

Analýza konstrukce a návrh úpravy stříhacího nástroje pro výrobu motocyklového řetězu.

Bc. Vladimír Hoštička

Vedoucí práce: Ing. František Lopot Ph.D.

Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukčním návrhem úpravy stříhacího nástroje. Stříhací nástroj slouží k výrobě destiček motocyklového řetězu. V první části práce jsou k návržení úprav použity konvenční způsoby navrhování. Jde o ukázkou toho, jak jednoduchými výpočty a drobnými úpravami lze dosáhnout požadovaných výsledků. V druhé části se práce zabývá přípravou experimentálního měření a následným návrhem konstrukčních úprav metodou konečných prvků. Projekt vznikl ve spolupráci s firmou ČZ Řetězy sídlící ve Strakonících.

Klíčová slova

Řetěz, experiment, přesnost, výroba, konstrukce, úprava

1. Úvod

Jedním ze základních parametrů hodnocení vyrobené strojní součásti je přesnost výroby. Každý rozměr má nějakou udávanou toleranci. Rozměry vyrobené součásti musí této toleranci vyhovovat. Pokud je tomu jinak, je nutné vyrobený kus prohlásit za nevyhovující a označit ho jako „zmetkový“ nebo provést další úpravu vyrobeného kusu. Hodnoty tolerancí a tolerančních polí jsou uvedeny ve strojnických tabulkách nebo se určují z praktických znalostí a zkušeností nebo experimentálních zkoušek. Pokud se jedná o pohyblivou součást s malými rozměry, tak potom jsou hodnoty tolerancí velmi malé. Svě o tom ví firma ČZ Řetězy sídlící ve Strakonících. Od roku 1928 se zde vyrábí válečkové řetězy pro nejrůznější aplikace a v dnešní době zásobuje svými výrobky několik výrobních komplexů po celém světě. Aby udrželi krok s konkurenčními výrobci řetězů, musejí neustále zlepšovat vlastnosti svých výrobků. Při výrobě válečkových řetězů je nejdůležitější přiblížit co nejvíce rozměry článků nominálním předepsaným hodnotám. Vedení společnosti se proto na nás obrátilo s prosbou o pomoc při zpřesňování již probíhající výroby válečkových řetězů.

2. Cíl práce

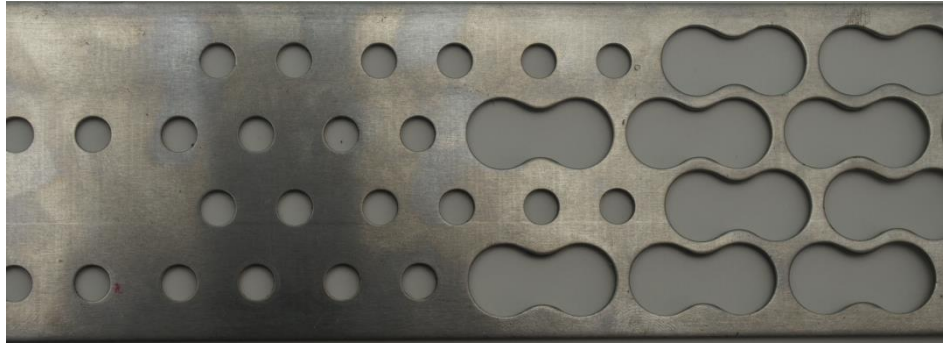
Naším úkolem je navrhnout konstrukční úpravy stříhacího nástroje. Úpravy mají za úkol zpřesnit výrobu válečkového řetězu pro motocykly, který rozměry odpovídá řetězu 10B. Přijatelné tolerance výroby rozteče otvorů vnitřních destiček válečkového řetězu jsou 0,02 mm.

3. Nástroj

Destičky válečkového řetězu se vyrábějí vystřížením z pásu plechu. K vystříhování je použitý výstředníkový lis Kaiser 100. Tento lis má pevný pracovní zdvih 34 mm. Stříhací zařízení je upevněno k lisu pomocí několika T-upínek a středícího trnu. Nástroj se skládá z mnoha dílů a většina je vyrobena obráběním z nástrojové ocele. Zařízení obsahuje dvě sady různých razníků. Razníky děr pro vystříhování vnitřních otvorů a razníky tvarů, které vystříhují vnější tvar. Razníky děr stávající konstrukce jsou vyrobeny z materiálu TK.

