



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Optimalizace prototypové výroby svorek
stabilizátorů umístěných na podvozcích
vozidel**

**Optimization of stabilizer clamps prototype
production**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Václav ČVANČARA

Studijní program: N0716A270001 Dopravní a transportní technika

Specializace: Transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Eliška Cézová, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čvančara** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **474819**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace prototypové výroby svorek zkrutných stabilizátorů umístěných na podvozcích vozidel

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of stabilizer clamps prototype production

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše metodik návrhu polotovaru pro výrobu svorky kovopryžového pouzdra zkrutného stabilizátoru.
2. Popsání metodiky návrhu lisovacích nástrojů pro výrobu svorky.
3. Vytvoření modelu svorky pomocí 3D skenovacího zařízení.
4. Vyhodnocení naskenovaného 3D modelu svorky.
5. Návrh experimentálního měření pro zjištění únavových vlastností svorky.
6. Provedení a vyhodnocení experimentů.

Seznam doporučené literatury:

VLK, František. Podvozky motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5274-4.
KLIBER, Jiří. Základy tváření kovů. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1794-1
NOVOTNÝ, Jiří. Technologie 1: slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-02351-6.
RŮŽIČKA, Milan, Miroslav HANKE a Milan ROST. Dynamická pevnost a životnost. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 1992.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

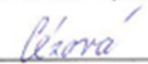
Ing. Eliška Cézová, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

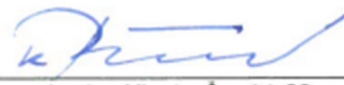
Datum zadání diplomové práce: **05.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Eliška Cézová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.4.2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem „Optimalizace prototypové výroby svorek stabilizátorů umístěných na podvozcích vozidel“ vypracoval samostatně s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Václav Čvančara

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Elišce Cézové, Ph.D. za odborný dohled a cenné připomínky při vedení této diplomové práce. Dále děkuji Ing. Jaromíru Kašparovi a Ing. Luboši Pečenkovi, Ph.D. za konzultace při návrhu experimentálních měření, Ing. Lubomíru Paradovi a firmě Mubea za poskytnutí možnosti zpracování této problematiky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za příjemné zázemí, které je pro vypracování takovéto práce nezbytné.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Václav Čvančara

Název: Optimalizace prototypové výroby svorek zkrutných stabilizátorů umístěných na podvozcích vozidel

Title: Optimization of stabilizer clamps prototype production

Akademický: 2021/2022

Studijní: N0716A270001 Dopravní a transportní technika

Specializace: Transportní technika

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí práce: Ing. Eliška Cézová, Ph.D.

Bibliografické Počet stran: 86
Počet obrázků: 83

Klíčová slova: Svorka stabilizátoru, prototypová výroba

Keywords: Stabilizer clamp, prototype production

Anotace: Předmětem této diplomové práce je návrh úprav dílčích procesů s cílem optimalizovat prototypovou výrobu svorek zkrutných stabilizátorů. Hlavním důvodem, proč vznikl požadavek na zpracování této problematiky, je současná situace, kdy výsledky experimentálních měření nejsou v souladu s výsledky MKP analýz. Pozornost je zaměřena na proces návrhu výrobních nástrojů a rozměrů polotovarů, kontrolu fyzických dílů pomocí 3D skenovacího zařízení a experimentální měření únavových vlastností svorek.

Annotation: Subject of this master thesis is a proposal of modifications of partial processes aiming to optimize the prototype production of torsion stabilizer clamps. The main reason why the requirement to analyze this issue arose is the current situation, when the results of experimental measurements do not comply with the results of FEM analyses. The focus is on the process of production tools design and dimensions of semi-finished products, inspection of physical parts using 3D scanning equipment and experimental measurement of fatigue properties of clamps.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>b</i>	[<i>mm</i>]	Šířka plechu
<i>c</i>	[<i>m/s</i>]	Rychlost světla
<i>E</i>	[<i>N/mm²</i>]	Modul pružnosti v tahu
<i>f</i>	[<i>Hz</i>]	Frekvence
<i>F</i>	[<i>kN</i>]	Síla
<i>K'</i>	[<i>N/mm²</i>]	Modul cyklického zpevnění
<i>l</i>	[<i>mm</i>]	Délka
<i>M_o</i>	[<i>Nm</i>]	Ohybový moment
<i>n'</i>	[–]	Exponent cyklického zpevnění
<i>N</i>	[–]	Počet cyklů
<i>r</i>	[<i>mm</i>]	Vnitřní poloměr ohybu
<i>R</i>	[<i>mm</i>]	Vnější poloměr ohybu
<i>R_e</i>	[<i>N/mm²</i>]	Mez kluzu
<i>s</i>	[<i>mm</i>]	Tloušťka plechu
<i>t</i>	[<i>s</i>]	Čas
<i>T_r</i>	[<i>K</i>]	Teplota
<i>v</i>	[<i>mm</i>]	Střižná vůle
<i>V</i>	[<i>mm</i>]	Objem
<i>x</i>	[–]	Součinitel posunutí neutrální vrstvy
<i>z</i>	[<i>mm</i>]	Střižná mezera
<i>α</i>	[°]	Úhel ohybu
<i>γ</i>	[°]	Korekční úhel
<i>ε</i>	[–]	Poměrná deformace
<i>π</i>	[–]	Ludolfovo číslo
<i>ρ</i>	[<i>mm</i>]	Poloměr ohybu neutrálního vlákna
<i>σ</i>	[<i>N/mm²</i>]	Napětí
<i>φ</i>	[–]	Skutečné hlavní poměrné deformace
<i>θ</i>	[°]	Úhel odrazu

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Svorka zkrutného stabilizátoru	2
2.1	Princip a potřeba stabilizátoru	2
2.2	Kovopryžové pouzdro zkrutného stabilizátoru	4
3	Technologie ohýbání a stříhání plechů.....	5
3.1	Technologie tváření	5
3.1.1	Rozdělení tvářecích procesů	6
3.1.2	Základní zákony tvárné deformace	8
3.2	Technologie tváření plechů	9
3.2.1	Stříhání plechů.....	10
3.2.2	Ohýbání plechů.....	12
3.2.3	Rovnění plechů	16
4	3D skenování a jeho využití pro kontrolu součástí	17
4.1	Reverzní inženýrství.....	17
4.1.1	3D skenování.....	19
4.2	3D skenery a jejich rozdělení	19
4.3	Destruktivní 3D skenování	20
4.4	Kontaktní 3D skenování.....	22
4.4.1	Souřadnicové měřicí stroje.....	23
4.4.2	3D skenery s kloubovými rameny	25
4.5	Nekontaktní 3D skenování	26
4.5.1	Transmisní 3D skenování.....	27
4.5.2	Ultrazvukové 3D skenování.....	29
4.5.3	Laserové 3D skenování	29
4.5.4	Optické 3D skenování	31
5	Únava strojních součástí.....	34
5.1	Kmitavé zatížení a únavový lom	34
5.2	Wöhlerova křivka	36
5.3	Filozofie dimenzování na únavu	38
5.4	Mechanické vlastnosti materiálu při cyklickém zatěžování	39
6	Analýza procesu prototypové výroby svorek stabilizátorů.....	40
7	Výroba svorek	42
7.1	Rozdíl mezi prototypovou a sériovou výrobou svorek	42
7.2	Prototypová výroba svorek	43
7.2.1	Určení rozměrů polotovaru svorky.....	43
7.2.2	Porovnání s teoreticky přesnými rozměry.....	45
7.2.3	Diskuze výsledků	47
7.2.4	Metodika návrhu výrobních nástrojů	48
7.2.5	Zhodnocení postupu tvorby nástrojů.....	51

8	Kontrola fyzických dílů svorky.....	52
8.1	Postup tvorby 3D SCAN modelu svorky.....	52
8.2	Vyhodnocení 3D SCAN modelu svorky	58
9	Experimentální měření únavových vlastností svorek.....	63
9.1	Návrh experimentálního měření únavových vlastností svorky.....	65
9.1.1	Průběh měření	66
9.1.2	Vyhodnocení experimentu.....	67
9.2	Návrh měření třibodového ohybu.....	69
9.2.1	Provedení měření třibodového ohybu.....	70
9.2.2	Vyhodnocení třibodového ohybu.....	72
10	Závěr.	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK	78

1 Úvod

Maximalizace zisku je podstatou každé firmy působící v tržním prostředí. K naplnění tohoto cíle firmy využívají standardní metody, jako je minimalizace výrobních nákladů, či optimalizace výrobních procesů apod. Jednou z těchto cest je i investice do vývojových oddělení se zkušebními laboratořemi, které pak poskytují „výrobě“ cenné informace ohledně kvality a vlastností vyráběných součástí.

Firma Mubea se již řadu let zabývá vývojem a výrobou komponent používaných v automobilovém průmyslu. Svorka stabilizátoru je pouze jedním zástupcem z širokého spektra produkovaných dílů. Tato skutečnost však nijak nesnižuje důležitost optimalizace jejího výrobního procesu, právě naopak – přestože je tato součást poměrně konkrétního využití, závěry získané z procesu výzkumu a vývoje svorky lze následně využít pro výzkum podobných součástí nejen v automobilovém průmyslu.

V užším kontextu lze výrobu svorky chápat jako proces, kdy se plechový polotovar pomocí lisovacích strojů a nástrojů přetvoří na svorku. V širším kontextu pak lze do tohoto pojmu zahrnout také procesy týkající se návrhů polotovarů, výrobních nástrojů, geometrie svorky a především pak následné ověření, zdali se vlastnosti vyrobené svorky shodují s těmi požadovanými.

Vzhledem k tomu, že se svorky nacházejí na podvozcích vozidel, jsou jejich požadované vlastnosti čistě funkčního charakteru. Po výrobě svorky je nejdůležitější ověřit, jestli byly všechny funkční rozměry a tvary vytvořeny s předepsanou přesností, zaručující kompatibilitu svorky s ostatními díly podvozku. K tomuto účelu nabízí technická praxe řadu nástrojů a metodik. Jednou z nich je technologie 3D skenování, která se ve firmě k podobným účelům běžně používá. V dalším kroku je třeba zjistit, zdali jsou mechanické (a zejména únavové) vlastnosti svorky shodné s těmi požadovanými, a tudíž jestli svorka v provozu odolá veškerému silovému působení, kterému bývá vystavena. Tyto vlastnosti bývají standardně určovány na základě experimentálních měření.

Prvním cílem této práce je popsat postup návrhu výrobních nástrojů a rozměrů polotovaru svorky. Tento postup zhodnotit a případně navrhnout alternativní metodiky.

Druhým cílem je podrobně popsat metodiku tvorby modelu svorky pomocí 3D skenovacího zařízení a provést následné vyhodnocení naskenovaného dílu.

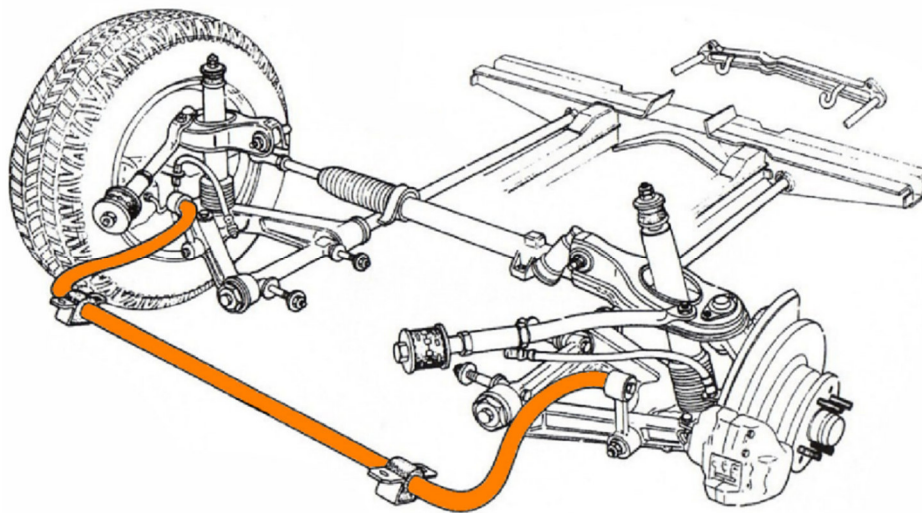
Třetím cílem je navrhnout, provést a zhodnotit experimentální měření únavových vlastností jednoho standardně používaného typu svorky.

2 Svorka zkrutného stabilizátoru

Zkrutný (nebo také torzní či příčný) stabilizátor je zařízení, které se nachází na podvozcích osobních automobilů. Účel tohoto zařízení je ryze praktický – při průjezdu zatáčkou snižuje klopení karosérie a zvyšuje tak komfort a bezpečnost jízdy. [1]

2.1 Princip a potřeba stabilizátoru

Z konstrukčního hlediska bývá toto zařízení velmi jednoduché – jedná se o kovovou tyč kruhového, či mezikruhového průřezu ve tvaru písmene U. Na obou koncích je stabilizátor (např. přes stabilizační tyčky s kloubovými čepy) uchycen k nějakému dílu neodpružených hmot (např. k ramenu nápravy, či k tlumiči). Ve střední části je stabilizátor přichycen kovopryžovými pouzdry k nápravnici, rámu, či k jinému dílu odpružených hmot. Možné uložení stabilizátoru je patrné z obrázku 1. [2] [3]



Obrázek 1: Uložení zkrutného stabilizátoru na podvozku automobilu [1]

Potřeba stabilizátoru vychází ze skutečnosti, že při pohybu (hmotného) tělesa po kruhové dráze dochází ke vzniku odstředivé síly. Vozidlo se sice při průjezdu zatáčkou ve směru této síly nepohybuje, jelikož ji zachycují pneumatiky třecími silami, je třeba si však uvědomit, že odstředivá síla působí na celý automobil, a tím pádem na všechny jeho části.

Výjimkou není ani zavěšení – mechanismus, který pohyblivě spojuje kola s rámem vozidla, a který určuje kinematiku pohybu kol. Důležitou vlastností zavěšení je střed klopení, jedná se o bod, kolem kterého se klopí odpružená hmota automobilu. Pomyslným spojením středu klopení přední a zadní nápravy vznikne osa klopení. Působením odstředivé síly dochází ke vzniku klopného momentu, který klopí karosérii vozidla právě kolem osy

klopení. Velikost tohoto momentu je rovná součinu velikosti odstředivé síly a vzdálenosti těžiště automobilu od klopné osy. Z hlediska bezpečnosti a komfortu jízdy je žádoucí účinek toho momentu (klopení karosérie) eliminovat. To je možné následujícími třemi způsoby: [2]

- zmenšením vzdálenosti těžiště od osy klopení,
- zvýšením tuhosti pružin,
- použitím zkrutného stabilizátoru.

Umístění těžiště automobilu na osu klopení by bylo možné provést zvýšením osy klopení, nebo snížením těžiště automobilu. Snížení těžiště by ve většině případů znamenalo umístit na podvozek zbytečnou zátěž navíc. Zvýšení osy klopení by zase mělo za následek zvýšení tzv. zvedací síly popsané v [2]. Zvýšení tuhosti pružin by narušilo jejich primární funkci – odpružení nerovností vozovky. Klopení lze tedy nejefektivněji zabránit použitím stabilizátoru. [2]

Stabilizátor je zpravidla jediný prvek, který u nezávislého zavěšení spojuje neodpruženou hmotu na pravé a levé straně automobilu. Při jízdě po rovné a hladké vozovce se stabilizátor nijak neprojevuje. Při přejezdu nerovností, které způsobují rovnoměrné stlačení levého i pravého odpružení, se stabilizátor pouze natočí kolem osy pryžového uložení a nevyvodí žádnou sílu (pokud není uvažován odpor pryžových silentbloků). Při nerovnoměrném stlačení pravého a levého odpružení je stabilizátor spíše na škodu, jelikož snižuje efekt odpružení. K jeho hlavnímu využití dochází, jak již bylo řečeno, při průjezdu zatáčkou. V tu chvíli stabilizátor funguje jako zkrutná tyč, která se vlivem klopného momentu sice deformuje (krouť), ale zároveň mu tím efektivně zabraňuje v klopení karosérie vozidla. [2]

Stabilizátor nemusí být vždy tvořen pouze jednoduchou zkrutnou tyčí. Především u vozů prémiových tříd se používají stabilizátory, které nejsou na stranách připojeny k podvozku jednoduchými stabilizačními tyčkami, nýbrž přes hydraulické písky. Tlak v hydraulických pístech je nastavován přes řídicí jednotku, která získává informace z nejrůznějších snímačů a čidel. Na základě zaznamenaných dat tato řídicí jednotka vyhodnotí, zdali se automobil pohybuje v přímém směru, nebo jestli projíždí zatáčkou. Pokud se automobil pohybuje v přímém směru, tak je (jak již bylo zmíněno) stabilizátor spíše na škodu a tak řídicí jednotky sníží tlak v pístech a tím pádem tuhost stabilizátoru. Pokud automobil projíždí zatáčkou, nastaví řídicí jednotka v pístech vyšší tlak, čímž zvýší tuhost stabilizátoru a sníží klopení karosérie v zatáčce. Použití takového systému odstraňuje kompromis mezi pohodlnou jízdou v přímém směru a v zatáčce. Nevýhodou tohoto systému je vysoká cena a vyšší náročnost údržby. [2]

Další možností, jak nastavovat tuhost stabilizátoru je za pomoci speciálních břitů, jejichž konstrukce je patrná z obrázku 2. Břity jsou v podstatě stabilizační tyčky s proměnlivou tuhostí v závislosti na tom, jak se břit při montáži ke stabilizátoru natočí. [2]

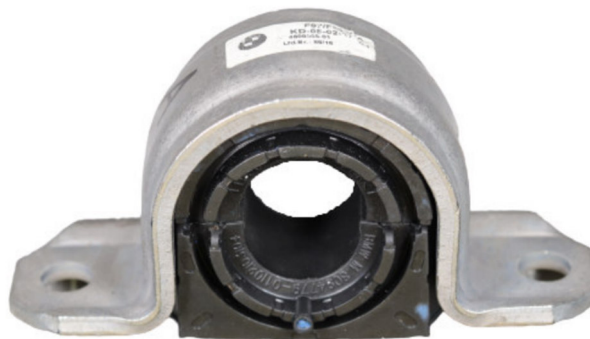


Obrázek 2: Břity stabilizátoru [2]

Mohlo by se zdát, že stabilizátor při průjezdu zatáčkou přenáší sílu z vnějšího (stlačovaného) kola na kolo vnitřní (odlehčené). Je tomu však právě naopak – stabilizátor ještě více zatěžuje vnější (stlačené) kolo a odlehčuje vnitřní (odlehčené). Této skutečnosti se využívá pro korigování jevů přetáčivosti, respektive nedotáčivosti. Podrobnější vysvětlení funkce různých druhů stabilizátorů je v [2].

2.2 Kovopryžové pouzdro zkrutného stabilizátoru

Stabilizátor je ve své střední části uchycen k rámu vozidla pomocí dvou kovopryžových pouzder. Tato pouzdra musí umožnit stabilizátoru kroutit se kolem své podélné osy a zároveň zachytit všechny reakční síly, které ve stabilizátoru během provozu vznikají. Proto se tato uložení standardně skládají ze dvou částí - z kovové (plechové) svorky, jejíž funkcí je odolat veškerému silovému působení a udržet stabilizátor na svém místě a z pryžového silentbloku, který pohlcuje vibrace a dynamické rázy a snižuje opotřebení obou součástí. Konstrukce tohoto pouzdra je patrná z obrázku 3.



Obrázek 3: Kovopryžové pouzdro zkrutného stabilizátoru [1]

3 Technologie ohýbání a stříhání plechů

Na první pohled je patrné, že výchozím polotovarem pro výrobu svorky je plech. Svorka pak získává svojí finální podobu během procesu tvarování tohoto plechového polotovaru. V tomto procesu výroby hrají zcela klíčovou roli technologie ohýbání a stříhání. Svorku je tudíž možné identifikovat jakožto plechový výstřižek, respektive výlisek. Charakteristickými znaky obou těchto technologií jsou velké plastické deformace, které způsobují změny tvaru ohýbaného, respektive stříhaného dílu. Obě tyto technologie tedy spadají pod technologický proces zvaný tváření.

3.1 Technologie tváření

Technologie tváření je charakterizována vznikem velkých plastických deformací, které jsou umožněny plastickými vlastnostmi tvářeného materiálu. Deformace bývá dosaženo účinkem vnějších sil a vede ke změně tvaru a rozměru tvářeného dílu. Při tváření dochází pomocí tvářecích nástrojů k přemístění částic, přičemž se předpokládá, že objem tvářené látky se nemění. Tento proces má některé podobné znaky jako tečení viskózních látek, proto se tváření také označuje jako plastické tečení. Tváření je provázeno fyzikálními a strukturálními změnami, které způsobují změny fyzikálních a mechanických vlastností tvářených dílů. [4]

Průběh deformace je závislý na stavu napětí. Při tváření je tedy zapotřebí, vyvolat v požadovaném směru takový stav napjatosti, aby došlo k překročení hodnoty meze kluzu, a tím pádem ke vzniku plastických deformací. Zároveň však nesmí být překročena hodnota meze pevnosti, protože to by mělo za následek ztrátu soudržnosti tvářeného materiálu. Z toho vyplývá, že materiály vhodné k tváření jsou takové materiály, jejichž hodnoty meze kluzu a meze pevnosti jsou od sebe dostatečně vzdálené. [4] [5]

Podstatou tvářecích procesů je schopnost některých materiálu měnit tvar bez porušení celistvosti, tato vlastnost se nazývá plasticita. Pokud je však materiál namáhán při malém zatížení a hodnota stavu napjatosti nepřekoná hodnotu meze kluzu, tak si lze povšimnout, že po uvolnění zatěžujících sil se materiál opět vrátí do původního stavu. Tato vlastnost se nazývá elasticita a platí, že elastická (pružná) deformace vždy předchází plastické (trvalé) deformaci a není možné jí opomenout. Při jistých předpokladech lze elastickou deformaci u nejčastěji používaných kovů popsat Hookovým zákonem, který svazuje závislost deformace na napětí lineárním vztahem: [4] [5]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.1)$$

kde: ε [–] je poměrná deformace,

σ [N/mm^2] je napětí,

E [N/mm^2] je Youngův modul pružnosti v tahu.

Zmíněné vlastnosti kovových materiálů jsou podmíněny atomovou stavbou hmoty, vyplývající z atomové struktury. Při pružné deformaci se atomy pouze vychýlí, aby se po odlehčení opět vrátily do svých rovnovážných poloh. Při působení tahem, nebo tlakem pouze v jedné ose nedochází k plastické deformaci. K plastické deformaci může dojít pouze vlivem smykového napětí ve skluzové rovině, kdy se jednotlivé atomy kovu vůči sobě posunou, aniž by mezi nimi přestala působit koheze. Vznik plastické deformace lze vysvětlit dislokační teorií, přičemž se rozlišuje mezi třemi základními mechanismy: [5]

- skluz,
- difuze,
- přemístění jednotlivých bloků zrn.

