tvary zkušebních těles. In: *Publi: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Code Creator, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [13] Základy materiálového inženýrství: Základní pojmy. *Katedra materiálu* [online]. Liberec: TUL Liberec, 2010, 2010 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/01zakpojzmi.pdf
- [14] Smluvní diagram pro nízkolegovanou uhlíkovou ocel. In: *MATCA: Zkouška tahem* [online]. Praha: Technologickou agenturou České republiky, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [15] ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály – Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy: Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři*. 10.2021. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [16] RUBEŠOVÁ, Kateřina, Martin RUND, Sylwia RZEPA, Hana JIRKOVÁ, Štěpán JENÍČEK, Miroslav URBÁNEK, Ludmila KUČEROVÁ a Pavel KONOPÍK. Determining Forming Limit Diagrams Using Sub-Sized Specimen Geometry and Comparing FLD Evaluation Methods. *Metals* [online]. 2021, **11**(3) [cit. 2022-05-24]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met11030484
- [17] KLAWONN, Axel, Martin LANSER, Oliver RHEINBACH a Matthias URAN. Fully-coupled micro–macro finite element simulations of the Nakajima test using parallel computational homogenization. *Computational Mechanics* [online]. 2021, **68**(5), 1153-1178 [cit. 2022-05-24]. ISSN 0178-7675. Dostupné z: doi:10.1007/s00466-021-02063-9
- [18] JURČIŠIN, Miroslav. Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2022, 10. 09. 2015 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci>
- [19] ČSN ISO 16630. *Kovové materiály – Plechy a pásy: Zkouška rozšiřováním otvoru*. 6/18. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [20] High Hole Expansion Steel Market to Witness Robust Expansion by 2024. In: *OpenPR: Worldwide Public Relations* [online]. openPR, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.openpr.com/news/1852871/high-hole-expansion-steel-market-to-witness-robust-expansion>
- [21] Kovové materiály automobilových konstrukcí - II Karoséria a karosářenské plechy. *Informácie o materiáloch a strojárskych technológiach* [online]. 2012 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii
- [22] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Průručka strojního inženýra: obecné strojní části*. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3
- [23] RUDOLF, B. *Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce: vysokoškolská učebnice*. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [24] Lineární kuličková ložiska – LBCR: uzavřené provedení. *ARKOV* [online]. Slatiňany, 2021 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: [https://www.arkov.cz/getattachment/5b054537-d846-40ed-8602-58c9a307153c/Linearni-loziska-a-jednotky-SKF-\(CZ\)](https://www.arkov.cz/getattachment/5b054537-d846-40ed-8602-58c9a307153c/Linearni-loziska-a-jednotky-SKF-(CZ))

- [25] Hydraulický válec dvojitý univerzální, nosnost 10 tun - HHYG-10250S. *MojeDilna.cz* [online]. AMNproTrade, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.mojedilna.cz/hydraulicky-valec-dvojitny-univerzalni-nosnost-10-tun-hhyg-10250s>
- [26] EXCENTRICKÉ PÁKY NASTAVITELNÉ NEREZOVÉ S VNĚJŠÍM ZÁVITEM. *MAREK: industrial a.s.* [online]. MARF reklamní agentura, 2022 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/kipp-mechanicke-komponenty/ovladaci-prvky-normovane-dily/sveraci-upinaci-a-excentricke-paky/excentricke-paky/22605/excentricke-paky-nastavitelne-nerazove-s-vnejsim-zavitem.html?379=50&669983=M10>
- [27] VÁLCE: Vysokotonážní válce. *Carl Stahl & spol, s.r.o.: Všeobecný katalog pro hydraulické systémy* [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://www.carlstahl-zvedacitechnika.cz/downloads/katalog_Carl_Stahl_Hi-Force_2019_web.pdf