3.1 Princip

Zařízení pracuje na principu postupného stříhání. Jako polotovar je použit pás plechu o stejné tloušťce, jako z něj vyrobené destičky. Pruh plechu je veden z kola, na kterém je navinutý, přímo do nástroje. Podavač postupně posunuje plech do stříhacího nástroje o přesně zadanou vzdálenost. Princip postupného stříhání spočívá v tom, že jsou nejprve vystřiženy vnitřní otvory, pak se pás plechu posune a následně jsou vystřiženy vnější tvary. Část plechu, který zrovna procházel nástrojem je vidět na obrázku 1. Podobným principem jsou vytvářeny i vnější destičky válečkového řetězu. Na vnější destičky bývá často ještě vyraženo logo firmy a typ řetězu.



Obrázek 1: Postupné stříhání

3.2 Problémy

Při výrobě s tímto nástrojem a postupným stříháním se vyskytlo několik problémů. Nejzávažnějším problémem je přesnost výrobků. Hlavním rozměrem řetězu je rozteč (často bývá označována písmenem P) od které se odvíjejí ostatní vlastnosti a rozměry. Snahou je vyrobít řetěz s co nejpřesnější roztečí. Při současné výrobě sice nedochází k výrobě zmetků, protože tolerance rozměru je dostatečná, ale pro budoucí vývoj poptávky by už tento systém výroby byl nedostačující.

Dalším nežádoucím jevem, co se objevil při výrobě, je vibrační koroze. V místech, kde je nástroj uchycen k lisu, se objevilo typické červenohnědé zbarvení. K vibrační korozi může docházet v případech, kdy se dvě na sebe dosedající desky vůči sobě pohybují v důsledku pružných deformací. Samotná koroze není problémem, ale dává nám signál, že tuhost některých dílů je nevyhovující. Tuhost nástroje i lisu značně ovlivňuje výrobu a tedy i její přesnost. Na obrázku 2 je vidět výskyt zkorodovaných zrn materiálu.



Obrázek 2: Ukázka vibrační koroze na dílci nástroje

4. Řešení problémů

Řešení problémů je rozděleno do dvou částí. První část se zabývá rozбором konstrukce z hlediska konvenčního navrhování strojních součástí. Dílčím cílem bude navrhnout jednoduchá konstrukční opatření pro zlepšení vlastností nástroje. V části 4.3 Tuhostní analýza se budeme snažit upravit nástroj pomocí metody konečných prvků.

4.1 Analýza konstrukce

Základem této analýzy je vytipovat si část konstrukce, která může způsobovat nedostatky a provést její kontrolu. Lis, který je použit má pevný zdvih 34 mm. Na podobné aplikace se používají lisy s podstatně menším zdvihem. Pokud je zdvih větší jsou štíhlé části nástroje namáhány nejenom na tah a tlak ale i na vzpěr. První kontrola by měla ověřit, zda konstrukce razníku děr vyhovuje všem druhům namáhání.

4.1.1 Výpočet sil působících na razník děr

Na razník děr budou působit dvě síly. Obě budou působit ve směru osy razníku, ale jejich vzájemná orientace bude opačná. První a zároveň hlavní zatěžující síla způsobuje tlakové namáhání razníků, to je síla potřebná k prostřížení materiálu. Materiál, ze kterého se vyrábějí řetězové destičky, je ocel 15 142.

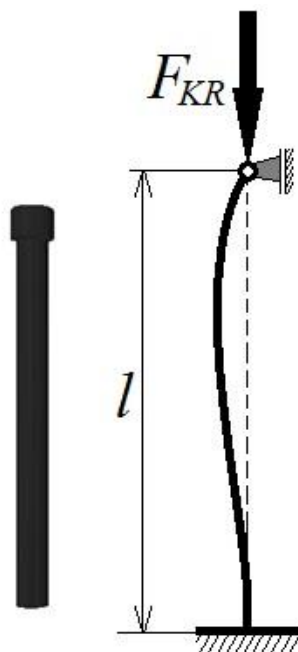
$$F_s = Rm_m \cdot S_t = Rm_m \cdot d \cdot \pi \cdot t = 880 \cdot 7,48 \cdot \pi \cdot 2,5 = 51,7 \text{ kN} \quad (1)$$