3.1.1 Rozdělení tvářecích procesů

Plastické vlastnosti tvářených látek bývají silně závislé na teplotě. Většinou platí, že se zvyšující se teplotou klesá deformační odpor tvářeného materiálu, což má za následek, že i potřebné tvářecí síly jsou nižší. Důsledkem zvýšené teploty není však pouze snížení deformačního odporu. Při zvýšené teplotě dochází k jevu zvanému rekrytalizace, který má zásadní vliv na krystalickou strukturu látky, a tím pádem i na fyzikální a mechanické vlastnosti tvářeného materiálu. [5]

Plastická deformace způsobuje stav termodynamické nerovnováhy daného materiálu. Rekrytalizace je proces odpevňovacích dějů, při kterých dochází k přechodu do stavu termodynamické rovnováhy. Tento proces je rozdělen do několika fází, přičemž v první fázi zvané zotavení dochází pouze k zanikání bodových poruch krystalické mřížky, uvolňování a přemísťování některých dislokací. Nedochází však k vzniku nových, nedeformovaných zrn materiálu. K zotavení dochází v intervalu teplot $(0,25 \text{ až } 0,3)T_T$, kde T_T [K] je teplota tání. Při vyšších teplotách však dochází k dalším fázím procesu rekrytalizace, při kterých dochází ke vzniku nových, nedeformovaných zrn materiálu. Milníkem je pak hodnota teploty rekrytalizace T_R [K], nad níž dochází k fázím procesu rekrytalizace, při nichž vznikají nová zrna a dochází k odpevňovacím procesům. Pro čisté kovy lze hodnotu teploty T_R spočítat podle vzorce (3.2). [4] [5]

$$T_R = 0,4 \cdot T_T \quad (3.2)$$

Hodnota teploty T_R je pak milníkem, který rozděluje proces tváření na:

- tváření za studena,
- tváření za tepla.

Dle [4] probíhá v praxi tváření za studena při nižších teplotách než $0,3 T_T$, zatímco tváření za tepla probíhá při teplotách vyšších než $0,7 T_T$. Tento pohled však teoreticky přesně neobstojí. Lze říci, že správnější je rozdělit tvářecí pochody na ty, při kterých dochází k plastickému zpevnění (převážně za studena) a na ty, při kterých je zpevnění již během tváření odstraňováno zotavením a rekrystalizací. [4] [5]

Tvářecí procesy je dále možné rozdělit dle charakteru tvářecích sil na tváření způsobené: [4]

- statickými silami (např. válcování),
- dynamickými rázy (např. kování).

Obecně lze rozeznávat devět stavů napjatosti. Během tváření se jich prakticky může vyskytnout pět: [4]

- tlak,
- tah,
- tah-tlak,
- ohyb,
- smyk.

Podle charakteru deformace lze pak tváření rozdělit na tváření: [4]

- objemové,
- plošné.

Při objemovém tváření dochází k deformaci ve všech třech směrech, zatímco při tváření plošném je deformace ve třetím směru malá. Tento způsob tváření je typický pro výrobu součásti z plechu, tím pádem i pro výrobu svorek stabilizátorů. [4]

Nejčastěji používanými druhy tvářecích operací jsou: [6]

- stříhání – oddělování materiálu v celém průřezu,
- ohýbání – deformace vyvolaná ohybovým napětím,
- tažení – deformace je vyvolána tahovým napětím,
- protlačování – materiál je protlačován otvorem matrice,

- kování – největší deformace probíhá ve směru působení vnějších sil, může být prováděno rázem,
- válcování – materiál vykonává posuvný pohyb v mezeře mezi otáčejícími se válci,
- ostatní – hluboké tažení, zakružování, planetové válcování, plátování, vibrační tváření.

Z hlediska toho rozdělení je technologie výroby svorek identifikována jako kování.

Kování lze dále rozdělit podle dynamiky toho procesu na: [4]

- kování klidným tlakem – obdobně jako u válcování se účinek vnější síly přenáší postupně,
- kování rázem – kování pomocí bucharů, případně ruční kování.

A dále na: [4]

- volné kování – to se vyznačuje volnou deformací kovaného materiálu do stran,
- zápustkové kování – tvar výkovku se vytváří v dutině zápustky, kterou tvářený materiál zcela vyplní.

Zápustkové kování plošných materiálů bývá také nazýváno lisováním a výrobek se pak nazývá výliskem.

3.1.2 Základní zákony tvárné deformace

K analýze tvářecích procesů a k určení tvářecích sil a tlaků je vhodné zavést jisté zjednodušující předpoklady, kterými se plastická deformace řídí. Tyto zjednodušující předpoklady jsou zahrnuty v základních zákonech plastické deformace. [4]

- **zákon stálosti objemu** – v technologických podmínkách tváření jsou kovy prakticky nestlačitelné, tím pádem ani plastická deformace nevyvolává změnu objemu tvářeného materiálu. Tento zákon lze matematicky zapsat pomocí rovnice (3.3). [4]

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (3.3)$$

kde $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ jsou skutečné hlavní poměrné deformace a jsou dány vztahy (3.4). [4]

$$\varphi_1 = \ln(1 + \varepsilon_1); \quad \varphi_2 = \ln(1 + \varepsilon_2); \quad \varphi_3 = \ln(1 + \varepsilon_3) \quad (3.4)$$

Nebo také zjednodušeně jako (3.5). [5]

$$V_0 = V_1 = V_n = konst \quad (3.5)$$

- **Zákon o pohybu částic cestou nejmenšího odporu** – Během tváření se jednotlivé částice přemísťují v tom směru, ve kterém se setkává s nejmenším odporem. [4]

Při pěchování válečku kruhového průřezu si tak lze všimnout, že dochází k přibližně rovnoměrnému zvětšení příčného průřezu ve všech směrech a výsledný tvařenec má také kruhový průřez. [4]

Při kování v otevřené zápustce je nutné, aby odpor pro vytékání materiálu do výronku byl menší než odpor pro vtékání do dutiny zápustky, jinak nedojde k požadovanému vyplnění dutiny. [4]

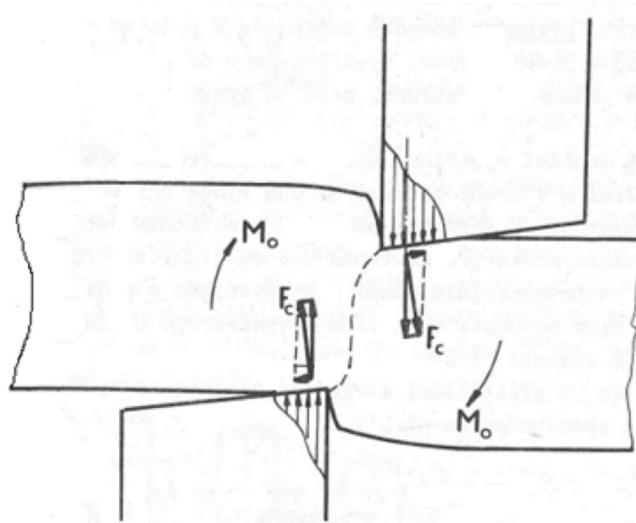
- **Zákon pružného odlehčení** – Plastická deformace je vždy doprovázena deformací elastickou. Z toho vyplývá, že po vyvolání plastické deformace a následném odlehčení tělesa dochází k pružné deformaci a změně tvaru tohoto tělesa. To je důvod, proč se geometrie výlisků přesně neshoduje s geometrií nástrojů. [4]
- **Zákon podobnosti** – Vychází z teorie podobnosti, která je základem pro teorii modelování. Zákon podobnosti pak umožňuje odhadovat podmínky ve skutečných tvářecích procesech na základě dat z experimentálního zkoumání modelů. K tomu je však nutné, aby experimentální modely byly podobné skutečným procesům. Podobnost lze posuzovat z mnoho hledisek, jimiž jsou např. geometrické, mechanické, teplotní, či fyzikálně-chemické aspekty. [4]

3.2 Technologie tváření plechů

Plech je plochá kovová deska vyrobená technologií tváření. Plechy se používají jakožto výchozí polotovary pro výrobu mnoha součástí ve strojním průmyslu. Tloušťka plechových polotovarů bývá konstantní, přičemž podle mezní hodnoty čtyř milimetrů se rozlišují plechy tlusté a tenké. Nezastupitelnou roli mají ocelové plechy, které bývají dodávány v tabulích, nebo ve svitcích. Zejména pro velkosériovou výrobu bývají hojně využívány plechové svitky, nicméně pro jejich využití musí být výrobní linka opatřena speciálními zařízeními, jako jsou odvíječky nebo rovnačky. [4] [5]

3.2.1 Stříhání plechů

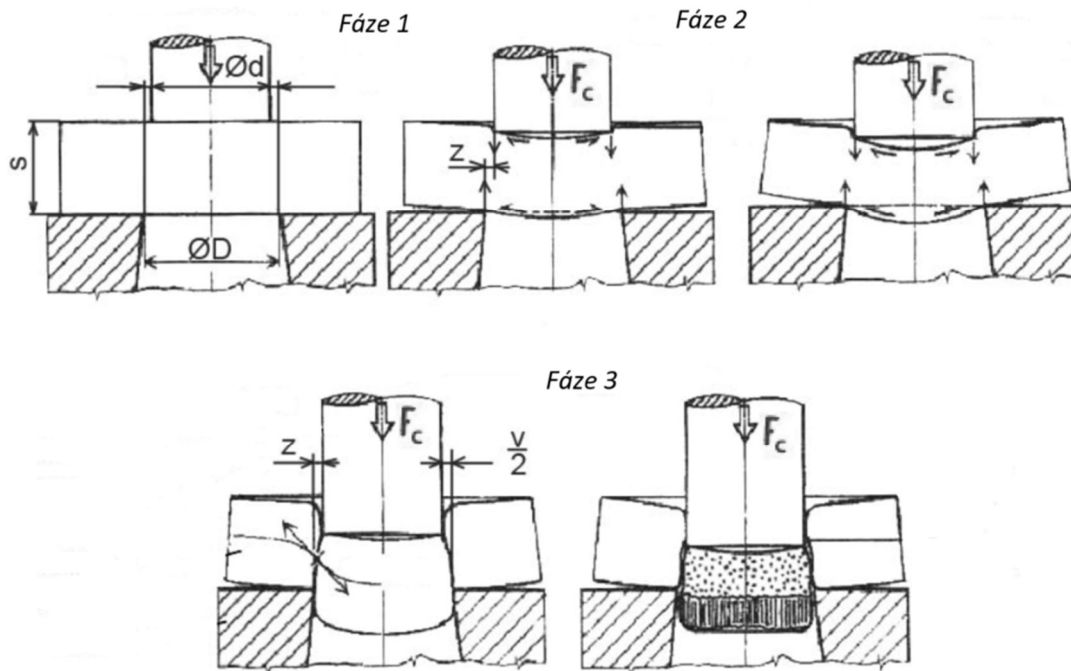
Stříhání (obrázek 4) je jednou z nejčastějších operací při tváření plechů. Používá se jak při přípravě polotovarů, tak i jako pomocná či dokončovací operace. Podstata této technologie spočívá v oddělení materiálu pomocí dvou břitů. Samotné oddělení materiálu je způsobeno smykovým napětím a předchází mu pružná i plastická deformace v místě stříhu. Používá se pro měkké a tvárné materiály. [7]



Obrázek 4: Stříhání [4] (upraveno)

Proces stříhání je možné rozdělit do následujících tří fází (obrázek 5): [7]

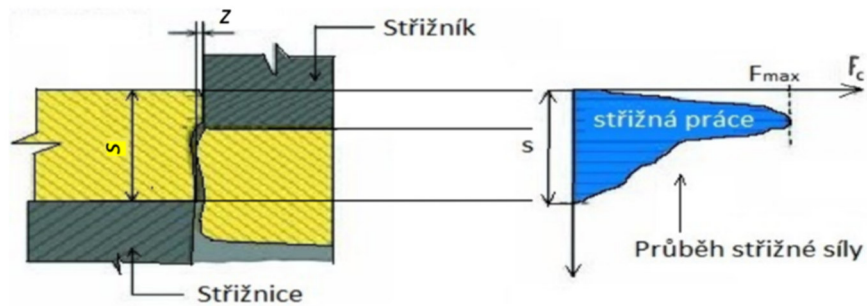
- Fáze 1 – Střížný nástroj již dosedl na stříhaný materiál a vlivem působících sil dochází k pružné deformaci tohoto materiálu. Napětí v něm nepřekročí hodnotu meze úměrnosti. Vzhledem k tomu, že mezi jednotlivými noži musí být určitá mezera (tzv. střížná vůle), tak se střížné síly F_c [N] nevyskytují na stejné nositelce. Tím pádem dochází ke vzniku momentu M_o [Nm], který se snaží stříhaný materiál natočit.
- Fáze 2 – V materiálu se již vyskytuje napětí přesahující mezi kluzu a dochází tak k plastické deformaci. Výše zmíněný moment namáhá materiál na ohyb a dochází tak ke vzniku kombinovaného namáhání a zvětšení střížného průřezu vlivem natočení, což způsobuje nutnost zvětšení střížných sil.
- Fáze 3 – Napětí v materiálu přesahuje hodnotu meze pevnosti ve stříhu. U hran stříhacích nástrojů dochází ke vzniku mikrotrhlin, které se následně spojují do mikrotrhlin a dochází k úplnému oddělení materiálu. Důsledkem působení ohybového momentu je zaoblčení stříhaného materiálu. Natočení stříhaného materiálu lze snížit použitím přidržovače.



Obrázek 5: Fáze stříhání [9] (upraveno)

Na rychlost vzniku a šíření prasklin má vliv střížná vůle v [mm]. Ta je dána rozdílem rozměrů pracovních částí střížnice a střížníku. Jednostranný rozměr střížné vůle ($v/2$) se nazývá střížná mezera z [mm]. Velikost střížné vůle se určuje na základě tloušťky a vlastnostech stříhaného materiálu. Optimální střížná vůle je taková, při které je dosaženo požadované jakosti střížné plochy při minimální střížné síle, obvykle se nachází v rozmezí 3-20% tloušťky materiálu. Velké vůle způsobí ohyb stříhaného materiálu, malé mezery pak způsobují vznik přestřížených prstenců. V obou případech dochází k nárůstu potřebné střížné síly. Střížná mezera musí být stejná a rovnoměrná po celém obvodu, jinak dochází ke vzniku povrchových vad a střížná plocha je nekvalitní. Na správné velikosti střížné vůle pak závisí nejen kvalita a jakost povrchu ale i životnost nástroje a spotřeba energie při stříhání. [7]

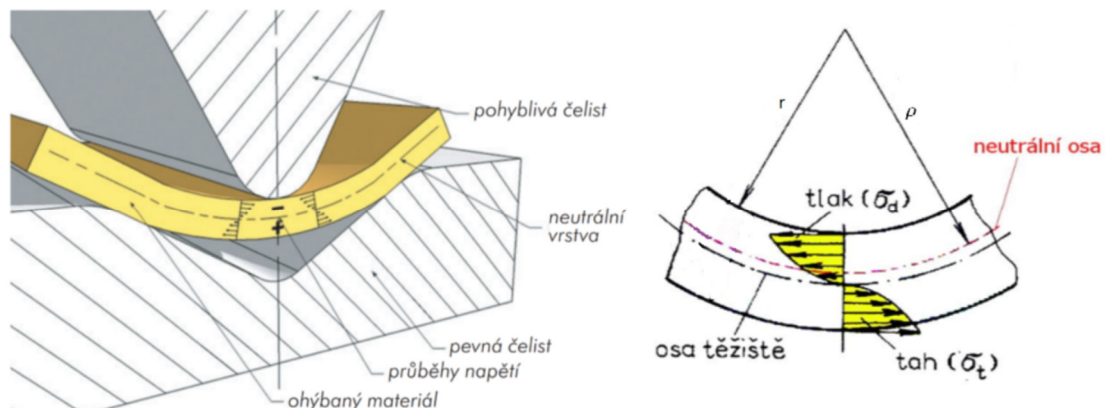
Velikost střížné síly (obrázek 6) je v každém okamžiku určena velikostí střížného odporu. Je třeba mít na paměti, že při stříhání nedochází k čistému smyku, nýbrž ke kombinovanému namáhání. Vzhledem k přídavnému namáhání (ohybem) je tedy nutné uvažovat střížnou sílu větší (cca o 20-50%). Zatímco křehké materiály se zpravidla poruší okamžitě při vniknutí střížníku do materiálu, houževnaté materiály se v průběhu stříhání zpevňují a dochází tak k nárůstu střížného odporu a střížné síly. Střížnou sílu lze zmenšit vhodnou technologickou úpravou stříhacích nástrojů. [7] [4]



Obrázek 6: Průběh střížné síly [7] (upraveno)

3.2.2 Ohýbání plechů

Ohýbání (obrázek 7) je technologický proces tváření, při kterém je plastická deformace způsobena momenty vnějších sil a nedochází při něm k podstatným změnám v průřezu tvářeného materiálu. Plastická deformace zasahuje poměrně malý objem polotovaru a je doprovázena deformací pružnou. Výsledné tvary jsou rozvinutelné do rovinné plochy, čehož se využívá při návrhu rozměrů a tvarů polotovarů. Při ohýbání dochází na vnitřní straně ke stlačování vrstev (vláken) v podélném směru a roztahování ve směru příčném. Na vnější straně je tomu přesně naopak, dochází k roztahování vrstev v podélném směru a ke stlačování ve směru příčném. Mezi těmito deformovanými vrstvami se nachází vrstva, která nepodléhá žádné deformaci – neutrální vrstva (vlákno). Tato vrstva se nenachází ve středu průřezu a určení její polohy je stěžejní pro návrh rozměrů a tvaru polotovaru. [4] [8]



Obrázek 7: Ohýbání [8] [10] (upraveno)

Na začátku procesu ohýbání se neutrální vlákno nachází ve středu průřezu. Vlivem ohýbání se však posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Pro ohyb s velkým poloměrem zaoblení, kdy pro poměr rádia ohybu r [mm] a tloušťky plechu s [mm] platí $r/s \geq 12$, posun neutrálního vlákna je zanedbáván a uvažuje se umístění neutrálního vlákna ve středu průřezu plechu. Pro menší poloměry zaoblení se však tloušťka materiálu v daném místě zmenšuje a poloměr neutrální osy ρ [mm] lze odhadnout pomocí vztahu: [4] [8]

$$\rho = \frac{R + r}{r} \cdot \frac{s_1}{s} \cdot \frac{b_s}{b} \quad (3.6)$$

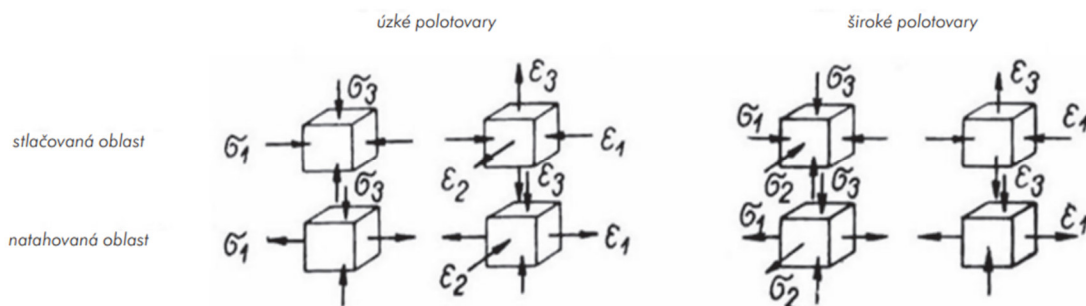
kde: R [mm] je vnější rádius ohybu,
 r [mm] je vnitřní rádius ohybu,
 s, b [mm] je tloušťka a šířka polotovaru před ohybem,
 s_1, b_s [mm] je tloušťka a střední šířka polotovaru v místě ohybu.

Případně pomocí empirického součinitele posunutí neutrální vrstvy x [-]: [4]

$$\rho = r + x \cdot s \quad (3.7)$$

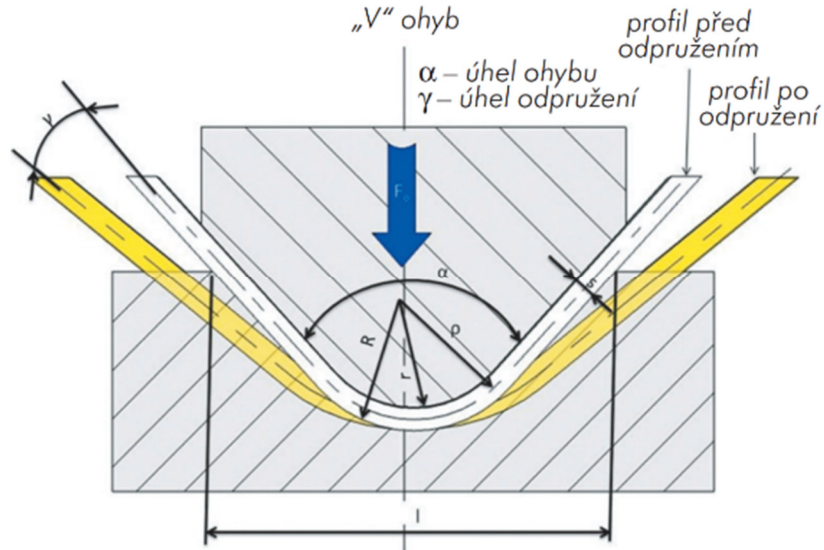
Vzhledem k tomu, že v neutrální vrstvě se nevyskytuje žádné napětí, tak v tomto místě nedochází k žádné deformaci. Proto je délka neutrálního vlákna rovná optimální délce plechového polotovaru. Délku neutrálního vlákna lze snadno vypočítat součtem délek rovných částí a délek jednotlivých oblouků, přičemž délka oblouku l [mm] je při známém úhlu ohybu α [°] určena vzorcem (3.8). [8]

$$l = \frac{\pi \cdot \rho \cdot \alpha}{180} \quad (3.8)$$



Obrázek 8: Schéma napětí a deformace při ohýbání [8]

Mezi neutrální vrstvou a plastickými deformacemi je zóna elastických deformací. Tato zóna způsobuje neblahý jev odpružení, kdy dojde k dodatečné deformaci ohýbané součásti po odlehčení tvářecích nástrojů. Tento jev je patrný z obrázku 9. [8]

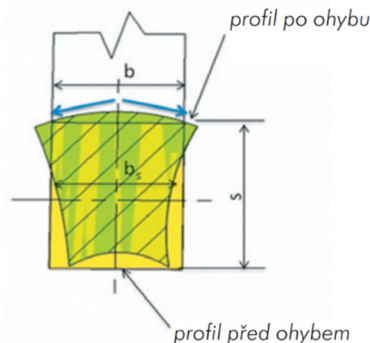


Obrázek 9: Odpružení [8]

V místě ohybu se v průřezu vyskytují 3 pásma: [8]

- pásmo pružných deformací kolem neutrální osy,
- vnější pásmo s trvalým prodloužením,
- vnitřní pásmo s trvalým stlačením.