6 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 – Schématické znázornění technologie stříhání [4]	11
Obrázek 2 – Fáze stříhání [2]	11
Obrázek 3 – Stříhání rovnoběžnými noži; 1 – střížník, 2 – střížnice, 3 – přidržovač, 4 – stříhaný materiál [2].....	12
Obrázek 4 – Příklad překlápění stříhaného materiálu bez použití přidržovače [6]	12
Obrázek 5 – Stříhání šikmým nožem 1 – střížník, 2 – střížnice, 3 – stříhaný materiál [2].....	13
Obrázek 6 – Stříhání s přidržovačem [2]	14
Obrázek 7 – Schéma navrhování součásti podle materiálových zkoušek [7]	14
Obrázek 8 – Náhled vzorků pro tahovou zkoušku [12]	15
Obrázek 9 – Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení [14]	16
Obrázek 10 – Náhled vzorků pro Nakajima test [16].....	16
Obrázek 11 – Náhled průběhu zkoušky Nakajima test [17].....	17
Obrázek 12 – Schéma průběhu zkoušky Hole expansion test včetně DIC měření [7].....	17
Obrázek 13 – Vzorek zkoušky Hole expansion test (vlevo) [20], diagram hlavních deformací (vpravo) [7]	18
Obrázek 14 – Schéma průběhu zkoušky Diabolo test včetně DIC měření [7].....	18
Obrázek 15 – Diabolo tažník (vlevo), diagram hlavních deformací (vpravo) [7].....	19
Obrázek 16 – Náhled tvarů stříhu v jednotlivých polotovarech [archiv COMTES – upraveno]	22
Obrázek 17 – Schématické znázornění střížníku pro Diabolo test.....	25
Obrázek 18 – Schématické znázornění přidržovačů pro Hole expansion 108 (výše) a Hole expansion 128 a Nakajima test (níže).....	26
Obrázek 19 – Schématické znázornění přidržovače pro stříh	27
Obrázek 20 – Náhled průřezu U-nosníku.....	27
Obrázek 21 – Schématické znázornění celého stroje: zelená – horní traverza, modrá – pohyblivá traverza, hnědá – spodní traverza, červená – upínací tělesa, žlutá – hydraulické válce, šedá – lineární valivá ložiska	28
Obrázek 22 – Schéma uložení střížníku pro Diabolo test a Tahovou zkoušku.....	30
Obrázek 23 – Náhled kombinované střížnice Nakajima 70 a Hole expansion (a) Hole expansion test 108, (b) Hole expansion test 128, (c) řez střížnicí	31
Obrázek 24 – Schéma střížnice a přidržovače u stříhu	31
Obrázek 25 – Schéma rámu s horním uložením hydraulických válců.....	32
Obrázek 26 – Náhled uložení nástrojů pro prostříh (a) Nakajima 70, (b) Nakajima 40, (c) Hole expansion	33

Obrázek 27 – Náhled uložení nástrojů pro stříh (a) Diabolo test, (b) tahová zkouška.....	34
Obrázek 28 – Náhled konečné sestavy stroje.....	35
Obrázek 29 – Náhled sloučených součástí pro simulaci stříhu.....	36
Obrázek 30 – Náhled sloučených součástí pro simulaci prostříhu.....	37
Obrázek 31 – Znázornění zatížení sestavy v prostředí Siemens NX.....	37
Obrázek 32 – Přípravek s nástroji pro prostříh (poloviční řez) – posunutí ve všech směrech.....	38
Obrázek 33 – Přípravek s nástroji pro prostříh (poloviční řez) – redukované napětí von Mises.....	39
Obrázek 34 – Přípravek s nástroji pro stříh (poloviční řez) – posunutí ve všech směrech.....	40
Obrázek 35 – Přípravek s nástroji pro stříh (poloviční řez) – redukované napětí von Mises.....	41
Tabulka 1 – Přehled velikostí polotovarů a nástrojů pro prostříh, v závislosti na mech. zkouškách.....	21
Tabulka 2 – Přehled šířek polotovarů a nástrojů pro stříh, v závislosti na mech. zkouškách.....	21
Tabulka 3 – Variantní řešení a výběr vhodné varianty (červené ohraničení).....	29

7 Seznam příloh

Výkres sestavy:

DP01 – Přípravek přesného stříhu

Výrobní výkresy výchozích polotovarů:

40 – vzorek Nakajima 40

70 – vzorek Nakajima 70

C-000-NAKHOLEXP-100 – vzorek Hole expansion 128

C-000-NAKNOR-100 – vzorek Hole expansion 199

C-000-NAKDIAB-100 – vzorek Diabolo

C-000-TH-003 – vzorek tahová zkouška