Druhá síla způsobuje tahové namáhání razníku a jedná se o sílu potřebnou k vytažení razníku z prostříhnutého otvoru. Vlivem elastických deformací se razník v prostříženém otvoru chová jako nalisovaný spoj a kontaktní tlak na plochách je přibližně roven mezi pevnosti stříhaného materiálu.

$$F_v = Rm_m \cdot S_t \cdot f_t = Rm_m \cdot d \cdot \pi \cdot t \cdot f = 880 \cdot 7,48 \cdot \pi \cdot 2,5 \cdot 0,11 = 5,69 \text{ kN} \quad (2)$$

4.1.2 Kontrola razníku děr na vzpěr

Konstrukční uložení razníku děr v rámu nám nejbližší popisuje III. tvar zjednodušení.



Obrázek 3: Výpočtové schéma razníku při kontrole na vzpěr

Razník je v okamžiku stříhání plechu částečně veden pouzdrem a jeho skutečná délka je zkrácena o délku pouzdra. Požadavkem je, aby nedocházelo k vzpříčení razníku v pouzdře a proto bude pro výpočet uvažována celá délka razníku $l = 90 \text{ mm}$.

$$J_{\min} = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi \cdot 7,48^4}{64} = 153,7 \text{ mm}^4 \quad (3)$$

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A_d}} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}} = \sqrt{\frac{153,7}{\frac{\pi \cdot 7,48^2}{4}}} = 1,87 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{l}{i_{\min}} = \frac{90}{1,87} = 48,2 \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{mez}} = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{3300}} = 35,44 \quad (6)$$

$\lambda > \lambda_{\text{mez}}$ -> Výpočet kritické síly dle Eulera

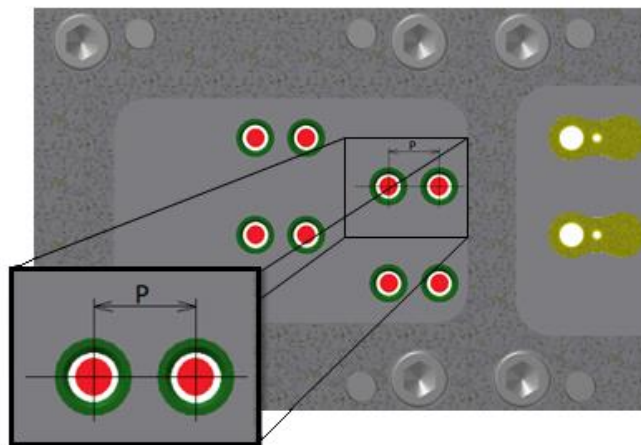
$$F_{KR} = n \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{l^2} = 2 \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 153,7}{90^2} = 78,64 \text{ kN} \quad (7)$$

$$k = \frac{F_{KR}}{F_s} = \frac{78,64}{51,7} = 1,52 \quad (8)$$

Minimální bezpečnost se kterou by se měli konstrukce s ohledem na vzpěr navrhovat je $k=3$ a více. Potvrdila se tedy předpověď a razník nemá navrženou vhodnou štíhlost.

4.1.3 Výpočet rozměrových obvodů

Aby se razníky mohly v pouzdrech pohybovat, nesmí plochy na sebe těsně doléhat a musí být zachována vůle. Velikost této vůle přímo ovlivňuje přesnost výroby. Pokud by vůle byla moc velká, neumožňovalo by pouzdro přesné vedení razníků, což by se projevilo přímo na vystřížených destičkách. Názorné zobrazení je na obrázku 4. Červený kruh představuje razník, zelené mezikruží nalisované vodící pouzdro a bílá plocha znázorňuje možnou vůli.