V případě úzkých pásů se jedná o prostorové přetvoření, jelikož kromě rovinné deformace dochází i k deformování průřezu (obrázek 10). V případě širokých pásů působí proti deformaci v příčném směru materiál velké šířky v porovnání s jeho malou tloušťkou. Pro rozlišení, zdali je pás úzký, nebo široký je rozhodující poměr šířky k tloušťce. Pokud je $b/s \geq 3$ jedná se o pás široký. Schéma napětí a deformací je znázorněno na obrázku 8. [8]



Obrázek 10: Přetvoření průřezu při ohybu [8]

Požadovaný poloměr ohybu je určen konstrukcí součásti. Jeho velikost je však omezena mechanickými vlastnostmi použitého materiálu. Malé poloměry ohybu způsobují velké namáhání materiálu v místě ohybu a změnu tloušťky, ale nedochází u nich k velké zpětné deformaci (odpružení). U velkých poloměrů ohybu naopak není problém s namáháním materiálu, ale dochází k velkému odpružení. Je tedy vhodné ověřit, zdali se požadovaný poloměr ohybu nachází v intervalu mezi nejmenším a největším dovoleným poloměrem ohybu. [6]

Nejmenší dovolený poloměr ohybu r_{min} [mm] je určen tažností daného materiálu. Vnější vlákna nesmí být protažena o více, než je hodnota poměrného prodloužení ε [–] daného materiálu při trhací zkoušce a lze jej dopočítat podle vzorce (3.9). [6]

$$r_{min} = \frac{s}{2} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \quad (3.9)$$

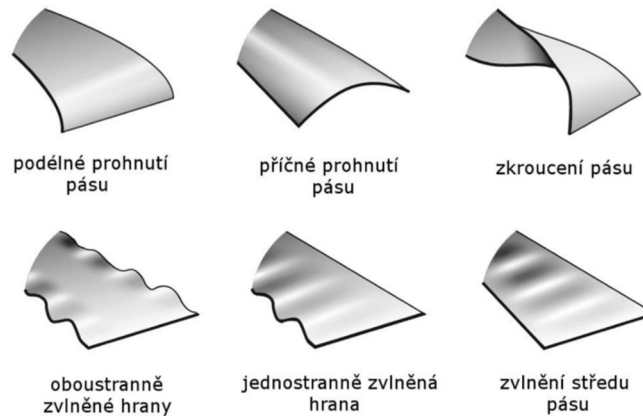
Největší dovolený poloměr ohybu r_{max} [mm] je dán podmínkou, že v krajních vláknech musí dojít k plastické deformaci materiálu, aby došlo k trvalé deformaci. Tuto hodnotu lze vypočítat na základě znalosti modulu pružnosti v tahu E [MPa] a meze kluzu daného materiálu R_e [MPa] vzorcem (3.10). [6]

$$r_{max} = \frac{s}{2} \cdot \frac{E - R_e}{R_e} \quad (3.10)$$

Jak již bylo výše zmíněno, vlivem odpružení tvar ohnutého výlisku nikdy zcela přesně neodpovídá tvaru ohýbacího nástroje. Míra odpružení závisí na mnoha faktorech od materiálových vlastností po sílu na konci pracovního zdvihu. Odpružení se projevuje jako úhlová odchylka a značí se γ [°]. K výpočtu velikosti odpružení se používají empirické vzorce. Jeho velikost se obvykle pohybuje v hodnotách 3° až 15°. Odpružení lze korigovat či eliminovat následujícími způsoby: [8]

- Ohýbací nástroj je navržen s korekcí o úhel, tím pádem se výlisek po samovolném odpružení dostane do požadovaného tvaru.
- Zvětšením lisovací síly na konci ohýbacího procesu na hodnotu, kdy dojde ke vzniku dodatečné plastické deformace.
- Použitím prolisů či vyztužovacích žeber, které také zvýší celkovou tuhost výlisku.

Kromě již zmíněných problémů se při ohýbání plechů může vyskytnout také tvoření vln, viz obrázek 11. Tomu lze zabránit bočním přitlačáním materiálu k nástroji. [8]

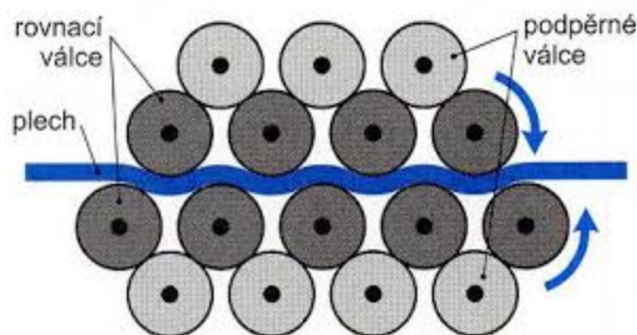


Obrázek 11: Zvlnění plechu [10]

Praskání materiálu (překročení meze kluzu) může být také ovlivněno směrem vláken materiálu. Osa ohybu by proto měla být kolmá na směr vláken a to i přes to, že pak dochází k většímu odpružení. [8]

3.2.3 Rovnání plechů

Nevýhodou plechového polotovaru navinutého na svitku je to, že při odvíjení si pás do jisté míry drží svůj původní tvar a zůstává zakřivený. Tato skutečnost přináší celou řadu komplikací při jeho dalším zpracování. Z tohoto důvodu se používají tzv. rovnačky, což jsou zařízení, která postupným ohýbáním pás rovnávají. Jejich principem je zavedení pásu mezi řady rovnacích válců, ve kterých dochází k postupnému ohýbání, dokud není dosaženo požadované rovinnosti, viz obrázek 12. [6]



Obrázek 12: Rovnání plechu [11]

4 3D skenování a jeho využití pro kontrolu součástí

Kontrola kvality má své nezastupitelné místo v procesu výroby každé součásti používané ve strojním průmyslu. Výjimkou není ani svorka kovopryžového uložení zkrutného stabilizátoru.

Existuje více možných definic pojmu „kvalita“. V kontextu výroby svorky je možné vyjít z Crosbyho pohledu, který nahlíží na kvalitu jako na shodu s požadavky. Kontrola kvality je pak soubor procesů, při kterých dochází k ověřování míry dosažení požadovaných vlastností. [12]

Jedním ze základních požadavků, který je kladen na každý model (typ) svorky, je dodržení všech funkčních rozměrů, tvarů a vzájemných poloh ploch s předepsanou přesností. Po výrobě svorky je tedy nutné ověřit, zda jsou všechny hlídané parametry dodrženy v tolerancích předepsaných na výrobním výkrese. K tomuto ověření se standardně používají metrologické metodiky a měřidla. Výběr měřidla a metody měření závisí nejen na požadované přesnosti měření a typu měřeného prvku, ale také např. na počtu měřených kusů a množství disponibilního času. V sériové (velkoobjemové) produkci svorek a podobných součástí je vhodné ověřovat požadované parametry pomocí speciálních (na míru vytvořených) kalibrů a konvenčních měřidel (např. posuvné měřítko). Pro získání přesnějších informací je však nutné použít sofistikovanější metrologické přístroje, jakými jsou např. souřadnicové měřicí stroje, anebo využitím metod reverzního inženýrství, jejichž nejznámějším zástupcem je 3D skenování.

4.1 Reverzní inženýrství

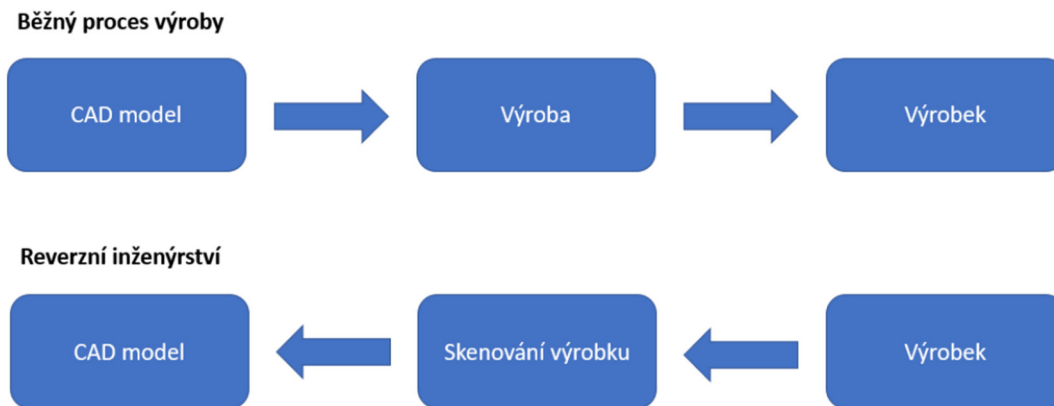
Pojem „inženýrství“ lze chápat jako technický proces navrhování, tvoření a udržování nejrůznějších produktů, zařízení, procesů a systémů. Při rozvíjení tohoto pohledu je možné rozlišovat mezi dopřednými procesy tzv. klasického inženýrství a mezi tím, co je označováno za proces „reverzního inženýrství“. [13]

Klasické (např. konstrukční) inženýrství je tedy proces, na jehož začátku stojí abstraktní prvek – požadavek na tvorbu nového zařízení, myšlenka na vylepšení existujícího zařízení, zadané vstupní parametry pro nějaký proces atd. Následně je pomocí inženýrských nástrojů (softwaru, metodiky, vzorce...) vytvořena výsledná realizace – strojní součást, matematický model, funkční proces atd.

Reverzní inženýrství vzniklo ze situace, kdy výsledný produkt již existuje, ale chybí k němu potřebné (požadované) informace. Je to tedy proces, při kterém dochází ke shromažďování dat a následnému analyzování s cílem zjistit určité neznámé informace o již vytvořeném produktu. V širším pojetí je to pojem aplikovatelný na kteroukoliv inženýrskou disciplínu, nicméně své uplatnění našel především v oblastech softwarového inženýrství

(vytvoření zdrojového kódu na základě již existujícího počítačového programu) a strojního inženýrství – tvorba výkresové dokumentace na základě existujícího fyzického modelu. [14]

V kontextu strojního průmyslu se tedy pojmem „reverzní inženýrství“ rozumí proces, kdy je pomocí metrologických metod a nástrojů z fyzické součásti vytvořen virtuální CAD model a k němu příslušná technická dokumentace. Tento proces následně může pokračovat tak, že se na základě těchto dat vyrobí fyzické díly – kopie původního dílu.



Obrázek 13: Schéma procesů klasického a reverzního inženýrství [15]

Principiální rozdíl mezi klasickým a reverzním inženýrstvím je patrný z obrázku 13. Ve strojním průmyslu bývá reverzní inženýrství využíváno především v situacích, kdy:

- došlo ke ztrátě dat (výkresů) nějaké firmou v minulosti vyráběné součásti a je požadováno obnovení výroby této součásti,
- z nějakého důvodu firma potřebuje získat informace (rozměry) o konkurenční firmou vyráběné součásti, které konkurenční firma nechce poskytnout.

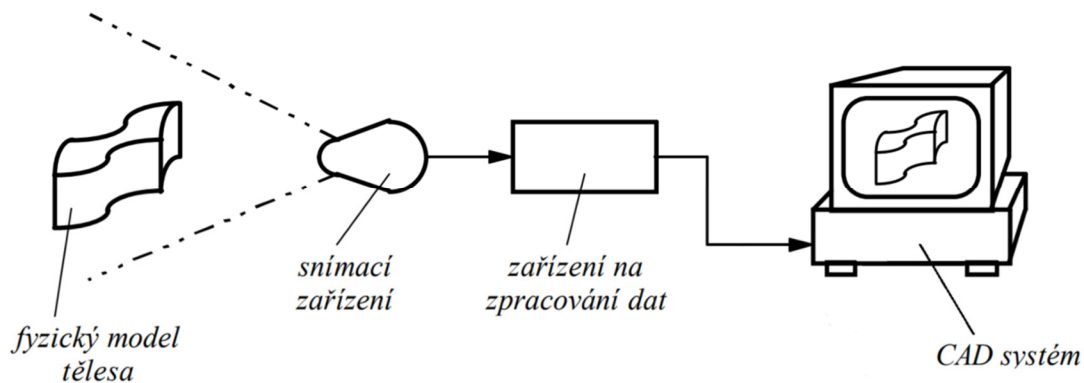
Metod reverzního inženýrství lze také využít k zefektivnění procesu tzv. rapid prototyping (rychlé prototypování). Na místo tvorby 3D modelu klasickým postupem, umožňují tyto metody tvorbu 3D modelu na základě geometrie fyzického dílu. [14]

Efektivní využití těchto metod lze demonstrovat situací, kdy je třeba vytvořit protikus k již existujícímu fyzickému dílu, přičemž styková plocha těchto dílů je obecného, složitého tvaru. Na místo komplikovaného odměřování a modelování této plochy je objekt jednoduše naskenován a požadovaná plocha obtisknuta pomocí CAD softwaru. V některých případech může být tento postup oproti standardním metodám nejen rychlejší, ale také přesnější a jednodušší.

4.1.1 3D skenování

3D skenování (skenování těles) je proces, při kterém dochází k přenosu fyzického modelu (reálného tělesa) do grafického prostředí, nejčastěji do podoby CAD modelu. [16]

V průběhu skenování dochází k snímání bodů, případně křivek z povrchu skenovaného předmětu. Tato data musí být následně zpracována do podoby čitelné počítačem, aby mohla být graficky zobrazena. Vzhledem k tomu, že většina současných počítačů pracuje s digitálními daty, musí během tohoto procesu dojít k digitalizaci. Digitalizace je proces, při kterém dochází k převodu podoby analogové do podoby digitální. V kontextu 3D skenování dochází nejprve k převodu (spojitého) reálného tělesa na množinu prvků (naskenovaných bodů), které jsou následně převedeny do binární soustavy a pomocí vhodného softwaru v počítači zobrazeny jako 3D model. Tento proces je patrný z obrázku 14. [16]



Obrázek 14: Proces 3D skenování [16] (upraveno)

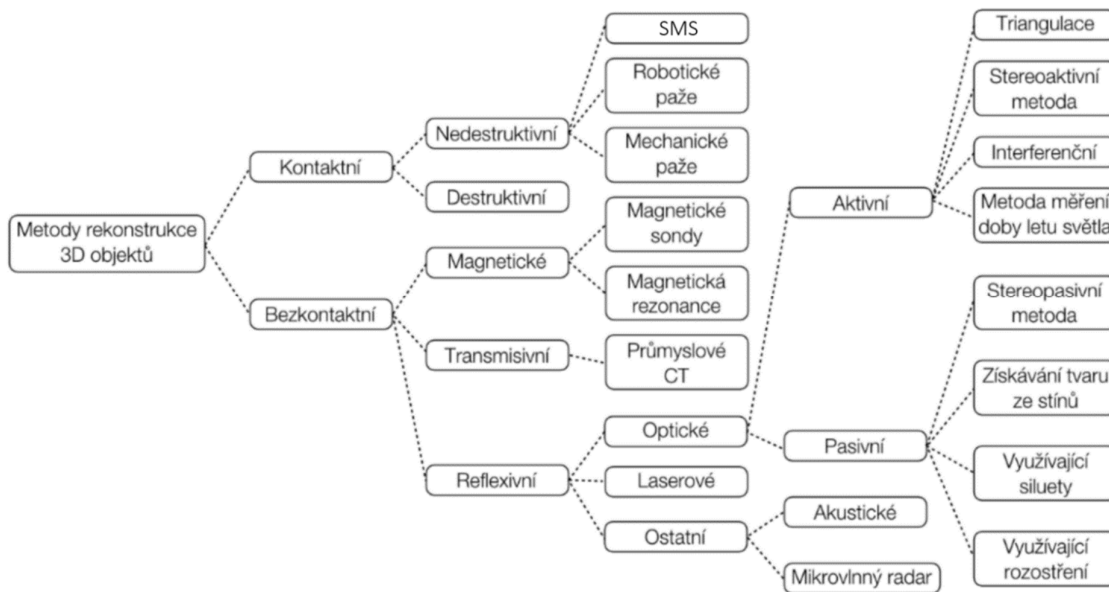
4.2 3D skenery a jejich rozdělení

3D skener je zařízení, které slouží ke skenování těles. Jak je patrné z obrázku 14, jeho součástí je zpravidla snímací zařízení, které zachytí souřadnice jednotlivých bodů na povrchu skenovaného tělesa. Tato data jsou dále zpracována pomocí zařízení, které je převede do digitální podoby a následně odešle do počítače. V počítači jsou tato data zpracována, přičemž výstupem je pak 3D CAD model například ve formátu STL. Do počítače přichází informace o souřadnicích jednotlivých bodů v prostoru. Vzhledem k velkému množství zachycených bodů, bývají tato data označována jako „mračna bodů“. Hlavní dvě složky procesu zpracování dat jsou: [17]

- zarovnání jednotlivých snímků na sebe tak, aby došlo ke složení 3D modelu z mračna bodů,
- vytvoření 3D modelu extrapolací mračna bodů vhodnou polygonovou sítí. Tento model je pak již možné exportovat ve standardním formátu.

Je třeba podotknout, že počítač slouží nejen ke grafickému zobrazování naskenovaných dat a jejich zpracování, ale také především k řízení celého procesu skenování.

Klasifikace 3D skenerů není zcela jednoznačná – 3D skenery je možné rozdělit mnoha způsoby v závislosti na sledované vlastnosti. Například podle způsobu snímání je rozlišováno mezi kontaktními a bezkontaktními 3D skenery. Podle mobility zařízení lze rozlišovat mezi stacionárními 3D skenery (s rotačním stolem), se kterými se během standardního provozu nemanipuluje a mezi mobilními 3D skenery, které je možné jednoduše přemístit (např. ruční skenery). Dále podle toho, jestli je snímáný objekt během skenování zničen, či nikoli, je možné rozdělit 3D skenery na destruktivní a nedestruktivní atd. Možné rozdělení nejčastěji používaných 3D skenerů je patrné z obrázku 15. [17] [18]



Obrázek 15: Rozdělení 3D skenerů [17] (upraveno)

4.3 Destruktivní 3D skenování

Ve schématu na obrázku 15 je destruktivní metoda 3D skenování uvedena jako druh kontaktních metod. Autor však považuje tuto metodu za zcela speciální – ke kontaktu se skenovaným předmětem dochází pouze při odebírání materiálu (vrstev), nejčastěji prostřednictvím frézy. Samotné snímání bodů pak probíhá nekontaktně pomocí optické kamery. [13]

Destruktivní 3D skener je oproti nedestruktivním 3D skenerům navíc vybaven zařízením sloužícím k odebrání vrstev materiálu, nejčastěji CNC frézkou. Na skenovaný předmět je nanášena vrstva speciálního kontrastního materiálu a předmět je umístěn do vakuové komory, ze které je následně odčerpán vzduch. Vzniklý podtlak způsobí, že se kontrastní látka dostane do všech dutin předmětu. Ten je následně uchycen do frézovacího stolu uvnitř skenovacího zařízení. Snímání předmětu pak probíhá pomocí optické kamery v jednotlivých krocích, mezi kterými je ze snímaného předmětu pomocí frézky vždy odebrána tenká vrstva materiálu. Každý nový povrch je předlohou pro jeden snímek. Z těchto snímků je následně poskládán výsledný 3D model předmětu. Na obrázku 16 je příklad destruktivního 3D skenovacího zařízení – 3D skener CSS-3000 od firmy CGI. Tloušťka odebírané vrstvy tohoto zařízení se pohybuje v rozmezí 0,0127 - 0,254 mm a jeho opakovatelnost je $\pm 0,0127$ mm. [18] [13]



Obrázek 16: Destruktivní 3D skener CSS-3000 [18]

Pomocí takového zařízení je možné digitalizovat součást s velmi složitou vnější i vnitřní geometrií. To je i hlavní výhodou této metody a v praxi se používá především k vytvoření 3D modelu takových součástí. Mezi nevýhody této metody patří nenávratné zničení skenované součásti, což může být v některých případech nepřijatelné. Další nevýhodou je pak relativně dlouhá doba skenování a nutná podmínka snadné obrobitelnosti skenované součásti. Pro zvýšení efektivity skenovacího procesu je možné skenovat více součástí zároveň. [18]

4.4 Kontaktní 3D skenování

Kontaktní (dotykové) 3D skenery jsou zařízení, která využívají k digitalizaci předmětů speciální (dotykové) sondy. Podle způsobu snímání dat lze rozlišit dvě hlavní metody kontaktního skenování: [13]

- snímání bodu po bodu (point-to-point sensing),
- spojitě snímání křivek (analogue sensing).

Snímání jednotlivých bodů probíhá tak, že dotyková sonda při každém styku s tělesem zaznamená právě jeden bod a následně se vzdálí do bezpečné vzdálenosti. Tento proces se opakuje, dokud není nasnímáno dostatečné množství jednotlivých bodů. [13]

Skenování předmětu bod po bodu není příliš efektivní, proto se častěji používá snímání spojitých křivek, kdy kontaktní sonda se po dotyku tělesa začne pohybovat po předem stanovené trajektorii a zaznamená tak až tisíce bodů na povrchu tělesa. [16] [19]

Kontaktní 3D skenery je možné rozdělit podle způsobu polohování snímací sondy na ručně polohovaná a strojově polohovaná zařízení. Mezi nejčastěji používané zástupce kontaktních skenerů patří: [16] [18]

- souřadnicové měřicí stroje,
- skenery na mechanické paži,
- skenery na robotické paži,
- přídatné sondy k NC (případně CNC) strojům se zpětným tokem dat.

Konstrukční uspořádání souřadnicových měřicích strojů a kloubových paží je na první pohled zcela odlišné (viz obrázek 17). Tyto rozdíly se při měření projeví především v přesnosti snímaných dat a v pohybových možnostech zařízení (stupně volnosti). Souřadnicová měřicí soustava poskytuje v porovnání s kloubovými pažemi daleko přesnější údaje o měření. Na druhou stranu robotické paže mají daleko vyšší kinematické možnosti (více stupňů volnosti) a i když je možné naprogramovat souřadnicový měřicí stroj pro snímání křivek na povrchu tělesa, pro digitalizaci velmi složitých povrchů je vhodnější použít snímací zařízení umístěné na kloubových pažích. [16]



Obrázek 17: Kloubové paže a souřadnicový měřicí stroj [13]

4.4.1 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (SMS) jsou zařízení, která představují jednu z nejdůležitějších oblastí ve strojírenské metrologii. Princip SMS spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru a následném určování polohy dalších bodů formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. Možnost určení základního bodu v kterémkoliv místě pracovního prostoru SMS je podstatnou výhodou oproti konvenčním metodám měření. Další výhodou SMS oproti konvenčním metodám je úspora času kontroly součástí, SMS redukuje čas potřebný ke kontrole přibližně o 80%. Vzhledem k podobnému uspořádání konstrukce SMS a obráběcích zařízení (frézek, vrtaček...) jsou SMS zvláště vhodné pro kontrolu dílů vyrobených těmito technologiemi. Na obrázku 18 je vidět SMS LH 87 od firmy Wenzel. [16]



Obrázek 18: SMS LH 87 od firmy Wenzel [20]

Snímací hlavice SMS mohou být jak kontaktní, tak bezkontaktní. Nejznámějším zástupcem bezkontaktních hlavic je laserová sonda. Nejčastěji používané tvary dotkových hlavic jsou: [16]

- kulová,
- kuželová,
- talířová.

Tvary těchto snímací hlavic jsou patrné z Obrázku 19.



Obrázek 19: Tvary měřících dotyků [16]

Speciálním typem měřící sondy je sonda umístěná na obráběcím stroji. Toto uspořádání slouží k aktivní kontrole sledovaných parametrů, jejichž rozměry jsou ovlivněny opotřebením obráběcích nástrojů. Zásadní výhodou tohoto provedení je, že odpadá nutnost transportu obrobků z obráběcího zařízení na SMS a zpět a ušetří se tak měřící operace na SMS. To však neznamená, že by v takovém procesu výroby byla odstraněna potřeba měření na SMS – není zde dodržen zásadní požadavek, aby přesnost měřícího zařízení byla řádově vyšší, než přesnost výrobního zařízení. Tím pádem pro konečnou kontrolu obrobku musí být stejně provedeno měření na SMS. [16]

Proces měření (případně skenování) součásti pomocí sondy upevněné na obráběcím zařízení je tedy principiálně shodný s principem měření (skenování) na SMS, pouze s tím rozdílem, že SMS mají daleko větší přesnost odměřování a navíc jsou vybaveny lepšími zařízeními pro zpracování naměřených dat.

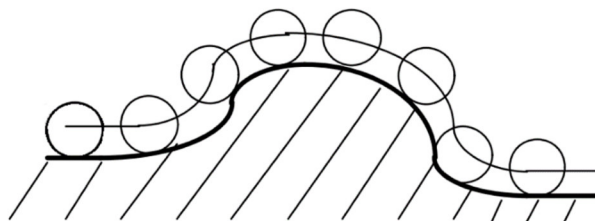
SMS může pracovat v následujících provozních režimech:

- snímání jednotlivých bodů,
- spojitě snímání neznámých tvarů,
- spojitá kontrola úchylky tvaru a křivek,
- skenování.