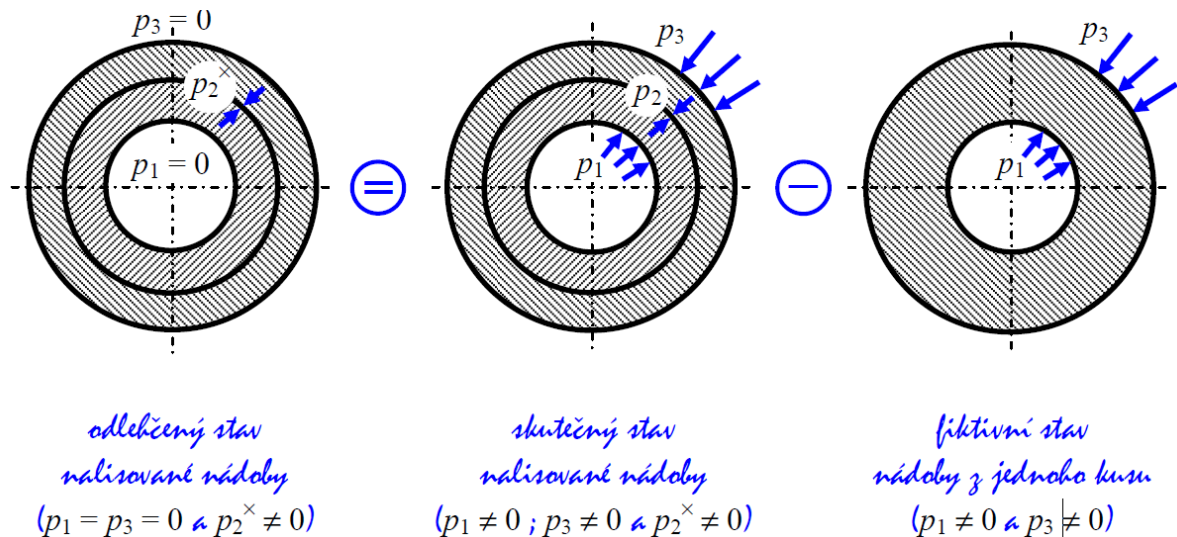


Obrázek 4: Znázornění vzniklé vůle mezi razníkem a vodícím pouzdrem

Dále je potřeba zjistit, zda i v nejméně přívětivém stavu konstrukce není vůle větší než polovina tolerance rozteče řetězu P. Za nejméně přívětivý stav konstrukce je považován největší možný otvor v pouzdře po nalisování a razník o nejmenším přijatelném průměru.

4.1.4 Výpočet skutečného průměru pouzdra po nalisování

Pro zjištění skutečného průměru pouzdra po nalisování je využita teorie silnostěnných (tlustostěnných) nádob, přesněji odlehčený stav nalisované nádoby. Vnitřní a vnější přetlak není uvažován a deformace pouzdra a okolního materiálu závisí pouze na kontaktním tlaku po nalisování p_2 . Při výpočtu kontaktního tlaku je důležité dodržet postup znázorněný na obrázku 5.



Obrázek 5: Postup výpočtu kontaktního tlaku odlehčeného stavu nalisovaných nádob [5]

Pro výpočet jsou uvažovány následující hodnoty:

$$p_1 = p_3 = 0,1 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

$$r_1^I = d_{p\max}/2 = 7,48H7_{\max}/2 = 3,746 \text{ mm} \quad (10)$$

$$r_2^I = D_{p\min}/2 = 12p6_{\min}/2 = 6,009 \text{ mm} \quad (11)$$

$$r_2^{II} = d_{d\max}/2 = 12H7_{\max}/2 = 6,0075 \text{ mm} \quad (12)$$

$$r_3^{II} = 15 \text{ mm} \quad (13)$$

Postup výpočtu tečných a radiálních napětí je přehledně popsán v [2] na straně 39-41. Ze získaných napětí je potřeba určit deformace jednotlivých částí nalisování.

$$\Delta r_2^I = \frac{r_2^I}{E} \left\{ \sigma_r(r_2^I) - \mu \cdot [\sigma_r(r_2^I)] \right\} \quad (14)$$

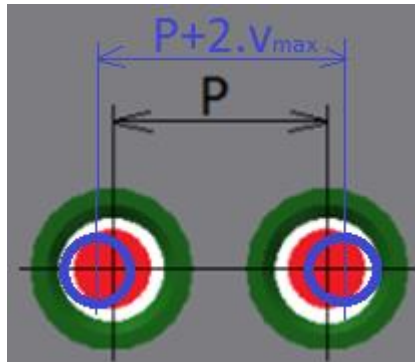
$$\Delta r_2^{II} = \frac{r_2^{II}}{E} \left\{ \sigma_r(r_2^{II}) - \mu \cdot [\sigma_r(r_2^{II})] \right\} \quad (15)$$

$$\Delta r_2^I + r_2^I = \Delta r_2^{II} + r_2^{II} \quad (16)$$

Pro splnění všech podmínek a rovnic byl při výpočtu metodou odhadu použit MS Excel. Byl zjištěn kontaktní tlak a vnitřní průměr pouzdra po nalisování do desky d_{p_nalis} .

4.1.5 Výpočet největší možné vůle uložení

Nevětší dovolená vůle uložení je vůle, která vznikne vložením nejmenšího razníku děr do největší možné díry v pouzdře po nalisování. Všechny díly jsou vyrobeny v mezích tolerance. Na obrázku 6. je znázorněno, jakým způsobem tato vůle ovlivňuje výrobu řetězových destiček. Stav při maximální vůli je naznačen modrou barvou.



Obrázek 6: Znázornění vlivu vůle na výrobu řetězových destiček

$$v_{\max} = d_{p_nalis} - d_{\min} \quad (17)$$

Velikost vůle vzniklá při nejméně příznivém stavu vyhovuje dovolené toleranci rozteče při stávající výrobě. Pokud má dojít ke snížení tolerance rozteče, bude tato vůle už nevyhovující.

4.1.6 Shrnutí

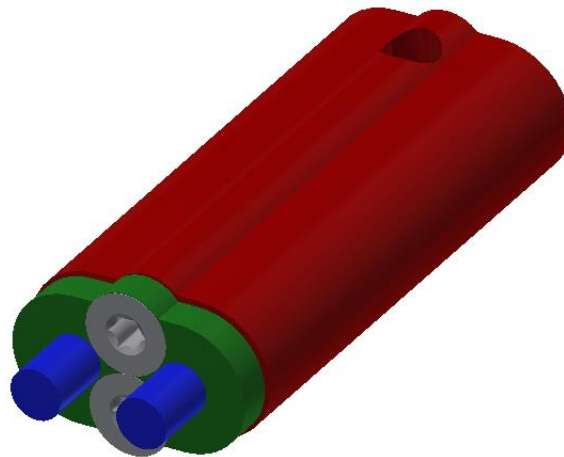
Při analýze konstrukce byly zjištěny slabiny jednotlivých dílců a je potřeba je odstranit. Velikost vůle by se dala ovlivnit zvolením jiných tolerančních polí a zpřesněním výroby. Problém je s tvarem razníku děr při tomto konstrukčním řešení. Konstrukce musí dovolovat posuv ve svislém směru 34mm a to nám neumožňuje razník zkrátit. Jeho průměr také nemůžeme měnit. Bude nutné navrhnout nové řešení tohoto konstrukčního uzlu.