Princip režimu snímání jednotlivých bodů již byl vysvětlen výše. Proces spojitěho snímání neznámých tvarů probíhá se speciální měřící hlavou vybavenou vlastním odměřovacím zařízením se servopohony. Tato měřící hlava musí udržovat měřící dotyk v neustálém kontaktu s měřenou součástí. Používá se sonda s citlivostí buď na axiální, nebo na radiální vychýlení. Proces spojitě kontroly úchylek tvaru křivek je podobný procesu snímání neznámých tvarů. Jen s tím rozdílem, že teoretické křivky jsou předem známy a zadané buď matematickým popisem anebo sérií významných bodů. Výsledkem je pak porovnání teoretických a skutečných křivek. [16]

Jak vyplývá ze samotného názvu, souřadnicové měřicí stroje jsou zařízení sloužící především k měření důležitých rozměrů a geometrických specifikací různých součástí. Cíl procesu skenování (popsaný v podkapitole 4.1.1) je však odlišný. Proces skenování je převedení fyzického objektu do virtuálního (počítačového) světa. Rozdíl mezi režimem skenování a mezi měřicími režimy SMS tedy dle autora vyplývá přímo z rozdílnosti významů těchto pojmů. V režimu měření je zapotřebí nasnímat pouze body významné pro ověření sledovaných rozměrů a geometrických specifikací. V režimu skenování je zapotřebí nasnímat tolik bodů, aby bylo možné vytvořit 3D CAD model skenovaného předmětu v počítači a to s požadovanou přesností a kvalitou.

Na závěr je třeba podotknout, že výsledkem skenování pomocí kontaktního SMS není množina bodů ležící na povrchu skenovaného tělesa, nýbrž množina bodů, jimiž proložená plocha je ekvidistantou ke skutečné ploše skenovaného tělesa. Plochy jsou od sebe vzdáleny o poloměr kuličky měřicího dotyku, viz obrázek 20 a na tuto skutečnost je třeba pamatovat. [16]



Obrázek 20: Ekvidistantní plocha naskenovaná pomocí SMS [16]

4.4.2 3D skenery s kloubovými rameny

Princip 3D skenerů s kloubovými rameny (pažemi) spočívá v zaznamenávání bodů v prostoru pomocí snímací dotykové sondy umístěné na konci robotické paže s klouby. Poloha bodů v prostoru je zaznamenávána pomocí čidel umístěných v otočných kloubech. Velikost skenovaných objektů je omezena dosahem ramene. Přesnost snímání bodů je řádově nižší, než jak je tomu u SMS nebo u optických zařízení. Výhodou je však nízká cena, rychlost a jednoduchost snímacího procesu, proto tato technologie našla své uplatnění především v netechnických odvětvích, kterými jsou např. filmový průmysl, vývoj počítačových her, či design. [16] [17]

Rozdíl mezi mechanickou a robotickou paží není konstrukční, nýbrž spočívá pouze v tom, že mechanická paže je vedena obsluhou, zatímco robotická je řízena na dálku. Svoje uplatnění tedy nachází v provozech, kde kontrola kvality, či skenování probíhá v nebezpečných prostorech. Konstrukce 3D skenerů s mechanickým, respektive robotickým ramenem je patrná z obrázku 21. [17]



Obrázek 21: 3D skenery na mechanické, respektive robotické paži [13]

4.5 Nekontaktní 3D skenování

Nekontaktní (bezdotykové) 3D skenery jsou zařízení, která jsou schopna digitalizovat fyzické předměty bez mechanického dotyku. Fungují na principech, které jim umožňují v jeden časový okamžik nasnímat více bodů najednou. Snímání dat je tak jednodušší, rychlejší a (může být i) přesnější a efektivnější. Díky těmto vlastnostem jsou bezkontaktní 3D skenery nejrozšířenější a nejpoužívanější variantou 3D skenerů na trhu. [17] [19]

Principiálně fungují na bázi snímání bodů fyzického předmětu pomocí energetických toků, jako je světlo, zvuk, či magnetické pole. Jak již bylo výše zmíněno, rozdělení 3D skenerů není zcela jednoznačné. Dle [2] je možné bezkontaktní 3D skenery obecně rozdělit na reflexní a transmisní. Pokud je vyhodnocován signál (energetický tok), který je od snímaného předmětu odražen, tak se jedná o metodu reflexní. Pokud je vyhodnocován signál, který projde skrz snímaný předmět, tak se jedná o metodu transmisní. Mezi nejpoužívanější transmisní metody patří: [17] [19]

- magnetická rezonance (MRI),
- výpočetní tomografie (CT).

A mezi nejpoužívanější reflexní patří:

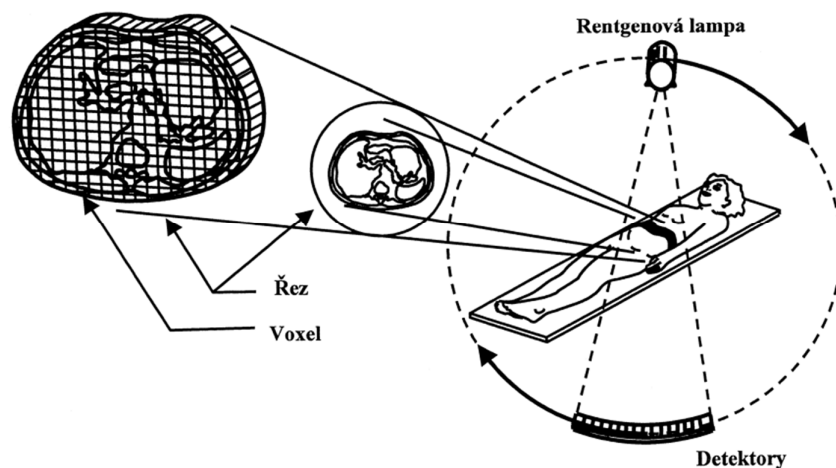
- akustické,
- laserové,
- optické pasivní,
- optické aktivní.

4.5.1 Transmisní 3D skenování

Transmisní metody 3D skenování byly do strojního průmyslu převzaty z medicínského prostředí, proto jsou tyto metody principiálně shodné se zobrazovacími metodami v lékařské diagnostice. Primárně se tyto metody vyvinuly z potřeby rozpoznání příčin nemocí a tedy co možně nejpřesnější diagnostice. Hlavními problémy přesné diagnostiky jsou omezené možnosti „nahlédnutí“ do lidského těla, aniž by došlo k ohrožení pacienta. Vzhledem k tomu, že tyto metody umožňují podat informaci o stavech kostí a orgánů bez nutnosti chirurgického zákroku, jsou stěžejním nástrojem pro moderní medicínu, ve které je jejich místo zcela nezastupitelné. A to až do té míry, že za objevy možností praktického využití těchto metod bylo uděleno několik Nobelových cen. [13] [21]

Tyto metody jsou založeny na tzv. tomografii, což je v medicínském prostředí obecně chápáno, jako jakákoli zobrazovací metoda, která umožňuje zobrazit konkrétní části pacientova těla v detailně naskládaných vrstvách, aniž by bylo zapotřebí chirurgického zákroku. Tyto vrstvy (řezy) jsou následně pomocí počítače „seskládány“ k sobě tak, aby došlo k vytvoření 3D modelu orgánu, či jiné části lidského těla. [22]

Výpočetní tomografie neboli CT je metoda, při které je daný předmět (nebo pacient) umístěn do přístroje, ve kterém po kruhové dráze obíhá zařízení složené z rentgenky a detektorové soustavy. Toto zařízení vysílající rentgenové záření prozáří snímávaný objekt a ze zaznamenaných dat je pomocí matematických algoritmů na obrazovce přístroje zobrazena množina obrazových bodů zvaných voxel. Viz obrázek 22. [21]



Obrázek 22: Princip výpočetní tomografie [21]

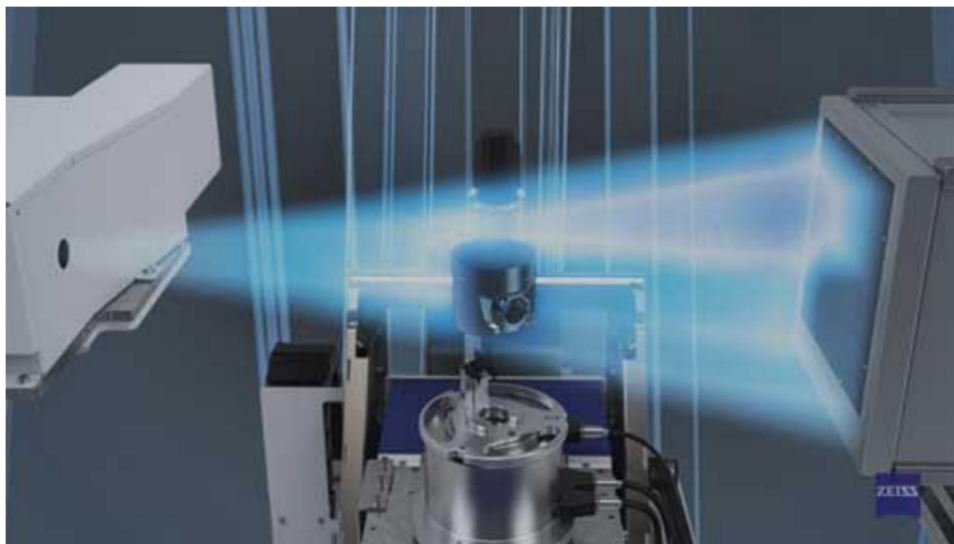
Rentgenové záření, známé také jako Paprsky X vzniká při interakci rychlých elektronů s hmotou a díky své krátké vlnové délce je schopné prozářit i lidské tělo. V závislosti na biochemickém složení orgánů dochází při prozařování lidského těla k tlumení Paprsků X, což umožňuje do značné míry rekonstruovat vnitřní morfologii lidského těla (prozářeného

objektu). Paprsky X byly objeveny již v 19. století, avšak při snímání klasickou metodou se obrazy jednotlivých orgánů překrývají a není tedy možné získat přesný řez, který obsahuje veškeré informace o vnitřní morfologii lidského těla. Tento nedostatek vyřešila právě výpočetní tomografie a její zavedení do lékařské diagnostiky koncem 60. let 20. století. [21]

Magnetická rezonance (MRI) je zobrazovací metoda, která je založena na detekci vodíkových atomů. V lidském těle je většina vodíkových atomů součástí molekul vody, díky tomu může magnetická rezonance snadno odlišit např. bílou (s vyšším obsahem tuku) a šedou (s vyšším obsahem vody) hmotu v lidském mozku. Naproti tomu kosti, které obsahují méně vody, než ostatní tkáně, se zobrazují při MRI jen velmi málo. Díky tomu je MRI výbornou metodou pro zobrazování mozku, jelikož lehce proniká lebkou. Obecně platí, že pro zobrazování kostí se více hodí CT a pro zobrazování měkkých tkání MRI. [22]

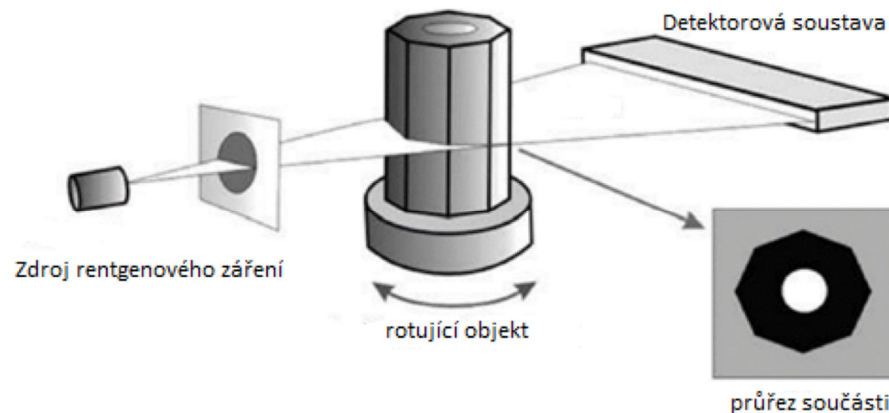
Obě metody mají svá úskalí, která je třeba vzít v potaz. Je obecně známo, že Paprsky X, na jejichž základě funguje CT, mohou při opakovaném intenzivním průchodu lidskou tkání modifikovat nebo i zcela zničit genový kód ozářených buněk a v nejhorším případě tak způsobit zhoubné rakovinové bujení. MRI na rozdíl od CT žádné nežádoucí účinky na lidské tělo nemá. Není možno opomenout skutečnost, že při vyšetřování metodou MRI dochází ke vzniku velmi silného magnetického pole, které může svým působením poškodit elektronické zařízení, kterým je např. kardiostimulátor nebo uvést do pohybu kovové předměty, jakými jsou různé implantáty nebo střeptiny, které se mohou nacházet v tělech pacientů. Navíc v porovnání s ostatními metodami zobrazování je MRI velmi energeticky a finančně nákladná metoda. [21]

Hlubší popis a zejména objasnění fyzikálního a matematického pozadí obou zmíněných metod je uveden v [21].



Obrázek 23: Vizualizace 3D skenování metodou CT [23]

V kontextu strojínského inženýrství jsou potřeby a možnosti využití metod CT a MRI evidentní z výše zmíněných skutečností. Vedle destruktivní metody 3D skenování jsou tyto metody jediným způsobem, jak nasnímat vnitřní strukturu strojních dílů a součástí. Svě zastoupení mají např. při kontrole potrubí, kotlů a jiných uzavřených nádob. Na obrázku 23 je vidět vizualizace 3D skenování strojní součásti metodou CT, schématický popis je patrný z obrázku 24. [17]



Obrázek 24: Schéma 3D skenování metodou CT [13] (upraveno)

4.5.2 Ultrazukové 3D skenování

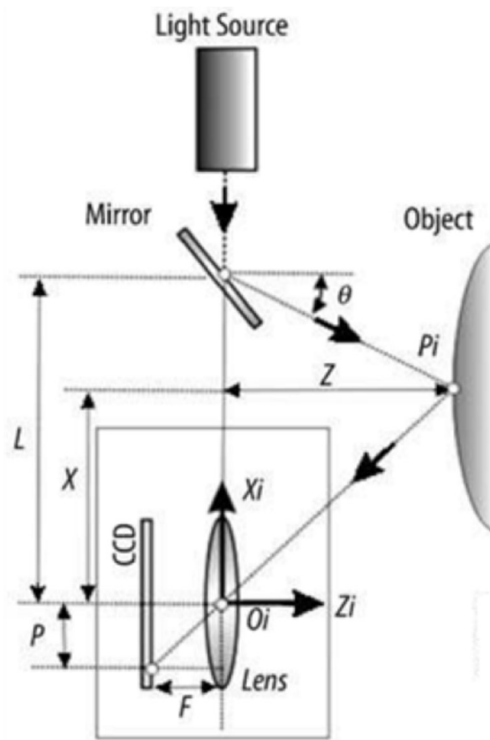
Další metodou 3D skenování, jež má svůj původ v lékařském prostředí je ultrazukové 3D skenování. Tato metoda se z technického hlediska liší od CT a MRI tím, že není transmisní, nýbrž reflexní – vyhodnocován je signál odražený od povrchu snímaného objektu. Ultrazuk je akustické vlnění, jehož frekvence leží v rozsahu 20 kHz až 1 GHz. Samotné skenování probíhá tak, že se ke snímanému povrchu přiloží ultrazuková sonda a dojde k vyslání ultrazukového signálu. Při každé interakci signálu se skenovaným objektem dojde k pohlcení, rozptýlení a odražení částí signálu. Odražené části signálu jsou zachyceny ultrazukovými čidly a dekodovány do prostorových souřadnic, které jsou dále zpracovány počítačem. Výhodou akustických skenerů oproti ostatním zobrazovacím zařízením je jejich relativně nízká pořizovací cena. Nevýhodou je pak jejich nižší přesnost pohybující se řádově mezi 0,3 až 0,5 mm. [21] [18]

4.5.3 Laserové 3D skenování

Technologie laserového 3D skenování je dalším zástupcem skupiny reflexních skenovacích metod. Princip je velmi podobný jako u ultrazukové metody – zařízení se skládá z vysílače, který směrem ke skenovanému předmětu vyšle signál – laserový paprsek. Paprsek se od povrchu odrazí a následně je zachycen pomocí CCD/CMOS snímače. Data ze snímače následně slouží k určení souřadnic bodů skenovaného předmětu a k rekonstrukci

počítačového 3D modelu. K určení souřadnic zaznamenaných bodů se u laserových 3D skenovacích zařízení používá buď metoda triangulace, nebo metoda měření doby letu (TOF). [18]

Triangulace je metoda, kterou k výpočtu souřadnic používá většina laserových 3D skenerů. Poloha snímaných bodů je určena výpočtem na základě známých hodnot vzdálenosti a úhlu natočení zdroje paprsku (respektive zrcadla) vůči snímači. Princip je patrný z obrázku 25, kde je znázorněno schéma triangulační metody s využitím jednoho CCD snímače (kamery). [13]



Obrázek 25: Triangulační metoda [13] (upraveno)

Laserový paprsek je ze zdroje (Light Source) promítnut přes zrcadlo (Mirror) na skenovaný předmět (Object), odkud je následně odražen a přes čočku (Lens) zachycen snímačem CCD. Vzhledem k tomu, že hodnota vzdálenosti L [mm] je předem známa z kalibrace přístroje, je možné při nastavených (známých) hodnotách vzdáleností F [mm] a P [mm] a úhlu θ [rad] dopočítat hledané souřadnice polohy Z [mm] a X [mm] bodu P_i pomocí vzorců 4.1. [13]

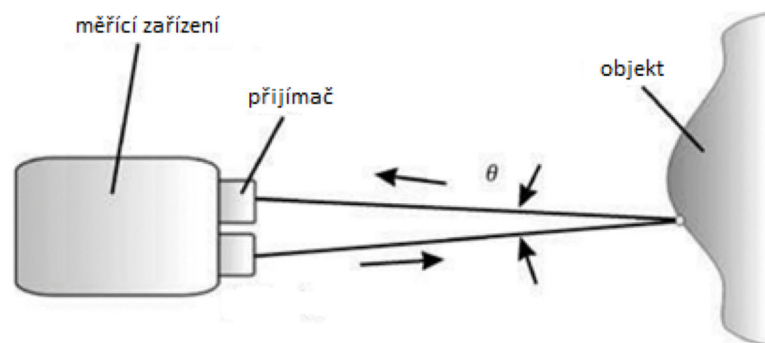
$$Z = \frac{F \cdot L}{P + \tan \theta} \quad (4.1)$$

$$X = L - Z \cdot \tan \theta$$

Metoda měření doby letu (TOF) je založena na měření času, za který laserový paprsek doletí ke snímanému objektu a vrátí se zpět. Díky známé hodnotě rychlosti světla lze vzdálenost $D [m]$ snímaného objektu od zdroje světelného záření teoreticky lehce spočítat pomocí vzorce 4.2. [13]

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (4.2)$$

$c [m/s]$ je rychlost světla a $t [s]$ je doba letu laserového paprsku tam a zpět. Snímání touto metodou je schematicky znázorněno na obrázku 26, přičemž úhel $\theta [rad]$ bývá pro veškeré praktické účely zanedbáván. Hlavní využití této metody je pro skenování velkých a vzdálených objektů. [13] [18]



Obrázek 26: Metoda měření doby letu [13] (upraveno)

4.5.4 Optické 3D skenování

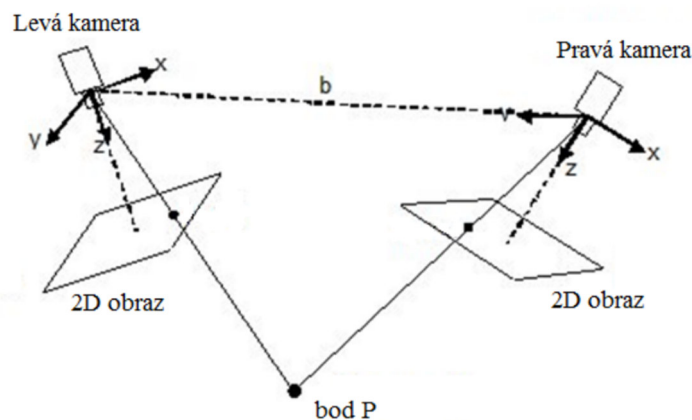
Optické 3D skenování je v praxi nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda 3D skenování. Její princip spočívá ve vyfocení předmětu z několika různých stran a následném složení 3D CAD modelu z jednotlivých 2D snímků. K tomu se používá fotoaparát s CCD snímačem. Počet nutných snímků je úměrný složitosti skenovaného předmětu. K natočení předmětu se většinou používá otočný stůl s krokovým motorem. Pro přesnější skládání jednotlivých snímků je vhodné skenovaný předmět opatřit pomocnými značkami. Pokud je skenovaný předmět příliš lesklý nebo tmavý, je zapotřebí, nanést barvu (křídový sprej) na povrch předmětu, aby jej skener lépe „viděl“. V tomto případě je však nutno počítat s určitým zkreslením způsobeným nenulovou tloušťkou nanesené vrstvy. [17] [24]

Optické 3D skenery lze rozdělit podle toho, zda emitují nějaký energetický tok (obsahují zdroj osvětlení) na: [17]

- aktivní,
- pasivní.

Během pasivních metod optického skenování tedy nedochází k vysílání žádného energetického toku a energie je pouze přijímána. Základním principem je v tomto případě nasnímání minimálně dvou (zpravidla více) snímků buď natočením objektu, nebo změnou polohy snímače anebo pomocí více kamer se známou orientací a polohou. [17]

Nejčastěji používaná metoda pasivního skenování se nazývá stereoidění. Její princip je podobný principu, jakým pracuje lidský zrakový systém při odhadu vzdálenosti. Místo očí jsou však použity dva CCD snímače, jejichž vzájemná poloha je předem známa, stejně jako vzájemné natočení. Výsledná poloha snímaného bodu v prostoru je pak dopočtena pomocí triangulace. Princip je patrný z obrázku 27. [26]



Obrázek 27: Stereoidění [25]

Optické aktivní metody 3D skenování spočívají v nasvícení povrchu skenovaného předmětu světelným zdrojem a současným snímáním jednotlivých bodů povrchu pomocí CCD/CMOS snímačů. Při transformaci trojrozměrného objektu na dvojrozměrný obraz však dochází ke ztrátě informace o poloze jedné souřadnice. Tato souřadnice bývá nazývána Z a jedná se o vzdálenost měřeného předmětu od pozorovatele (senzoru). K určení tohoto neznámého třetího rozměru se používají následující tři metody: [26]

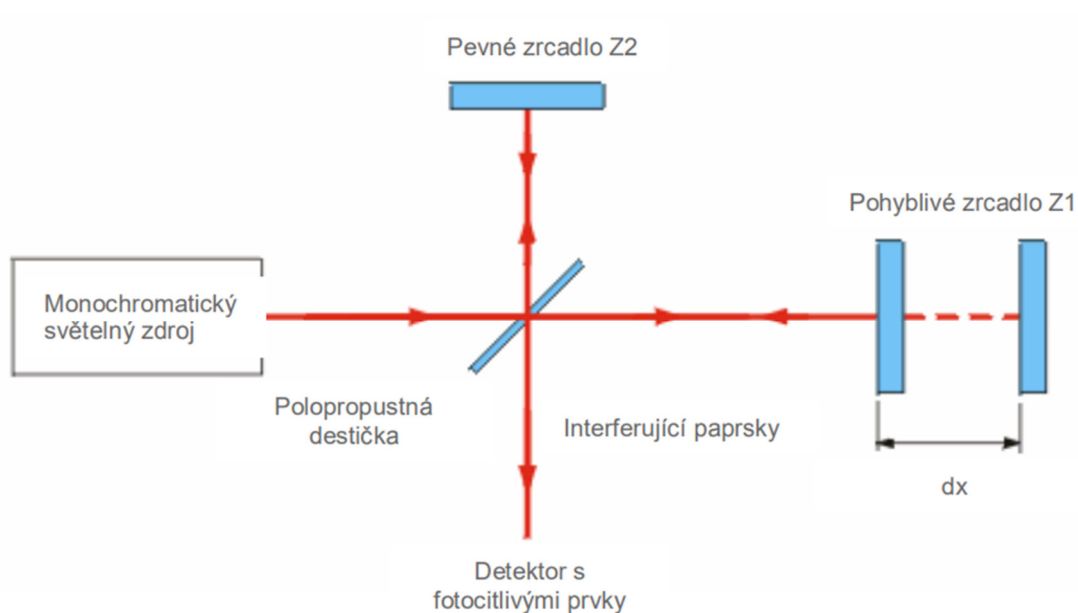
- triangulace,
- měření doby letu (TOF),
- interferometrie.