4.2 Opatření vzhledem k analýze konstrukce

4.2.1 Návrh nového razníku děr

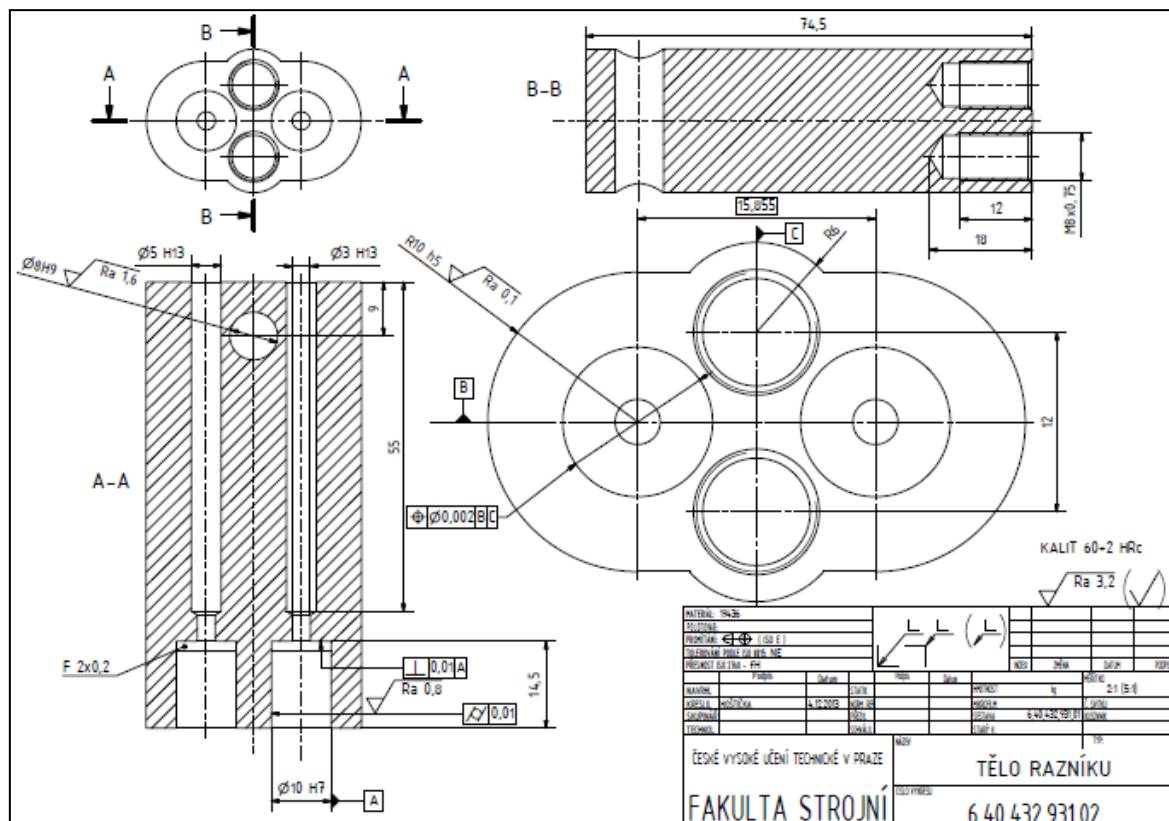
Nová konstrukce razníku děr, by měla mít vhodnější poměr délky a průměru a správnost její funkce musí být co nejméně závislá na přesnosti její vlastní výroby.

Možnost jak zajistit tyto požadavky je zvětšit průřez razníku a nahradit tedy dva tenké razníky jedním masivnějším. Tělo bude ve spodní části osazeno krátkými razníky o požadovaném průměru. Razníky budou zajištěny proti vytažení z těla razníku deskou a šroubovými spoji. Toto řešení úplně eliminuje problém s minimální vůlí pro pohyb razníku. Razník se bude pohybovat jako celek a nutné vůle se nepromítnou do rozteče vyrobených řetězových destiček.



Obrázek 7: Navržený nový tvar razníku děr

Kvůli novému tvaru se budou muset upravit i některé části stávající konstrukce. Vodící deska, kde byla dříve vodící pouzdra, bude muset být upravena pro tento tvar razníku a pouzdra budou odstraněna. Velkou úpravou tak musí projít horní deska, kde jsou razníky upevněny, aby s nimi bylo možné pohybovat.



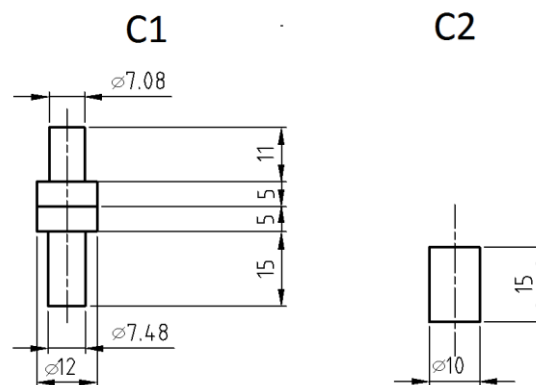
Obrázek 8: Výrobní výkres těla razníku

Nový tvar razníku děr byl také podroben kontrole na vzpěr. Bezpečnost konstrukce se pohybuje v hodnotách třicet a výše. Kontrola rozměrových obvodů nebylo nutné pro tuto konstrukci sestavovat, protože se vůbec nepromítne do přesnosti výroby. Na přesnost výroby bude mít přímý vliv přesnost výroby jednotlivých částí razníku. Novým prvkem konstrukce je šroubový spoj, který je nutno správně naddimenzovat.

4.2.2 Výpočet šroubového spoje

Šroubový spoj má za úkol zamezit razníkům, aby při vytahování z prostříženého plechu se uvolnili a oddělili se od těla razníku. Razníky budou v těle nalisovány, ale kvůli spolehlivosti konstrukce jsou uvažovány razníky jako volně vložené a že šrouby přenášejí celou sílu potřebnou na vytažení razníků. Jedná se o časově proměnné zatížení předepnutého šroubového spoje.