Princip TOF a triangulace již byl popsán v podkapitole 4.5.3., přičemž triangulaci lze podle použitého světelného vzoru rozdělit na: [18]

- 1D triangulaci – světelným vzorem je bod (na těleso dopadá paprsek),
- 2D triangulaci – světelným vzorem jsou pruhy (pruhová projekce),
- 3D triangulaci – světelným vzorem je strukturovaný světelný svazek (nejčastěji světelný kříž).

Nejčastěji používaný způsob triangulace je 2D triangulace (pruhová projekce). Při interakci světelných pruhů se skenovaným předmětem dojde k vytvoření křivek na povrchu předmětu. Tyto křivky jsou detekovány a následně jsou pomocí triangulace vypočteny souřadnice X , Y , Z stovek bodů nacházejících se na těchto křivkách. [13]

Optická interferometrie je založena na principu měření doby letu koherentního záření. Její princip spočívá v použití polopropustné destičky zpravidla natočené oproti světelnému zdroji o 45° . Destička světelný paprsek rozdělí na měřený a referenční. Referenční paprsek dopadá na pevné zrcadlo $Z2$, odkud se následně odrazí. Měřený paprsek se odráží od snímaného předmětu, na obrázku 28 od pohyblivého zrcadla $Z1$. Oba paprsky pak spolu interferují a výsledek je zachycen detektorem s fotocitlivými prvky (např. fotodioda nebo CCD čip). Tímto lze získat relativní změnu vzdálenosti snímaných bodů dx a po kalibraci i absolutní vzdálenost předmětu od světelného zdroje. [18] [26]



Obrázek 28: Princip interferometru [18]

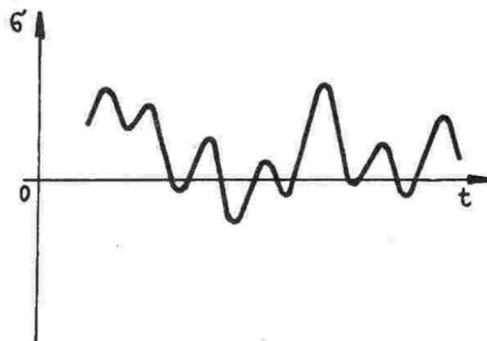
5 Únava strojních součástí

Jedním ze základních požadavků, který je na svorky stabilizátorů kladen, je zaručení spolehlivého a bezpečného provozu. K naplnění tohoto cíle je třeba znát jejich mechanické vlastnosti, neboť ty udávají míru schopnosti odolávat vnějším silovým účinkům. Vzhledem k tomu, že svorka je po celou dobu své životnosti namáhána v čase proměnném zatížením, nejdůležitější jsou z hlediska dimenzování svorek jejich únavové vlastnosti.

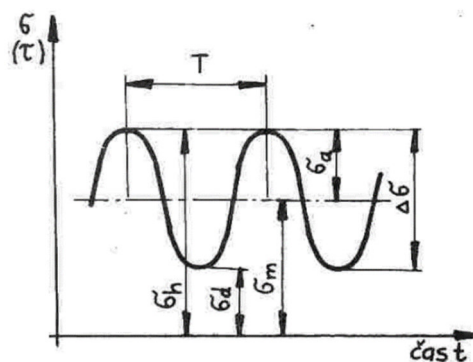
Únava materiálu je jev, který se vyskytuje u součástí, které jsou dlouhodobě vystavovány v čase proměnnému silovému působení. Únavový lom je pak jedním z mezních stavů konstrukce, který může způsobit porušení její funkční způsobilosti. [27]

5.1 Kmitavé zatížení a únavový lom

Většina strojních součástí je v provozu vystavena nějakému silovému působení. Silové působení může být neměnné (statické), ale daleko častěji se vyskytují případy, kdy je součást namáhána v čase proměnným – kmitavým zatížením. To zpravidla mívá obecný, nepravidelný průběh (viz obrázek 29), avšak pro účely modelování je vhodnější uvažovat cyklický, respektive harmonický průběh zatěžování, viz obrázek 30. [27]

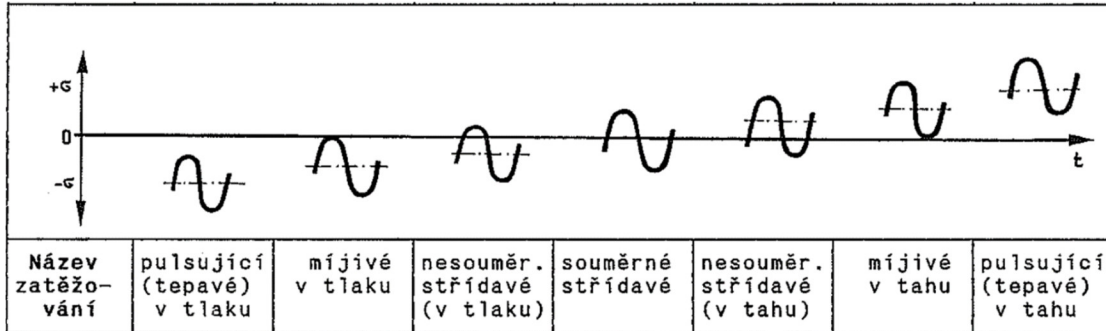


Obrázek 29: Náhodný průběh napětí v čase [27]



Obrázek 30: Harmonický průběh napětí v čase [27]

Velikost kmitu napětí je možné jednoznačně popsat dvojicemi hodnot σ_a a σ_m [N/mm^2], případně σ_h a σ_d [N/mm^2]. Na základě těchto hodnot lze také klasifikovat typy zatížení, patrné z tabulky v obrázku 31. [27]

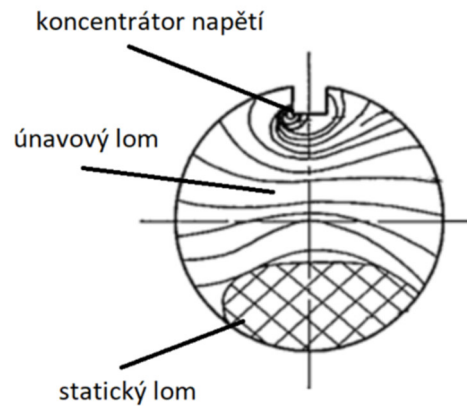


Obrázek 31: Druhy harmonického zatížení [28]

Obecně lze v každém procesu kmitavého zatížení určit složku deterministickou a složku stochastickou. U proměnlivých zatížení, která v praxi namáhají strojní součásti, převažuje většinou složka náhodná, podle průzkumů je tomu tak až u 80% vyskytujících se zatížení. [28]

Při opakovaném zatěžování dochází v materiálu ke kumulaci poškození, z nichž nejvýznamnější je vznik plastické deformace v mikroobjemech materiálu. Tyto deformace postupně vytvářejí mikrotrhliny, které se následně spojují do makrotrhlin. Trhliny se postupně šíří materiálem, přičemž při nízké intenzitě zatěžování se může trhлина rozvíjet velmi dlouho (třeba i roky). Když dojde k zeslabení původního profilu natolik, že již není schopen přenášet statické zatížení, dojde náhle k lomu. Zajímavé je, že úroveň maximálního zatížení může být natolik nízká, že by ji daná konstrukce při statickém zatížení vydržela bez porušení po neomezeně dlouhou dobu. [28]

Vznik prvotní mikrotrhliny většinou probíhá v povrchové vrstvě materiálu v nějakém koncentrátoru napětí. V této oblasti je lom lesklý a ohlazený od malých posuvů, může být i zkorodovaný. Když postupující trhлина sníží průřez natolik, že již není schopen přenášet statické zatížení, dojde k lomu, který je hrubozrný a bez zřetelných trvalých deformací. Vzhledem k tomu, že v prvních fázích probíhá proces poškození bez jednoduše viditelné plastické deformace, je detekce únavových trhlin poměrně náročná a právě v tom spočívá nebezpečí, které je se vznikem únavových lomů spojeno. Vzhled lomové plochy je patrný z obrázku 32. [27] [28]



Obrázek 32: Vzhled lomové plochy [1] (upraveno)

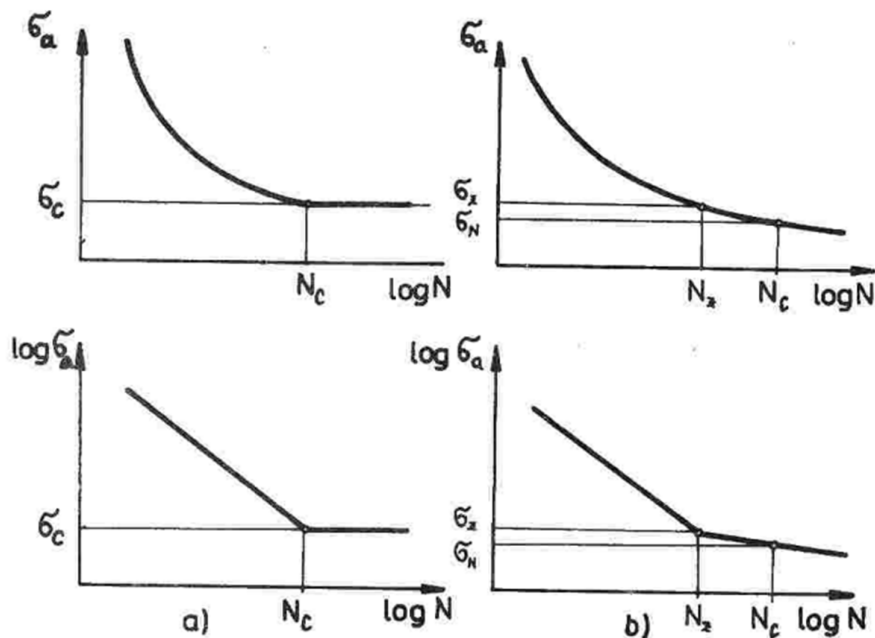
5.2 Wöhlerova křivka

Výše popsaný jev byl poprvé zaznamenán německým inženýrem W. A. J. Albertem roku 1829. Systematický a experimentální výzkum únavy materiálu započal v druhé polovině 19. století německý inženýr August Wöhler, který zformuloval závěry, které mají obecnou platnost dodnes: [27]

- Pro únavový lom je rozhodující počet změn zatížení (počet cyklů), nikoli doba provozu.
- Primární vliv na poškození materiálu má rozdíl maximálního a minimálního napětí v kritickém místě. Absolutní velikost napětí má až druhořadý vliv.
- Z experimentálních měření lze stanovit mezní napětí, pod nímž již k únavovým lomům nedochází – tzv. mez únavy.
- Geometrické vruby fungující jako koncentrátoři napětí snižují únavovou pevnost o hodnotu závislou na tvaru vrubu a vlastnostech použitého materiálu.
- Výsledky experimentálních měření lze znázornit v souřadnicích napětí – počet kmitů (cyklů), dnes známé jako Wöhlerovy (nebo S-N) křivky.

Wöhlerovy křivky je možné znázorňovat v logaritmických, či semilogaritmických souřadnicích, kde na svislé ose se nachází velikost amplitudy napětí a na vodorovné ose počet cyklů do lomu. [27]

Dle velikosti amplitudy kmitu lze rozdělit Wöhlerovu křivku na oblast s trvalou pevností a oblast s časovanou pevností. Hranicí těchto oblastí tvoří mez únavy σ_c [N/mm^2] a jí příslušný počet cyklů N_c [–]. Výskyt meze únavy je typický pro většinu uhlíkových ocelí, naproti tomu slitiny hliníku a vysokopevnostních ocelí se mez únavy vyskytovat nemusí, viz obrázek 33. [27]



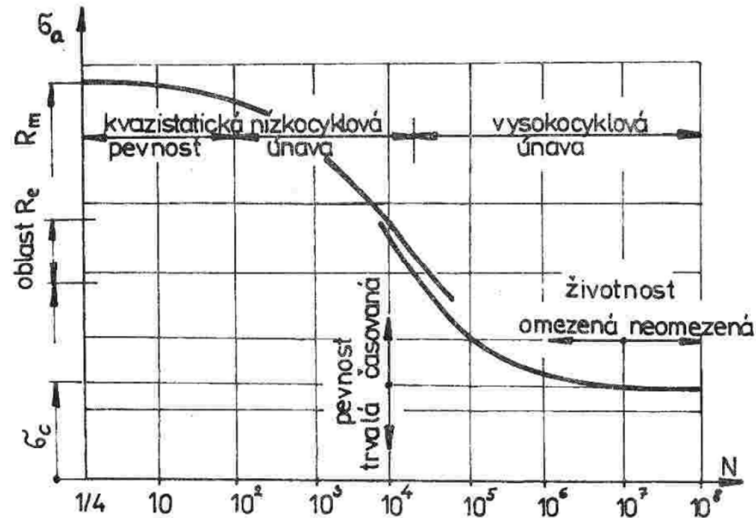
Obrázek 33: Tvary Wöhlerových křivek [27]

Podle jiných kritérií lze rozdělit křivku počtu kmitů do lomu na tři typické oblasti: [27]

- Oblast kvazistatického lomu – k porušení dojde již při prvním kmitu, nebo během prvních několika desítek kmitů. Nejedná se o únavový proces a lomová plocha vykazuje stejné známky jako u statického porušení.
- Oblast nízkocyklové únavy – k porušení dojde v rozmezí 10^2 až 10^5 kmitů. V materiálu dochází k cyklické plastické deformaci. Pro oblast 10^4 až 10^5 kmitů je charakteristická diskontinuita Wöhlerovy křivky, svědčící o změně mechanismu porušení.
- Oblast vysokocyklické únavy – zahrnuje životnost vyšší, než $5 \cdot 10^4$ kmitů. Únavový lom je charakterizován hladkým, světlým povrchem, bez známek plastické deformace a je tedy odlišný od zbytku lomové plochy tvořené náhlým, kvazistatickým odtržením průřezu s plastickou deformací.

Tyto oblasti jsou znázorněny na obrázku 34. Je třeba však podotknout, že přesné rozhraní jednotlivých oblastí není zcela jednoznačné. [27]

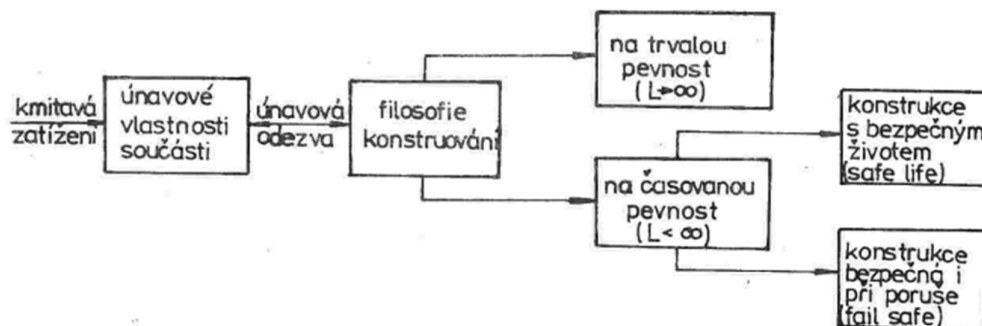
Pro konstrukční ocele bývá počet cyklů odpovídající mezi únavy uváděn jako hodnota $N_c = 10^7$ cyklů. [28]



Obrázek 34: Členění oblastí únavy [27]

5.3 Filozofie dimenzování na únavu

Při dimenzování strojních součástí s ohledem na únavovou životnost je nutné vzít v potaz pracovní prostředí dané součásti. Nejstarším a stále nejběžnějším přístupem je dimenzování součástí na trvalou pevnost, tzn. pod mez únavy s dostatečnou bezpečností (řádově 1,5 až 4). Důsledkem tohoto přístupu však může být zbytečně robustní zařízení s nízkou efektivitou. Všechny strojní součásti totiž nemusí být nutně dimenzovány pro nekonečnou životnost. Příkladem budiž čep ve dveřích auta, který by po dobu 15 let musel být namáhán 1 825x za den, než by se dostal k počtu cyklů odpovídající mezi únavy. Na druhou stranu existují součásti, které se k mezi únavy dostanou během několika hodin svého provozu – např. ojnice v motoru. Konstrukce s časovanou pevností se mohou dimenzovat buď s přístupem safe-life, kdy není přípustné porušení žádného prvku konstrukce, anebo s přístupem fail-safe, kdy je konstrukce navržena tak, že i při poruše libovolné součásti nedojde k selhání celé konstrukce, viz obrázek 35. [1] [27] [28]

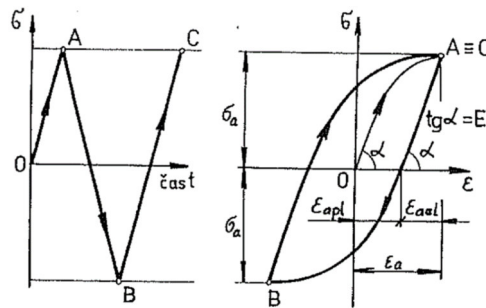


Obrázek 35: Schéma konstruování s ohledem na únavu

5.4 Mechanické vlastnosti materiálu při cyklickém zatěžování

Statické vlastnosti materiálů bývají standardně zjišťovány na základě statické zkoušky v tahu. Na základě měření jsou pak z tahového diagramu odvozeny hodnoty meze kluzu, či konvenční meze pevnosti v tahu atd. [27]

Při cyklickém zatěžování je možné znázornit deformační odezvu materiálu pomocí hysterezní smyčky. Příklad hysterezní smyčky po prvním zatěžovacím cyklu je patrná z obrázku 36. [27]

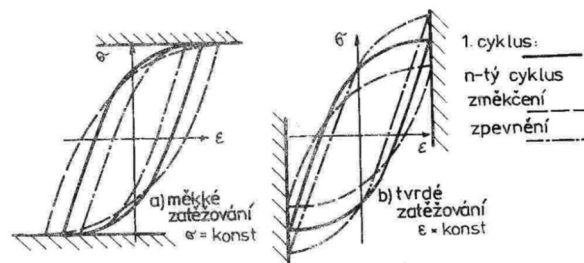


Obrázek 36: Hysterezní smyčka po prvním zatěžovacím cyklu [27]

Amplituda celkového poměrného prodloužení ε_a [–] je tvořena součtem plastické a elastické složky dle rovnice (6.1): [27]

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ael} + \varepsilon_{apl} \quad (6.1)$$

Během dalšího zatěžování si lze povšimnout, že tvar hysterezní smyčky se mění a projevuje se buď cyklické zpevňování, nebo cyklické změkčování. Hysterezní smyčka se mění dle způsobu řízení zkoušky, viz obrázek 37. [27]



Obrázek 37: Změny tvaru hysterezních smyček [27]

Dalším důležitým jevem je tzv. paměťový efekt, který způsobuje, že cyklická deformační odezva je závislá na historii zatěžování. [27]

Významnou charakteristikou při cyklickém zatěžování je cyklická deformační křivka, kterou lze aproximovat mocninnou závislostí dle vztahu (6.2), kde K' [N/mm^2] je modul cyklického zpevňování a n' [–] je exponent cyklického zpevňování. Tyto konstanty se určují na základě experimentálních měření. [27]

$$\sigma_a = K' + \varepsilon_{apl}^{n'} \quad (6.2)$$

6 Analýza procesu prototypové výroby svorek stabilizátorů

Požadavek na optimalizaci procesu výroby svorek vznikl ve vývojevém oddělení firmy Mubea. V tomto oddělení probíhá především prototypová výroba (v užším slova smyslu, viz úvod), kontrola a měření svorek. Jiné procesy související s výrobou (v širším slova smyslu) však probíhají v jiných odděleních zmíněné firmy. Těmito procesy jsou například: tvorba geometrie (tvaru) svorky, či MKP analýza procesu lisování a experimentálních měření únavových vlastností svorek. Tato skutečnost způsobuje řadu komplikací, příkladem budiž nekompletní informace pro výpočtáře, kteří provádí MKP analýzy. Pokud výpočtáři nemají kompletní informace o procesech souvisejících s výrobou a s experimentálním měřením, tak nemohou do svých modelů zahrnout všechny okolnosti a dochází tak ke zkreslení spočítaných výsledků. Tento stav je také žádoucí změnit, v rámci této práce se však autor bude věnovat optimalizaci procesů probíhajících ve zmíněném oddělení. Jedná se tedy o:

- Proces návrhu rozměrů výchozího polotovaru svorky a proces tvorby modelů výrobních nástrojů.
- Proces kontroly funkčních rozměrů svorky pomocí 3D skenovacího zařízení – tvorba 3D SCAN modelu svorky a jeho vyhodnocení.
- Proces experimentálního měření únavových vlastností svorek.

Postup tvorby výchozího polotovaru pro svorky je poměrně jednoduchý. Často se však stává, že po výrobě prvních prototypů je nutné rozměry polotovaru upravit, jelikož rozměry vylišované svorky nespĺňují požadované tolerance. Tato situace není nikterak „katastrofální“ a firma s ní počítá. V rámci optimalizace procesu výroby je však samozřejmě žádoucí navrhnout metodiku, pomocí které bude možné určit rozměry polotovaru, které již nebude nutné po výrobě měnit.

Situace ohledně procesu tvorby modelů výrobních nástrojů je do jisté míry podobná právě popsané situaci procesu návrhu polotovarů. Nezřídka nastane stav, kdy je nutné nechat výrobní nástroj „přefrézovat“, aby produkty splňovaly požadované parametry. Rozdíl však spočívá v tom, že k metodice návrhu polotovarů existují alternativy založené na zcela odlišných principech. K procesu tvorby modelů nástrojů žádné alternativní metodiky fungující na jiných principech nalezeny nebyly a pravděpodobně ani neexistují. Stejně je však žádoucí tento proces popsat, zhodnotit a případně navrhnout možné úpravy a vylepšení.

Proces tvorby 3D SCAN modelu svorky pomocí 3D skenovacího zařízení je v porovnání s ostatními procesy ve firmě poměrně novinkou. Na rozdíl od výše zmíněných procesů zde není problém s výsledky. 3D SCAN modely svorek odpovídají představě, jak by měly vypadat a splňují svůj účel. Problém však spočívá v tom, že tento proces zahrnuje větší množství úkonů, z nichž některé nejsou vždy obsluhou dodržovány, anebo dokonce nejsou obsluze ani známy. Vzhledem k tomu, že autor má již s tvorbou 3D SCAN modelů svorek zkušenosti, je po něm požadováno tento proces podrobně popsat včetně různých tipů a rad tak, aby i nově zaškolená obsluha 3D skenovacího zařízení byla schopna vytvářet 3D SCAN modely svorek v požadované kvalitě.

Požadavek na vyhodnocení 3D SCAN modelu svorky je principiálně shodný s požadavkem na jeho tvorbu – nejedná se o návrh nové metodiky, nýbrž o detailní popsání v současné době používaného procesu.