Při výpočtu je třeba určit náhradní schéma konstrukce a z něho určit tuhosti jednotlivých částí razníku. Náhradní schéma pro výpočet tuhosti je zobrazen na obrázku 9. Části zahrnuté do skupiny C1 jsou při působení zátěžné sekvence přitěžovány a skupina prvků C2 je zatížena hlavně předpětím spoje a při působení vnější síly je odlehčena.



Obrázek 9: Náhradní schéma pro výpočet tuhosti spoje

$$\frac{1}{C_i} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{E \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \right)} \quad (18)$$

$$C_1 = 370\,573,4 \text{ N/mm} \quad (19)$$

$$C_2 = 1\,099\,557,4 \text{ N/mm} \quad (20)$$

Dále je postupováno podle výpočtů na stranách 38 až 40 v [3]. Uvažujeme pevnostní šroub třídy 12.9 a závit M8x0,75. Velikost vnějšího zatížení spoje $F_h = 6 \text{ kN}$. K výpočtu byl použit MS Excel.

Navržený šroub vyhovuje kontrole s bezpečností $k_s = 2,59$. (Doporučená hodnota bezpečnosti je 2-2,5). Spoj musí být předepnutý na hodnotu $Q_0 = 12\,287 \text{ N}$ to odpovídá utahovacímu momentu šroubu s uvažovaným třením pod hlavou šroubu $M_K = 12 \text{ Nm}$

Kvůli malému prostoru na čele těla razníku bude nutno použít šroub s upravenou hlavou a šroub je tedy nutno vyrobit. Materiál vhodný na výrobu šroubu do těchto podmínek je ocel 16 341 nebo 19 436.

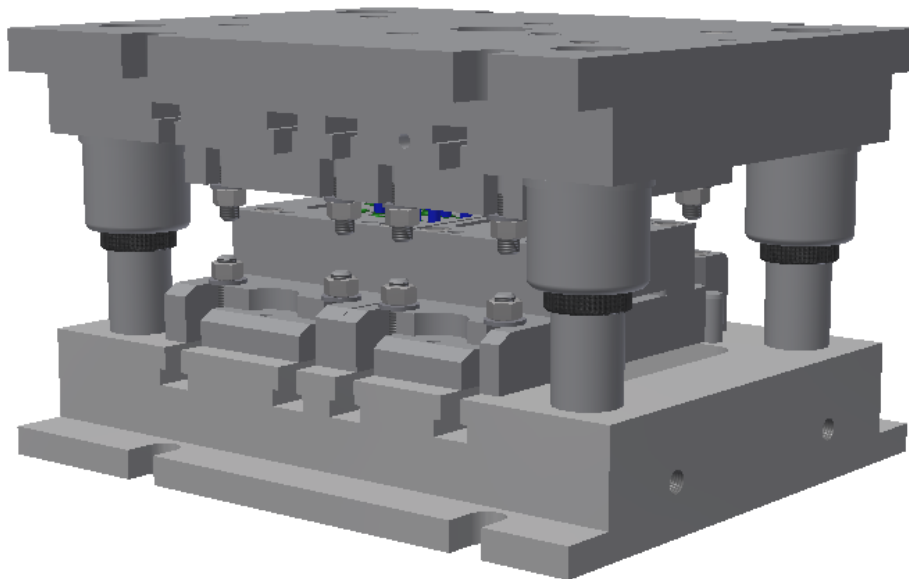


Obrázek 10: Navržený šroub s atypickou hlavou

4.3 Tuhostní analýza

V této části práce je snahou určit část nástroje, která způsobuje problémy pomocí metody konečných prvků. Prvním dílčím cílem je zjistit, který díl má nedostačující tuhost a naopak který díl je zbytečně naddimenzován. Druhým dílčím cílem je zjistit polohu těžiště stříhacích sil a s ohledem na jeho polohu upravit upevňování nástroje do lisu.

Pro výpočet je připraven 3D model, vyrobený podle výkresové dokumentace poskytnuté firmou ČZ Řetězy. Model bude muset být pro výpočet doplněn o určitá zjednodušení, která usnadní kompletní analýzu a zároveň neovlivní správnost výsledku. Pracuje se také na vytvoření vhodného vsíťování modelu.



Obrázek 11: 3D model stříhacího nástroje

4.3.4 Návrh experimentu

V současné době probíhá příprava experimentálního měření. Měření v reálných podmínkách umožní snazší popsání samotného prostřívání materiálu. Jedná se o matematicky velmi těžko popsatelný děj. Snahou je zjistit přesné velikosti sil působících na razníky a jejich časovou závislost. Na obrázku 11 je zobrazen lis použitý na stříhání destiček a pohled do jeho pracovního prostoru. Měření by se mělo předběžně uskutečnit v polovině dubna letošního roku (2014).



Obrázek 12: Lis KAISER 100 a pohled na nástroj v pracovním prostoru lisu

5. Závěr

Práce shrnuje stav projektu zhruba po půlročním rozpracování. Z důvodu omezenosti rozsahu této práce zde nejsou uvedeny všechny provedené pevnostní kontroly a výpočty. V současné době se čeká na vyrobení prototypu navržených razníků a jejich praktické vyzkoušení. Probíhá také příprava na experimentální měření v reálných podmínkách. Po dokončení experimentu bude následovat MKP analýza, optimalizace konstrukce nástroje, tvorba výkresové dokumentace, výroba a ověření nového návrhu nástroje v praxi.

6. Seznam symbolů

F_V	$[N]$	Tahová síla v razníku děr
Rm_m	$[N/mm^2]$	Mez pevnosti stříhaného materiálu
S_t	$[mm^2]$	Střížná plocha otvoru
d	$[mm]$	Průměr razníku děr
t	$[mm]$	Tloušťka stříhaného plechu
f_t	$[1]$	Součinitel tření ocel-ocel
J_{\min}	$[mm^4]$	Minimální kvadratický moment průřezu
A_d	$[mm^2]$	Průřez razníku děr
E	$[N/mm^2]$	Youngův modul pružnosti
F_{KR}	$[N]$	Kritická síla razníku děr
λ	$[1]$	Štíhlost
σ_u	$[N/mm^2]$	Mez úměrnosti stříhaného materiálu

l	$[mm]$	Délka razníku
p_1	$[N/mm^2]$	Vnitřní přetlak
p_3	$[N/mm^2]$	Vnější přetlak
p_2	$[N/mm^2]$	Kontaktní tlak ve spoji po nalisování
r_1^I	$[mm]$	Vnitřní poloměr vnitřní nádoby
r_2^I	$[mm]$	Vnější poloměr vnitřní nádoby
r_2^{II}	$[mm]$	Vnitřní poloměr vnější nádoby
r_3^{II}	$[mm]$	Vnější poloměr vnější nádoby
Δr_2^I	$[mm]$	Deformace vnějšího poloměru vnitřní nádoby
Δr_2^{II}	$[mm]$	Deformace vnitřního poloměru vnější nádoby
σ_t	$[N/mm^2]$	Tečné napětí
σ_r	$[N/mm^2]$	Radiální napětí
μ	$[1]$	Poissonova konstanta
v_{\max}	$[mm]$	Maximální vůle uložení
C_I	$[N/mm]$	Tuhost konstrukce

7. Seznam použité literatury

- [1] DEGRADACE STROJNÍCH SOUČÁSTÍ, 2014. Monografie "Degradace strojních součástí". http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd_txt/Mngr_ram_txt2.htm (accessed March 16, 2014).
- [2] Řezníček, J. *PRUŽNOST A PEVNOST II KOMENTOVANÉ PŘEDNÁŠKY*, 1st ed.; ČVUT: Praha, 2009.
- [3] Švec, V. *Části a mechanismy strojů - Příklady*, 1st ed.; ČVUT: Praha, 1991.
- [4] Leinveber, J.; Vávra, P. *STROJNICKÉ TABULKY*, 2nd ed.; ALBRA: Úvaly, 2005.
- [5] Řezníček, J. ODLEHČENÝ STAV NALISOVANÉ NÁDOBY. In *PRUŽNOST A PEVNOST II KOMENTOVANÉ PŘEDNÁŠKY*, 1st ed.; , Ed.; ČVUT: Praha, 2009; p 39.