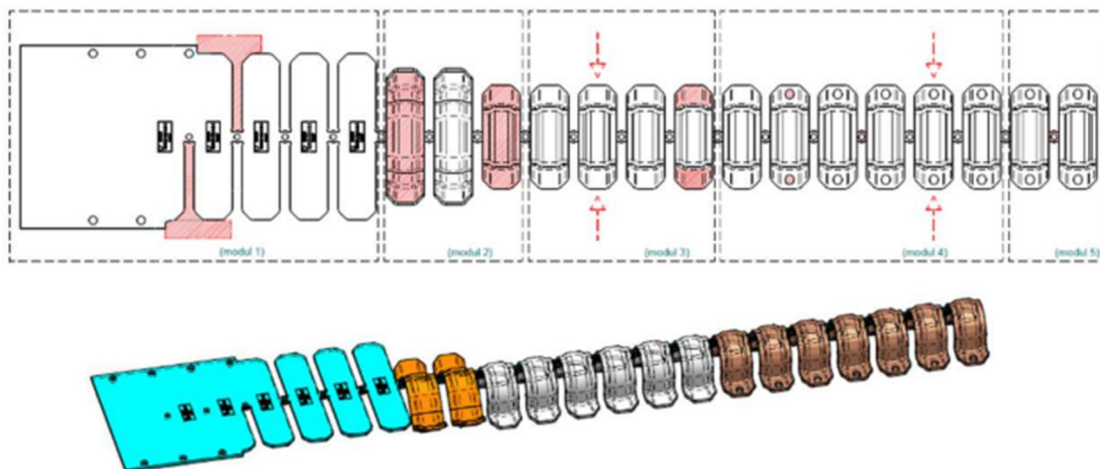
Potřeba optimalizovat proces experimentálního testování únavových vlastností svorek je způsobena současnou situací, kdy výsledky těchto měření nejsou ve shodě se závěry MKP analýz. Tato nežádoucí situace je způsobena řadou okolností, které by bylo dobré odstranit. V první řadě však musí dojít k jejich identifikaci, proto je třeba provést rozsáhlejší měření s mnoha vzorky. V dalších krocích pak může dojít k úpravě, či odstranění faktorů, které způsobují zkreslení dat.

7 Výroba svorek

Svorky jsou vyráběny pomocí technologie tváření, respektive ohýbání a stříhání. Jejich výroba však probíhá odlišně v závislosti, zda se jedná o prototypovou, či sériovou produkci.

7.1 Rozdíl mezi prototypovou a sériovou výrobou svorek

V sériové výrobě není radno uspěchat proces návrhu výrobních nástrojů, polotovarů a postupu výroby. Je požadováno, aby byl proces navržen tak, že po svém spuštění poběží sám bez významných vnějších zásahů. Důraz je pak především kladen na rychlost a efektivitu výroby. Naproti tomu v prototypové výrobě je snahou minimalizovat čas návrhu nástrojů a rozměrů polotovarů – prototypy musí být vyrobeny co nejdříve a není tak podstatné, zdali se svorka vyrábí na dvě, či na tři operace. Do procesu lze bezproblémově zasahovat a upravovat parametry výroby tak, aby bylo dosaženo maximální kvality výrobků. Snahou prototypové výroby je tedy při minimalizaci výrobních nákladů a času vyrobít prototypy svorek s dostatečnou přesností, aby výsledná data sloužila jako kvalitní základ pro návrh sériové výroby. Rozdílnost těchto procesů lze demonstrovat pomocí obrázku 38, který znázorňuje proces (sériové) výroby pomocí postupových nástrojů, zatímco prototypová výroba probíhá na ručních lisech z předem nařezaných polotovarů.



Obrázek 38: Sériová výroba svorky postupovým lisováním

Vzhledem k tomu, že proces výroby má vliv na výsledné geometrické i mechanické vlastnosti výrobků, je nutné rozlišovat mezi prototypovými a sériovými svorkami a to ve všech ohledech. Zejména pak při simulaci procesu výroby je důležité pracovat s prototypovými nástroji, polotovary, lisovacími silami a výsledky porovnávat s příslušnými fyzickými díly.

7.2 Prototypová výroba svorek

Prototypová výroba svorky (v širším kontextu) začíná ve zmíněném vývojovém oddělení v okamžiku, kdy je obdrženo CAD model svorky s výrobním výkresem a dalšími doplňujícími informacemi. Ukončena je ve chvíli, kdy dojde k ověření veškerých požadavků, na jejich základě je dále rozhodnuto, zdali se zahájí sériová výroba, či nikoli.

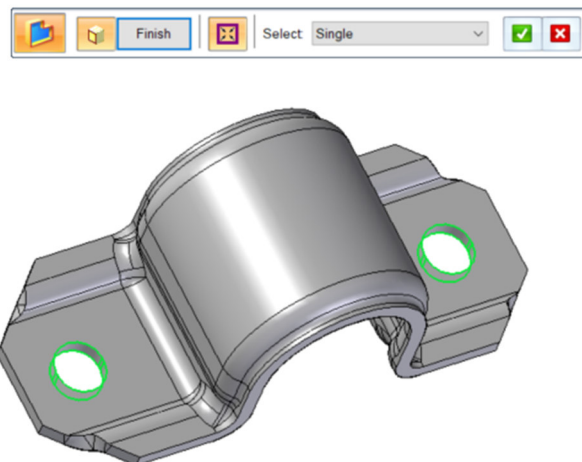
Tato kapitola je zaměřena na výrobu svorky v užším kontextu, tedy na proces končící výrobou fyzických dílů. Tento proces standardně probíhá ve třech krocích:

- 1) Návrh rozměrů výchozího polotovaru (též zvaného „platina“).
- 2) Návrh sledu výrobních kroků (počet lisovacích operací).
- 3) Tvorba výrobních nástrojů.

7.2.1 Určení rozměrů polotovaru svorky

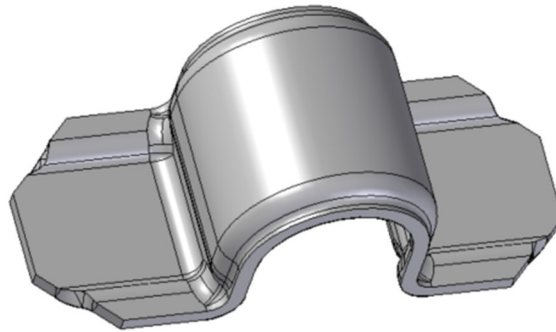
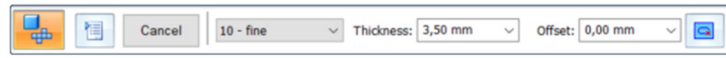
K určení rozměrů polotovaru svorky se standardně používá funkce „Flatten“ v programu Solid Edge. Postup je následující:

- 1) Původní model svorky je zbaven děr pomocí příkazu „Delete faces“, viz obrázek 39.



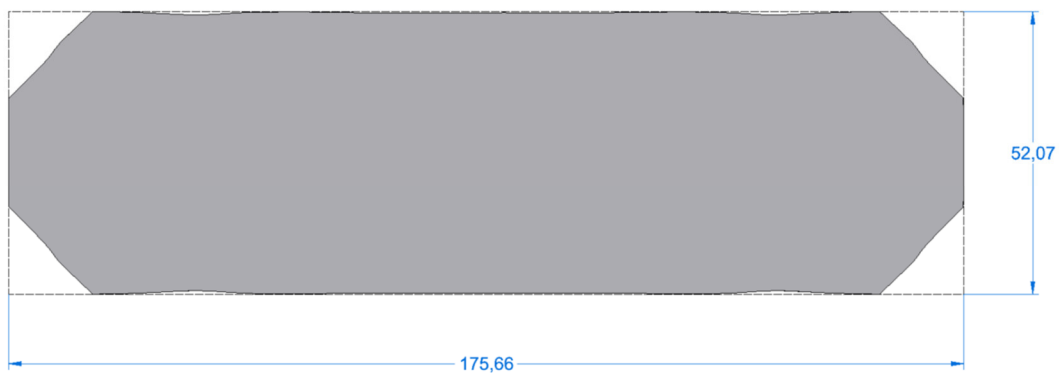
Obrázek 39: Odebrání děr modelu svorky

- 2) V dalším kroku je svorka nástroje „Flatten“ rozvinuta do plechového polotovaru, viz obrázek 40.



Obrázek 40: Model svorky před rozvinem

Z obrázku 41 je patrné, že rozvin získaný touto metodou není zcela pravidelný tvar.



Obrázek 41: Rozvin modelu svorky pomocí funkce „Flatten“

3) Pro zjednodušení výroby je tedy výsledek upraven, viz obrázek 42.



Obrázek 42: Upravený rozvin svorky

7.2.2 Porovnání s teoreticky přesnými rozměry

Jakým způsobem funguje popsaná metoda rozvinu, není zcela jisté. Pravděpodobně pracuje se zákonem stálosti objemu (viz podkapitola 3.1.2.), nicméně z praxe jsou známé případy, kdy svorka vylisovaná z polotovaru navrženého touto metodou nespĺňovala požadované tolerance. Proto je žádoucí využít teoretických poznatků z kapitoly 3 a ověřit „počítačový“ výsledek. Pro ověření bude použit vzorec (3.7) s tabulkou z obrázku 43.

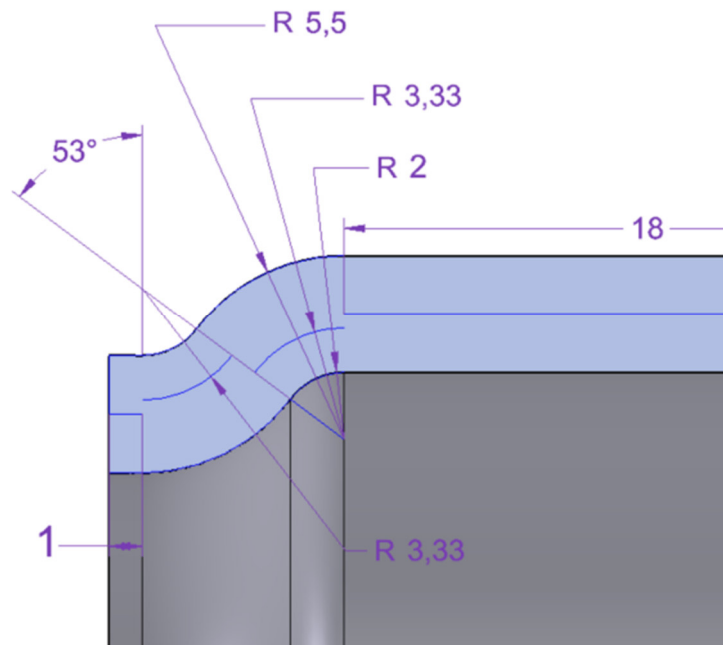
r/s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	nad 5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,50

Obrázek 43: Hodnoty součinitele posunutí neutrální osy [29] (upraveno)

Pro názornost je připomenut vzorec (3.7) :

$$\rho = r + x \cdot s$$

Jak je patrné z obrázku 40, tloušťka (thickness) plechu, z kterého je tato svorka vyroben, je 3,5 mm. Neutrální vlákno v příčném směru svorky je pro názornost (včetně zakótování) načrtnuto přímo do modelu svorky, viz obrázek 44.



Obrázek 44: Náčrt neutrálního vlákna v příčném směru

Poměr vnitřního poloměru k tloušťce plechu odpovídá přibližně hodnotě součinitele posunutí neutrální vrstvy:

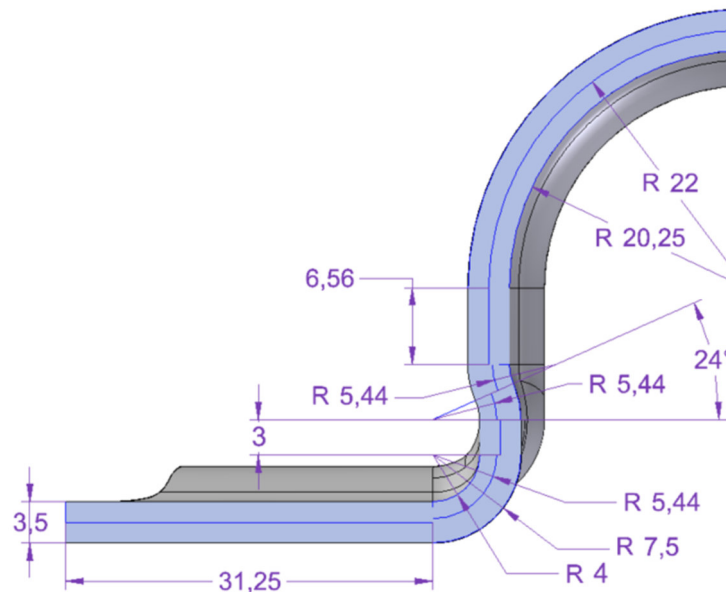
$$\frac{r}{s} = \frac{2}{3,5} = 0,571 \Rightarrow x_1 = 0,37$$

Výsledná délka neutrálního vlákna je pak určena součtem délek všech rovných (neohnutých) částí a součtem délek neutrálních vláken ve všech ohybech. Délka neutrálního vlákna se v příslušném místě ohybu spočte vztahem (3.8):

Po dosazení příslušných hodnot do vztahu (3.8) je celková délka neutrálního vlákna v příčném směru svorky:

$$l_{př} = 2 \cdot \left(1 + 18 + \frac{\pi \cdot (2 + 0,37 \cdot 3,5) \cdot (2 \cdot 53)}{180} \right) = 50,192 \text{ mm} \quad (7.1)$$

Délka neutrální vrstvy v podélném směru lze určit stejným způsobem, viz obrázek 45.



Obrázek 45: Náčrt neutrálního vlákna v podélném směru

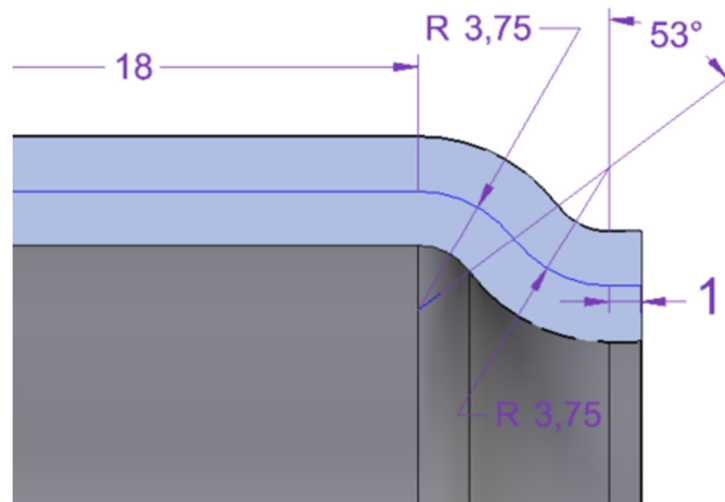
$$l_{po} = 2 \cdot \left(31,25 + 3 + 6,56 + \frac{\pi \cdot (2 + 0,41 \cdot 3,5) \cdot (90 + 2 \cdot 24)}{180} + \frac{\pi \cdot 22 \cdot 90}{180} \right) = 176,916 \text{ mm} \quad (7.2)$$

7.2.3 Diskuze výsledků

Použitím standardního postupu návrhu byl určen polotovar, jehož charakteristické rozměry jsou: $l_{př1} = 52 \text{ mm}$ a $l_{po1} = 175,6 \text{ mm}$.

Na základě výpočtu délky neutrálního vlákna byl určen nový polotovar, jehož charakteristické rozměry jsou: $l_{př2} = 50,2 \text{ mm}$ a $l_{po1} = 176,9 \text{ mm}$.

Zajímavé je, že šířka počítačem navrženého polotovaru po zaokrouhlení odpovídá délce středního vlákna, viz obrázek 46 a výpočet (7.3).



Obrázek 46: Náčrt středního vlákna v příčném směru

$$l_{stř} = 2 \cdot \left(1 + 18 + \frac{\pi \cdot (3,75) \cdot (2 \cdot 53)}{180} \right) = 51,88 \approx 52 \text{ mm} \quad (7.3)$$

Tato skutečnost je v rozporu se základními teoretickými poznatky, podle kterých se pozice neutrální vrstvy posouvá směrem k vnitřnímu poloměru ohybu, což má za následek, že její celková délka je menší, než délka střední vrstvy. Vzhledem ke geometrii svorky a ke skutečnosti, že rozměr původního polotovaru v podélném směru je menší, než rozměr určený metodou výpočtu neutrálního vlákna, lze usoudit, že algoritmy funkce „Flatten“ rozvinuly povrchovou plochu svorky v příčném směru do roviny a následně na základě metody zachování objemu dopočítaly délku v druhém (podélném) směru. Z tohoto důvodu je původní polotovar širší a kratší, než délka a šířka teoreticky spočtené neutrální vrstvy.

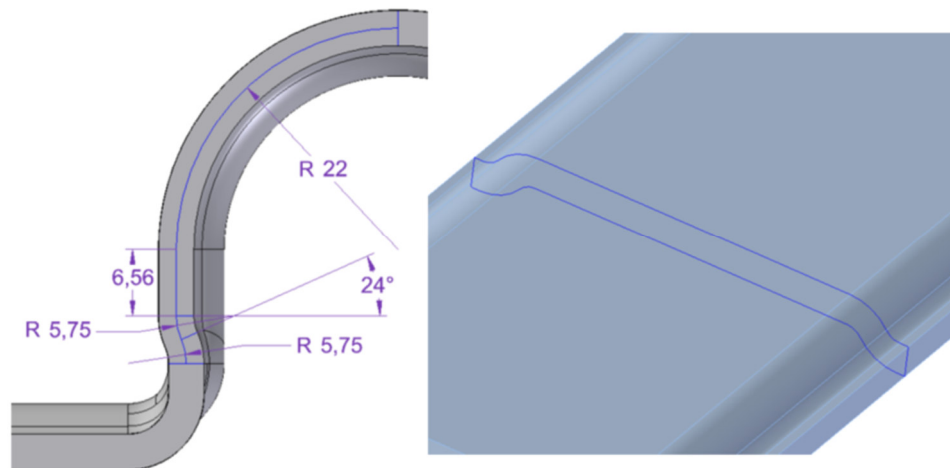
Vzhledem k tomu, že výpočet rozměrů neutrální vrstvy není nijak komplikovaný, ani časově náročný, tak by jej autor doporučil upřednostnit před funkcí „Flatten“. Další možnou alternativou by bylo použít jiný, k tomuto účelu specializovaný software.

7.2.4 Metodika návrhu výrobních nástrojů

Před začátkem procesu návrhu výrobních nástrojů je třeba si rozmyslet, během kolika operací lisování svorky proběhne. Výroba prototypových svorek standardně probíhá ve 3 až 4 krocích. Sériová výroba, disponující výkonnějšími lisami se snaží tyto kroky redukovat na 2 až 3. Další výhodou sériové výroby je vybavení výrobních lisů systémem nastavitelných váčkových kalibrů, které umožňují „rovnání“ svorky přímo během procesu výroby. Dochází tak ke kompenzaci efektu odpružení (springback), viz kapitola 3.

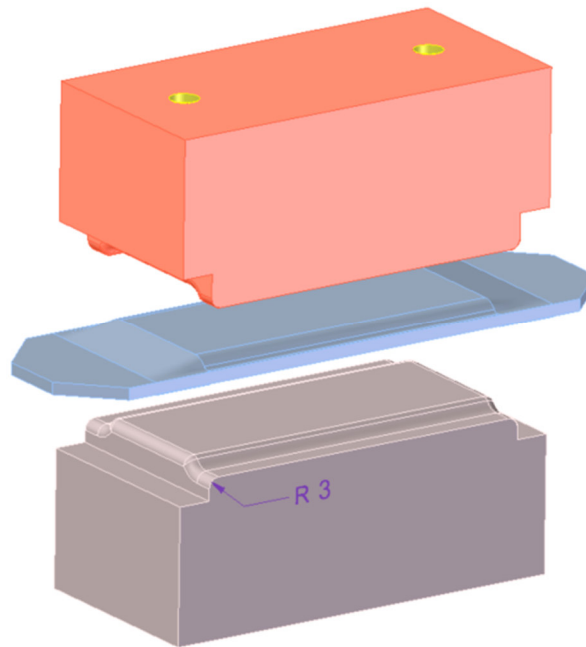
Postup návrhu výrobních nástrojů je poměrně jednoduchý, k jeho vysvětlení bude použit stejný model svorky jako v podkapitole 7.1.1.

1) V prvním kroku je na základě geometrie modelu svorky vytvořen prolis ve střední části svorky, viz obrázek 47. Profil svorky je tažen ve změřené délce neutrálního vlákna, které je pro tento rádius ohybu shodné s neutrálním. Odměření délky toho oblouku proběhne stejně jako v předchozím případě.



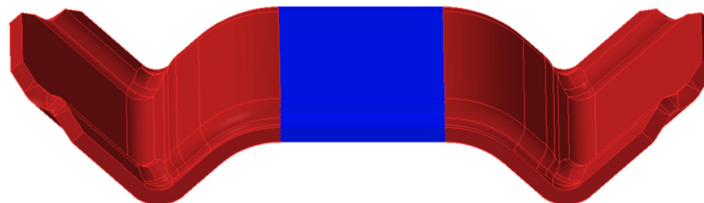
Obrázek 47: Modelování střední částí - prolisu

2) V další fázi je profil obtisknut do kvádrových modelů. Modely jsou následně doplněny technologickými prvky umožňující montáž nástrojů do lisovacích strojů (závitové díry) a pomocí zaoblení jsou vytvořeny hladké přechody mezi funkčními a ostatními plochami. Tím dojde k vytvoření modelů prvních výrobních nástrojů, viz obrázek 48.



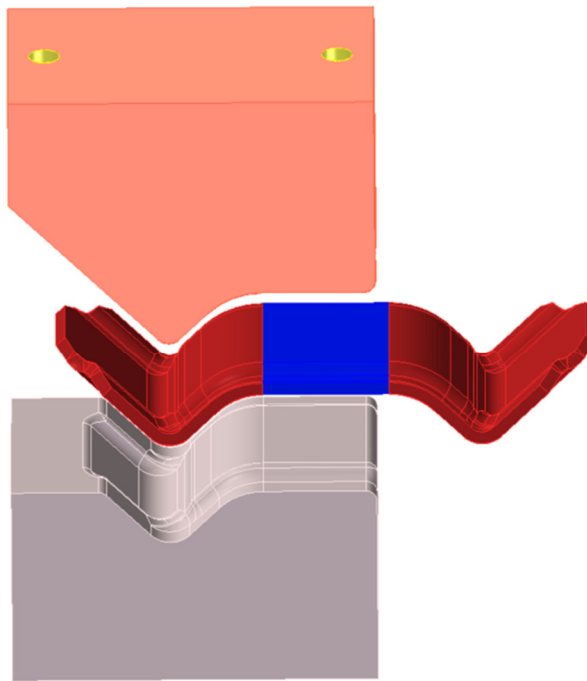
Obrázek 48: Modely výrobních nástrojů svorky pro první operaci

3) V dalším kroku je třeba vytvořit model svorky po druhé výrobní operaci. V té dochází k vylisování „paciček“. Pacičky standardně svírají pravý úhel s navazující střední částí. Pro jejich optimální výrobu je nutné, aby plocha pacičky svírala se směrem posuvu nástroje 45°. Model svorky je tudíž nutné „rozevřít“ o 90°, k čemuž je opět zapotřebí spočítat délku oblouku odpovídající narovnané střední části, viz obrázek 49.



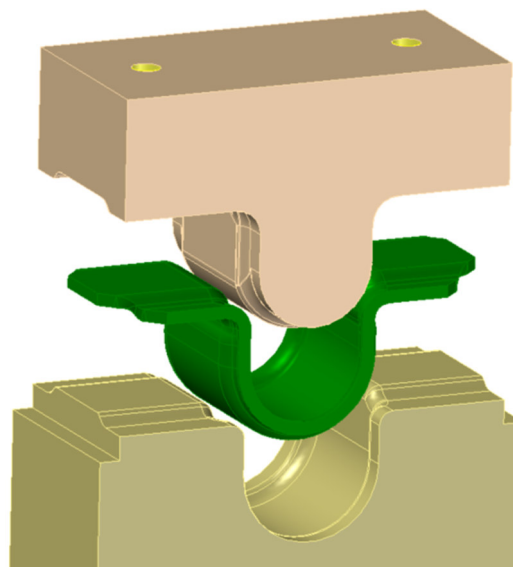
Obrázek 49: Model svorky po druhé výrobní operaci

4) k tvorbě nástrojů dochází stejným způsobem jako v předchozím případě, viz obrázek 50.



Obrázek 50: Druhá výrobní operace svorky

K této operaci se standardně vyrábí nástroj, který je pouze polovinou celého obtisku svorky. Výhodou jsou nižší výrobní náklady a možnost přesnějšího odměření polohy ohybu pacičky od kraje svorky.



Obrázek 51: Třetí výrobní operace svorky

5) Nástroje pro poslední krok jsou v podstatě obtiskem modelu samotné svorky, viz obrázek 51. V této operaci dojde k vytvoření středního oblouku, ve kterém je standardně umístěna pryž se stabilizátorem.

7.2.5 Zhodnocení postupu tvorby nástrojů

Výhodou pospané metodiky tvorby modelů výrobních nástrojů svorky je především její jednoduchost. Celý proces probíhá s využitím pouze jednoho programu (standardně Solid Edge) a několika jednoduchých výpočtů.

V kapitole 3 však bylo řečeno, že plastickou deformaci vždy doprovází deformace elastická, která způsobuje jev zvaný odpružení (springback). Hlavní nevýhodou popsané metodiky je absence čehokoli, co by tento jev kompenzovalo, či eliminovalo. V kapitole 3 také byly popsány standardní způsoby korekce tohoto jevu. Pro názornost budou připomenuty i zde:

- Ohýbací nástroj je navržen s korekcí o úhel, tím pádem se výlisek po samovolném odpružení dostane do požadovaného tvaru.
- Zvětšením lisovací síly na konci ohýbacího procesu na hodnotu, kdy dojde ke vzniku dodatečné plastické deformace.
- Použitím prolisů či vyztužovacích žeber, která také zvýší celkovou tuhost výlisku.

Na začátku podkapitoly 7.1.4 bylo zmíněno, že v sériové výrobě bývají svorky rovnány pomocí systémů s nastavitelnými váčkovými kalibry. V prototypové výrobě, která nemá k dispozici tyto nástroje, probíhá rovnání ručně např. ve svěráku.

Zvětšení lisovací síly na konci procesu a použití prolisů jsou metody, které efekt odpružení zmírní, ale zcela neodstraní. Navíc dodatečné prolisy by měnily tvar svorky, což není dovoleno. Vzhledem k tomu, že se většina svorek vyrábí z jednoho typu plechu, tak by autor doporučil zaměřit se na výzkum s cílem určit optimální korekční úhel pro nejběžnější tloušťky plechu a poloměry ohybu.

Než budou nalezeny příslušné korekční úhly, tak vhodným způsobem, jak se vypořádat s jevem odpružení, je dodatečné rovnání. Zde by autor rád zdůraznil, že ruční rovnání velmi komplikuje proces simulace výroby, jelikož velikosti (a směry) silových účinků jsou neznámé. Proto by dle autora bylo vhodné inspirovat se ze sériové výroby a proces rovnání svorek provádět pomocí zařízení, z kterého bude možné získat data pro simulaci tohoto procesu.

8 Kontrola fyzických dílů svorky

Kontrola by měla být součástí výrobního procesu každé strojní součásti. V procesu sériové výroby svorek probíhá kontrola vybraných parametrů pomocí speciálních, na míru vyrobených kalibrů a měrek. Tento způsob kontroly je typický pro sériové výroby, jelikož je velmi jednoduchý a rychlý. Jeho nevýhodou je nutnost výroby speciálních kalibrů pro každý nový model svorky, který se od předchozích liší některými rozměry. Další nevýhodou je pak nižší přesnost měření a limity, které nedovolují změřit některé parametry (např. geometrické tolerance). Proto je také ve firmě k dispozici souřadnicový měřicí stroj, kterým lze přesněji ověřovat vybrané parametry.

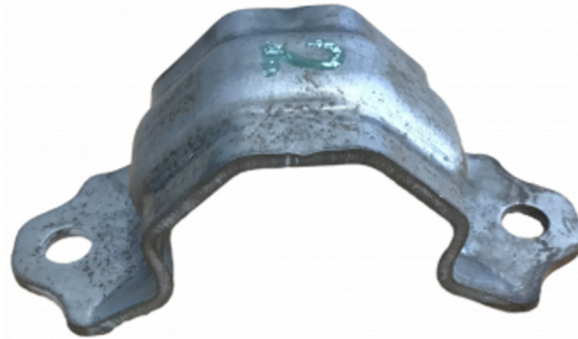
Ve vývojovém oddělení zmíněné firmy je k dispozici 3D skener, který umožňuje tvorbu 3D SCAN modelů svorek, z kterých lze následně získat komplexnější informace o stavu výroby. Tvorba modelu svorky bude probíhat právě pomocí tohoto zařízení. Jedná se o optický 3D skenovací systém COMET L3D 2 od firmy Carl Zeiss Optotechnik GmbH.

Postup tvorby 3D SCAN modelu na tomto zařízení je principiálně shodný pro jakýkoli fyzický objekt. Pro dosažení maximální kvality je však nutné proces upravit „na míru“ skenované součásti - zdánlivě stejné postupy, lišící se pouze v detailech totiž nemusí dát stejné výsledky. Následující kapitola bude zároveň sloužit jako návod, či standard pro 3D skenování svorek stabilizátorů.

8.1 Postup tvorby 3D SCAN modelu svorky

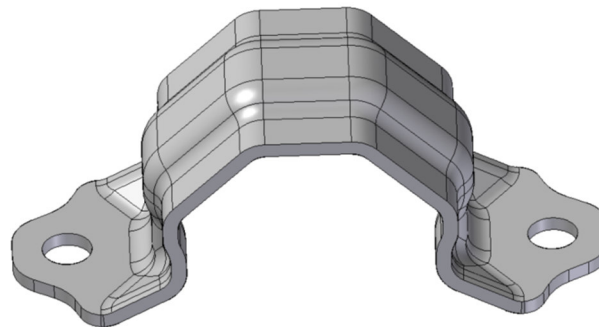
V kapitole 3 byly zmíněny základní mechanismy plastické deformace, ke kterým během procesu formování svorky dochází, a které způsobují výsledný tvar svorky. Plastická deformace kromě změny tvaru plechu také může způsobovat změnu jeho barvy. Změnu barvy lze zaznamenat především v místech dotyku svorky s výrobními nástroji – v těchto místech dochází k většímu tření. Výsledkem je, že svorky jsou v těchto místech ohlazené a lesklé. V některých jiných místech naopak dochází k zatmavění, které je způsobeno konstrukčními prohlubněmi ve svorkách.

V kapitole 4 bylo řečeno, že pokud je proces 3D skenování založen na optické metodě, tak jej mohou lesklé a tmavé povrchy znesnadnit. Skener jednoduše body „nevidí“ a nedojde tak k jejich nasnímání. Z tohoto důvodu je nutné na tyto problematické součásti nanést vrstvu barvy, která umožní nasnímání celého povrchu. Pro tento účel bude použit sprej Nord-Test Entwickler U89, který lze po měření odstranit. K vytvoření 3D SCAN modelu svorky bude použita svorka z prototypové výroby, jejíž tvar je patrný z obrázku 52.



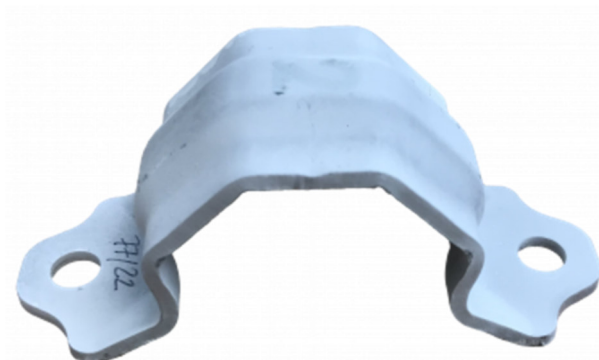
Obrázek 52: Fyzický model svorky z prerotypové výroby

Cílem procesu kontroly je (zjednodušeně řečeno) ověřit míru shody fyzického modelu (obrázek 52) s teoretickým CAD modelem (obrázek 53).



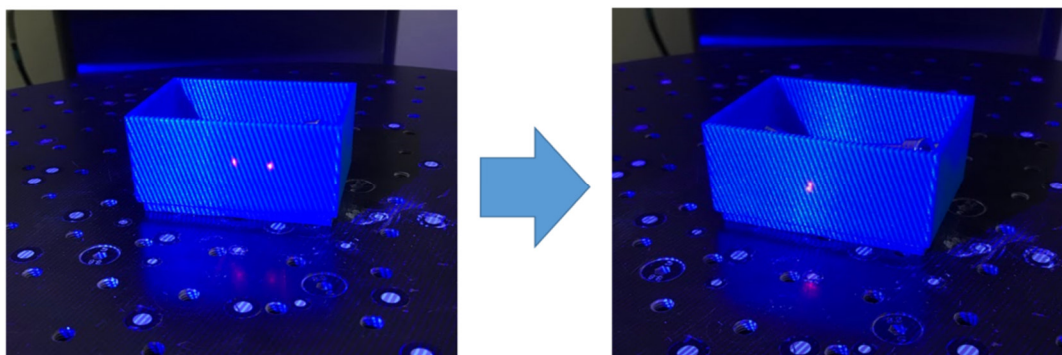
Obrázek 53: CAD model svorky

1) Nejprve je třeba na svorku nanést vrstvu barvy. K tomuto účelu autor doporučuje použít igelitové rukavice, které zamezují stírání nanesené vrstvy. Barva je nanášena přibližně ze vzdálenosti 20 centimetrů tak, aby došlo k vytvoření kontinuální vrstvy bez kapiček. Svorku lze snadno nabarvit ve dvou krocích, při položení „na bok“. Důraz by měl být kladen především na nanesení barvy na plochy děr pro šrouby, jelikož právě tyto plochy bývají pro 3D skener obtížně viditelné.



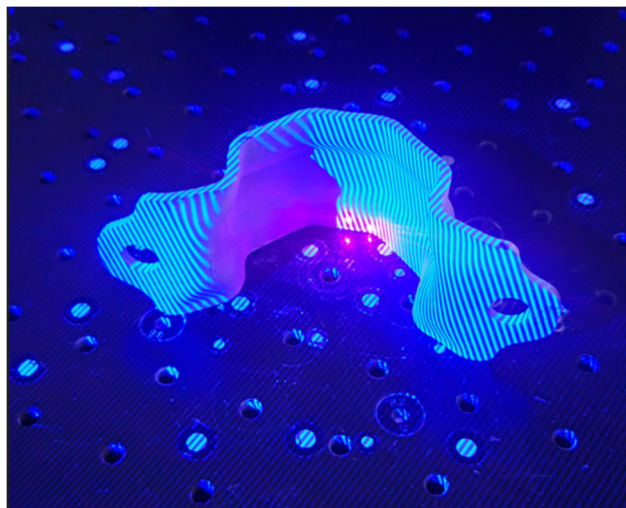
Obrázek 54: Nabarvená svorka

2) Spuštění systému COMET L3D 2 musí proběhnout v předepsaném pořadí, jinak nemusí dojít k detekci snímacího zařízení řídicím počítačem. Nejprve se tedy sundají krytky z kamer a spustí se rotační stůl a snímací zařízení, po chvilkové odmlce (dvě minuty) je spuštěn počítač a opět po chvilkové odmlce (dvě minuty) program Colin 3D. Systém musí být předem zkalibrován na teplotu odpovídající teplotě prostředí, ve kterém měření probíhá. Dále musí být snímací zařízení s kamerami umístěno do takové polohy, aby se laserové (kalibrovací) paprsky protnul v jednom bodě a to ideálně v ose rotace rotačního stolu v půlce výšky skenované součásti. K tomuto nastavení lze použít jakoukoli věc s rovinnou plochou, např. krabičku, viz obrázek 55.



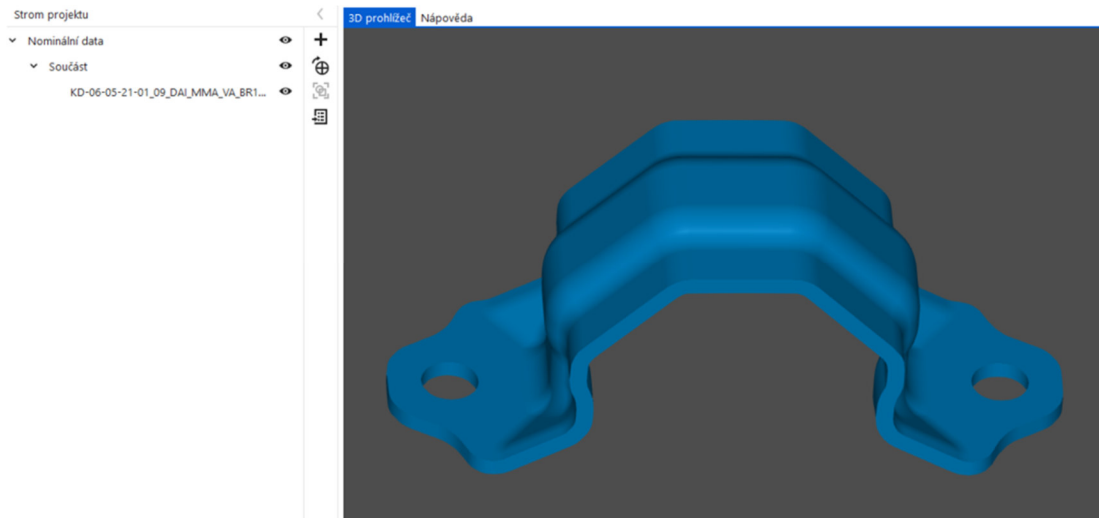
Obrázek 55: Kalibrace polohy snímacích kamer

3) Svorka může být nyní umístěna na rotační stůl. Optimální poloha pro skenování je opět poloha „na boku“. Takto umístěnou svorku lze naskenovat během dvou operací - svorku je nutné otočit pouze jednou. Svorka by měla být umístěna tak, aby osa rotace rotačního stolu se nacházela na stejném místě jako osa ohybu střední části svorky, viz obrázek 56.



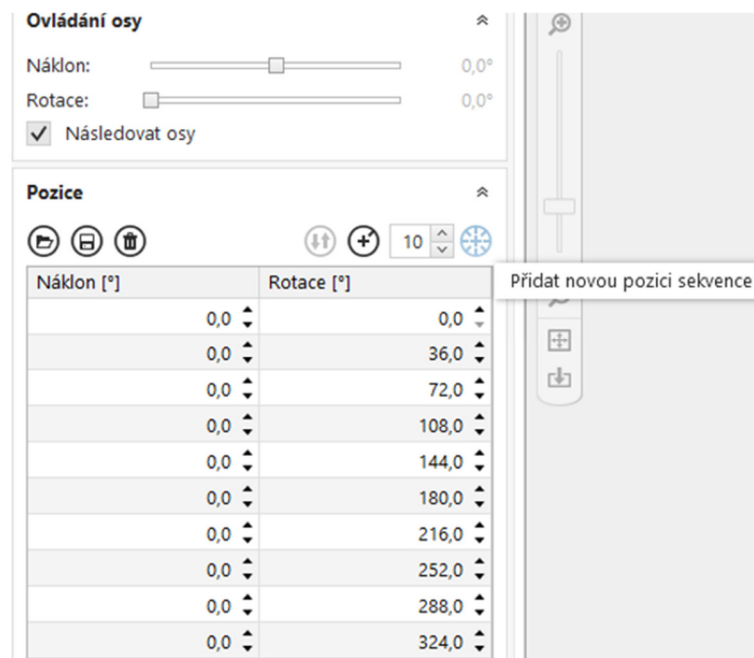
Obrázek 56: Svorka umístěna na rotačním stole

4) V prostředí programu Colin 3D se klikne na políčko „Vytvořit nový projekt“ a následně na „Dále“. Nyní je možné importovat součást ve formátu STEP. Importovat CAD model není z hlediska tvorby 3D SCAN modelu nutné, nicméně pro usnadnění procesu vyhodnocení je tento krok žádoucí. Klikne se tedy na políčko „Vybrat soubor(y)“ a nahraje se příslušný CAD model svorky, viz obrázek 57.



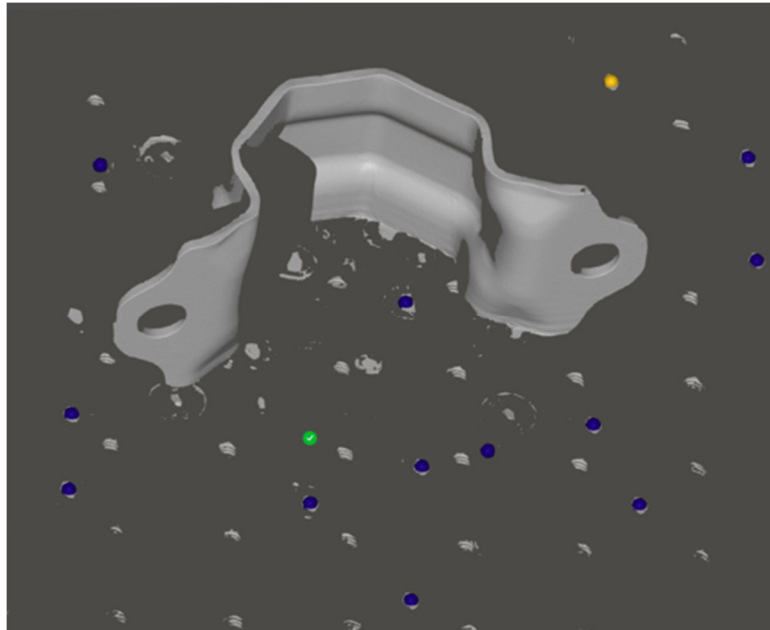
Obrázek 57: CAD model svorky v programu Colin 3D

5) V dalším kroku se vybere políčko „Rotační měření“ a „Přidat novou sekvenci“. Počet rotací standardně bývá 10, viz obrázek 58.



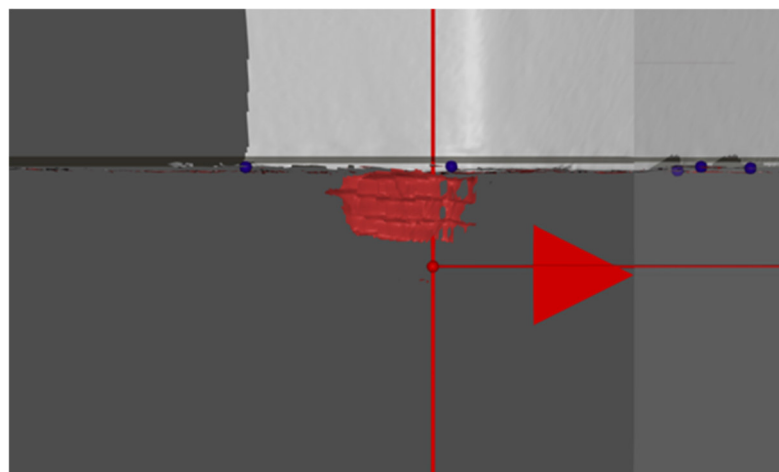
Obrázek 58: Určení počtu rotací

6) Po klinutí na políčko „Dále“ dojde k vytvoření prvního snímku. Lze si povšimnout, že zařízení nezachytilo pouze body na povrchu svorky, ale také některé body povrchu rotačního stolu, včetně vyznačených bílých bodů (referenčních značek). Systém vyhodnocení bodu rozpozná a označí modrými koulemi, viz obrázek 59.



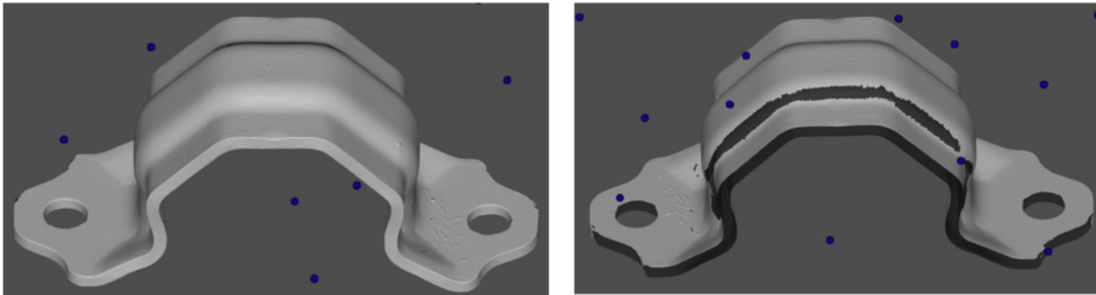
Obrázek 59: První snímek svorky

7) V této fázi je vhodné vytvořit ořezovou rovinu, která bude v dalších krocích automaticky odstraňovat nežádoucí nasnímané body. Ořezová rovina se vytvoří kliknutím na alespoň tři modré kuličky (referenční značky) a následným potvrzením zelené „fajfky“. Ořezová rovina se tažením myši posune o hodnotu přibližně 0,4 mm, aby došlo k oříznutí všech nežádoucích zaznamenaných bodů, viz obrázek 60.



Obrázek 60: Ořezová rovina

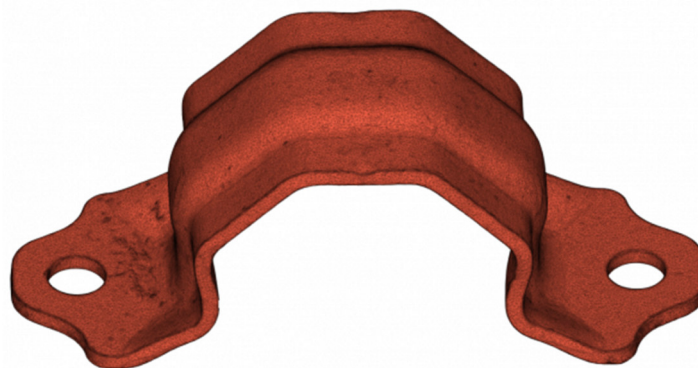
8) Po kliknutí na tlačítko „dále“ dojde automaticky k naskenování svorky. Problém je však, že svorka byla „nafocena“ pouze z jedné strany a některé plochy tudíž zůstaly zakryty, viz obrázek 61.



Obrázek 61: Model svorky po první sekvenci

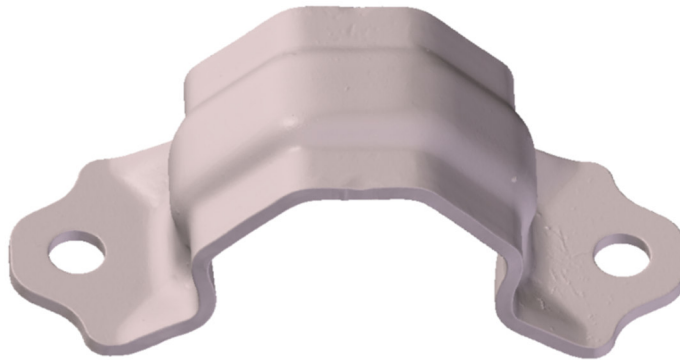
9) Je tedy nutné fyzický díl otočit na druhý bok a celý proces skenování zopakovat. Po dokončení druhého skenování je třeba vybrat políčko „vyrovnat vzájemně měření“. Vyrovnání svorky většinou proběhne automaticky, přičemž při výskytu problémů systém umožňuje napomoci vyrovnávacím algoritmům vybráním několika bodů na povrchu svorky.

10) Po vyrovnání vzájemných měření je žádané kliknout na políčko „globální optimalizace“ a provést tak optimalizaci měřících poloh. V tento moment je již možné vytvořit výsledný síťovaný (polygonový) model. Klikne se na políčko „vytvoření sítě“ a nastaví se „kontrola kvality“. Pokud dojde ke vzniku nějakých nespojitostí v struktuře sítě, je možné síť upravit funkcemi: upravit otvory, decimovat síť, vyhladit síť atd. Síťovaný model naskenované svorky je patrný z obrázku 62.



Obrázek 62: Síťovaný (polygonový) model svorky

11) V posledním kroku procesu tvorby 3D SCAN modelu je třeba celý projekt uložit a síťovaný model exportovat do formátu STL. 3D SCAN STL model je patrný z obrázku 63.

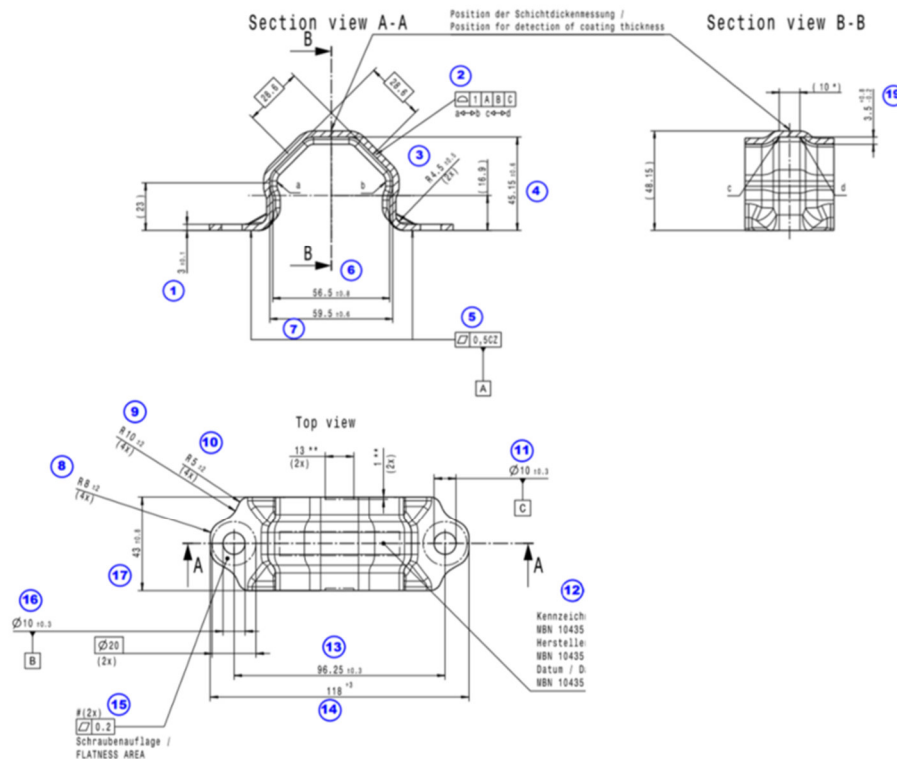


Obrázek 63: 3D SCAN model svorky ve formátu STL

8.2 Vyhodnocení 3D SCAN modelu svorky

K vyhodnocování 3D SCAN modelů se ve firmě standardně používá software PolyWorks Metrology Suite od firmy InnovMetric Software Inc. K vyhodnocení naskenovaného dílu je dále zapotřebí:

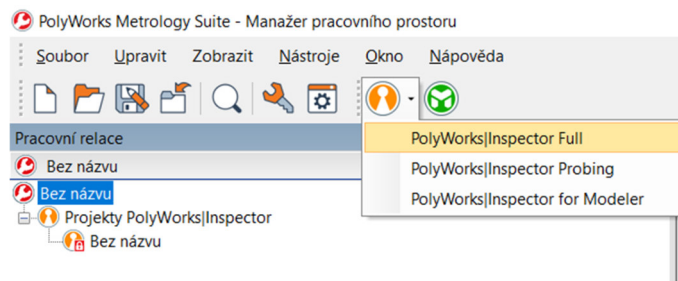
- CAD model svorky (viz obrázek 53),
- výrobní výkres, či obdobný dokument, ve kterém jsou vyznačeny parametry, které je potřeba změřit, viz obrázek 64.



Obrázek 64: Část výrobního výkresu svorky s vyznačenými parametry

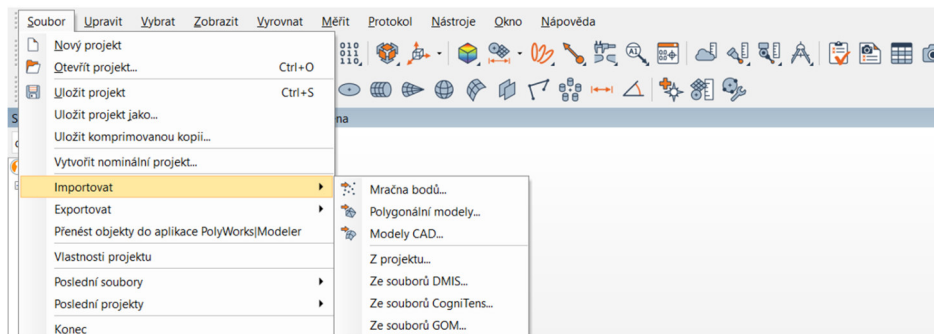
Postup vyhodnocení probíhá v následujících krocích:

- 1) V prostředí programu PolyWorks se spustí nástroj Inspector Full, viz obrázek 65.



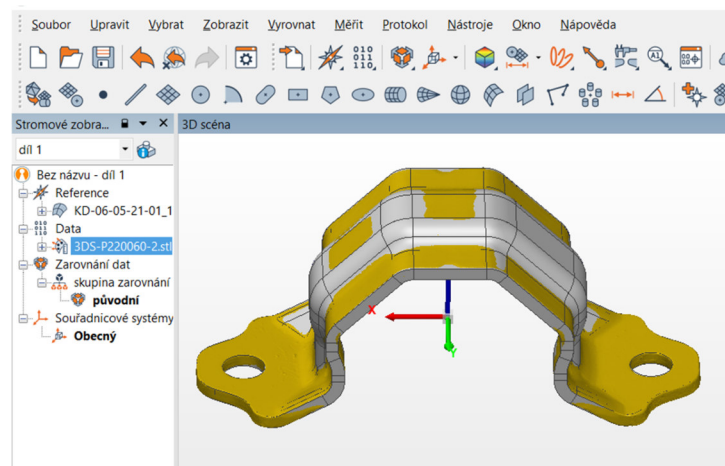
Obrázek 65: Spuštění nástroje Inspector Full

- 2) Do nástroje Inspector je třeba importovat jak CAD model, tak i 3D SCAN model ve formátu STL, ten je identifikován jakožto „Polygonální model“, viz obrázek 66.



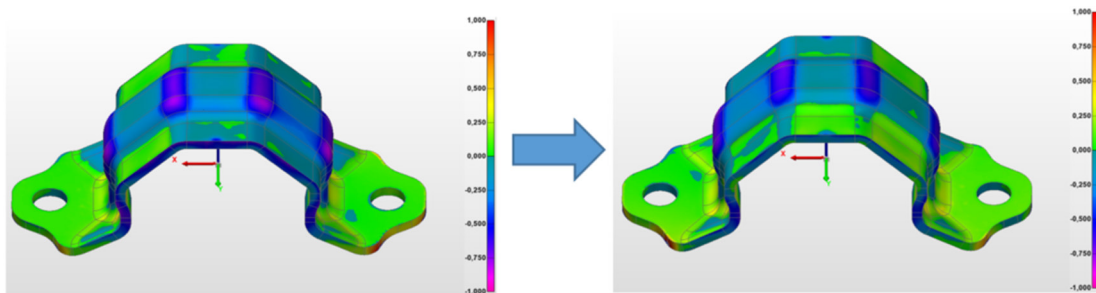
Obrázek 66: Importování modelů svorky

Díky tomu, že již během procesu 3D skenování svorky byly snímky zarovnávané na CAD model, tak po nahrání do prostředí Polyworks jsou oba modely zarovnávané na sebe, viz obrázek 67.



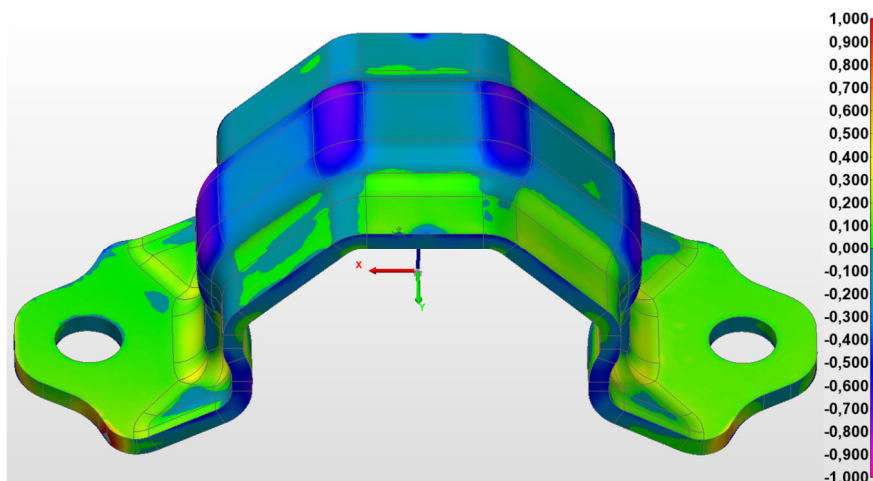
Obrázek 67: Zarovnání modelů svorky z programu Colin 3D

Toto zarovnání proběhlo v programu Colin 3D, který primárně slouží k tvorbě 3D SCAN modelů a tudíž jeho vyrovnávací algoritmy nejsou tak efektivní jako algoritmy softwaru PolyWorks. Tuto skutečnost lze demonstrovat pomocí funkce „barevná mapa“. Tento nástroj umožňuje zobrazit vzdálenosti bodů povrchu 3D SCAN modelu od povrchu teoretického CAD modelu ve zvolené barevné škále. Prvky barevné škály byly určeny v intervalu, jehož krajní hodnoty jsou $\pm 1 \text{ mm}$. Dále je použita funkce „Best fit“, což je nástroj programu PolyWorks, který zarovnává naskenované body k referenčním podle nejlepšího proložení. Zkvalitnění zarovnání modelů na sebe použitím funkce „Best fit“ lze vidět na obrázku 68.



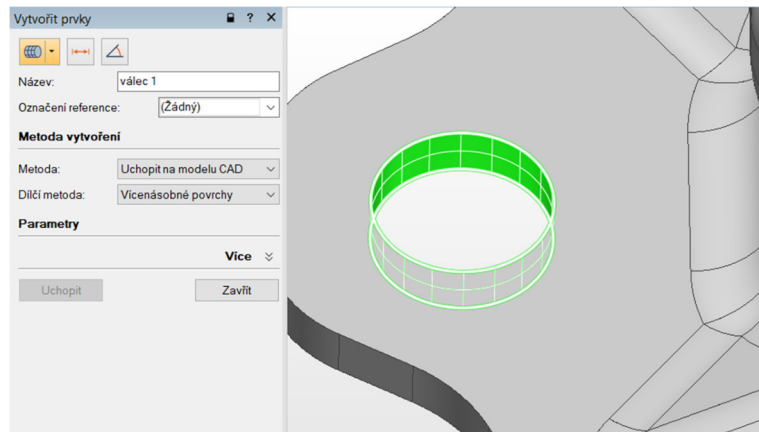
Obrázek 68: Barevná mapa s použitím zarovnání „Best fit“

3) Funkce „Best fit“ bude použita i pro zarovnání k vyhodnocení parametrů svorky, nejprve je však nutné provést zarovnání k základnám, které bývají standardně označeny písmeny A, B, C. Výsledné zarovnání je patrné z obrázku 69.



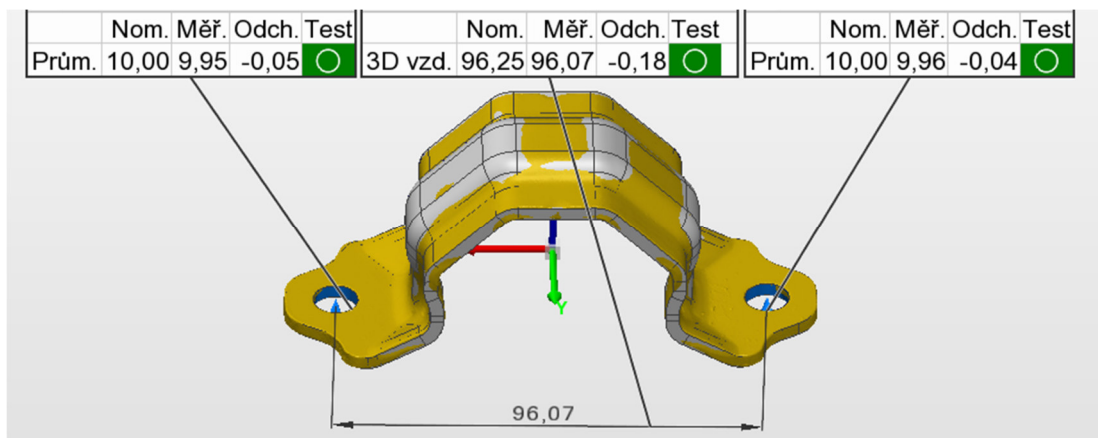
Obrázek 69: Výsledné zarovnání 3D SCAN modelu svorky na CAD model

4) Nyní je již možné přejít k odměřování funkčních parametrů. Tento proces bude znázorněn na příkladu osové vzdálenosti děr pro upínací šrouby svorky, viz obrázek 70.



Obrázek 70: Vytvoření geometrického prvku díry





Pro názornost je vypnuta funkce „barevná mapa“. Po vytvoření prvku „válec“ i v druhé díře pro šroub je vytvořen prvek „vzdálenost“. Ten samozřejmě odpovídá hodnotě z výrobního výkresu. Následně dojde pomocí funkce „odměřit“ k vytvoření (odměření) těchto prvků na 3D SCAN modelu, viz obrázek 71.



Obrázek 71: Odměření rozměru osové vzdálenosti

Obdobným způsobem dojde k odměření všech požadovaných rozměrů, geometrických tolerancí a dalších funkčních parametrů svorky.

5) Výsledek měření je pak možné přehledně zapsat pomocí vložením naměřených dat do šablony, viz obrázek 72.

Name	Control	Nom	Meas	Tol	Test
2 - surface	 1,00 A B C		1,09	1,00	Fail
3a - arc	Radius	4,50	4,55	±0,50	Pass
3b - arc	Radius	4,50	4,62	±0,50	Pass
5 - datum plane A	 0,50		0,10	0,50	Pass
8a - cylinder	Radius	8,00	7,65	±2,00	Pass
8b - cylinder	Radius	8,00	7,50	±2,00	Pass
8c - cylinder	Radius	8,00	7,58	±2,00	Pass
8d - cylinder	Radius	8,00	7,67	±2,00	Pass
9a - cylinder	Radius	10,00	9,72	±2,00	Pass
9b - cylinder	Radius	10,00	10,28	±2,00	Pass
9c - cylinder	Radius	10,00	9,49	±2,00	Pass
9d - cylinder	Radius	10,00	10,42	±2,00	Pass
10a - cylinder	Radius	5,00	4,80	±2,00	Pass
10b - cylinder	Radius	5,00	4,68	±2,00	Pass
10c - cylinder	Radius	5,00	4,59	±2,00	Pass
10d - cylinder	Radius	5,00	4,26	±2,00	Pass
11 - datum cylinder C	Diameter	10,00	9,95	±0,30	Pass
13 - distance	3D Distance	96,25	96,07	±0,30	Pass
15a - plane	 0,20		0,10	0,20	Pass
15b - plane	 0,20		0,10	0,20	Pass
16 - datum cylinder B	Diameter	10,00	9,96	±0,30	Pass

Name	Control	Nom	Meas	Tol	Test
1 - c-s caliper	Length	3,00	3,05	±0,10	Pass
4 - c-s caliper	Length	45,15	45,12	±0,60	Pass
6 - c-s caliper	Length	56,50	56,29	±0,80	Pass
7 - c-s caliper	Length	59,50	59,09	±0,60	Pass
14 - caliper	Length	118,00	119,06	+3,00/0,00	Pass
17 - caliper	Length	43,00	42,67	±0,80	Pass
19a - c-s caliper	Length	3,50	3,74	+0,80/-0,20	Pass
19b - c-s caliper	Length	3,50	3,61	+0,80/-0,20	Pass

Name	Control	Nom	Meas	Tol	Test
18 - trim pt	Edge Distance		-0,30	±0,30	Pass

Remark

12 - can't be evaluated

Obrázek 72: Výsledky měření funkčních parametrů svorky

Z obrázku 72 je patrné, že pouze jeden měřený parametr nesplnil požadované toleranční pásmo. Jedná se o parametr číslo 2 – tolerance tvaru plochy. Výsledek měření se předá zadavateli měření (v tomto případě prototypové výrobě), který může na základě výsledných dat upravit proces výroby, či požadovaná toleranční pásma.

9 Experimentální měření únavových vlastností svorek

Svorky jsou po celou dobu svého provozu namáhány v čase proměnlivým zatížením. Pokud se automobil nachází v klidu, či v přímočarém pohybu, tak na svorky působí síly zanedbatelných velikostí – síla způsobená gravitačním zrychlením, síla od předpětí pryžového pouzdra, případně setrvačné síly způsobené zrychlováním, respektive zpomalováním automobilu. Pokud se však automobil pohybuje po nepřímé trajektorii (zatáčí), tak dochází ke kroucení stabilizátoru a ke vzniku reakčních sil, jejichž velikost nemusí být zanedbatelná. Směr těchto sil, které namáhají svorku, je většinou neměnný. Jejich velikost je však úměrná velikosti odstředivé síly, která působí na automobil.

Pokud by došlo k selhání (prasknutí) svorky, tak na vině je s největší pravděpodobností jev zvaný únava materiálu, viz kapitola 5. Tento stav je samozřejmě nepřijatelný, avšak únava materiálu je jev, který je obtížně predikovatelný. Z tohoto důvodu jsou svorky standardně testovány, aby došlo k ověření, zdali při daném zatížení vydrží požadovaný počet cyklů. Tato činnost je primárním posláním vývojového oddělení, ve kterém vznikl požadavek na zpracování této problematiky.

Svorky by měly být dimenzovány na základě relevantních výpočtů, jejichž výsledky s dostatečnou přesností popisují jejich únavové vlastnosti. Jedná se především o místo vzniku únavové trhliny a počet cyklů do lomu. V současné době však výsledky výpočtů neodpovídají výsledkům experimentálních měření a to i přes to, že je k tomuto účelu využíváno nejmodernějších softwarů fungujících na základě MKP. Je tedy na místě ptát se, zdali není výpočet únavových vlastností svorky natolik komplexní problematika, že v současné situaci není možné získat výsledky s požadovanou přesností. V případě, že by tomu tak bylo, tak další otázkou, kterou je třeba položit, je: „co je třeba změnit, aby výsledky výpočtů odpovídaly experimentálním výsledkům v požadované míře?“. Důvody proč tyto výsledky nejsou v souladu lze rozdělit do dvou skupin:

- Zkreslení způsobené změnami v procesu experimentálního měření.
- Zkreslení způsobené přílišným zjednodušením reálného procesu experimentálního měření v simulovaném MKP modelu. Případně se může vyskytnout i zkreslení způsobené uvažováním chybných parametrů, či opomenutím všech podstatných okolností v MKP modelu.

Pro názornost je toto rozdělení demonstrováno na příkladu vlivu předpětí pryžového silentbloku na svorku.

Při rozdílných postupech v procesu montáže soustavy svorka – silentblok může dojít k rozdílnému umístění pryžového silentbloku ve svorce a tím pádem k rozdílným únavovým vlastnostem celé soustavy.

Při tvorbě (zjednodušeného) MKP modelu může v tomto případě dojít k následujícím chybám:

- vliv pryže je uvažován se správnými vstupními parametry, ale výpočtový model je příliš zjednodušen,
- model pryžového silentbloku je uvažován s chybnými parametry,
- vliv předpětí pryžového silentbolku na únavové vlastnosti svorky je zcela opomenut.

Ke zkeslení výsledků tedy dochází jak během procesu experimentálního měření, tak během procesu MKP simulace (výpočtu). Vzhledem k podstatě obou procesů lze konstatovat, že 100% shody nelze dosáhnout nikdy. U žádných dvou měřených dílů nelze zaručit naprosto stejné mechanické vlastnosti a to ani u součástí, které jsou vyrobeny ze stejného svitku plechu. MKP simulace jsou a vždy budou pouze zjednodušením reality. I přes neustálou snahu zpřesňovat simulační modely, všechny okolnosti do výpočtového modelu zahrnout také nelze. Aspekty obou procesů, které lze zpřesnit je však vhodné pojmenovat. U experimentálních měření jimi jsou:

- nejednotnost procesu montáže soustavy svorka – pryžový silentblok. Tento problém byl již popsán výše, k jeho eliminaci by bylo vhodné v prvním kroku zavést jednotný postup. Následně k zpřesnění výsledků by bylo žádoucí provádět montáž pomocí speciálního montážního stroje, který bude tento proces provádět vždy stejně. Proces strojové montáže zmíněných dílů je navíc daleko snazší simulovat, než proces ruční montáže.
- Při upevnění svorky k přípravku pro životnostní měření může dojít k vyosení svorky. To je zapříčiněno utahovacím momentem, který přes šroub působí na svorku. K eliminaci tohoto jevu by mohlo dojít při použití speciálních mantinelů, které by se před montáží nasadily, a před spuštěním měření by se sundaly.
- Důsledné dodržování pravidla, že na každý experiment je třeba použít nové upínací šrouby, jejichž vlastnosti nejsou ovlivněny předchozím měřením.

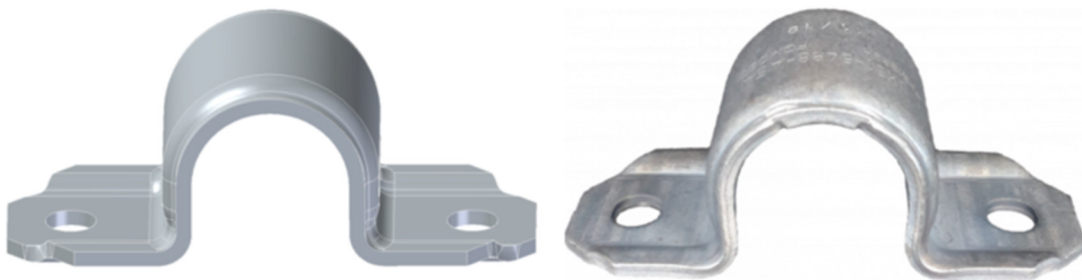
Okolnosti, které lze vytknout výpočtovým MKP modelům je:

- Uvažování homogenního izotropního materiálového modelu svorky. Vlivem procesu výroby dochází k lokálním plastickým deformacím ve svorce. Navíc svorky jsou vyrobeny z válcovaného plechu, jehož vlastnosti jsou anizotropního charakteru. Tyto aspekty je možné a je třeba v procesu simulace uvažovat.
- Uvažování CAD geometrie svorky. Jak bylo ukázáno v kapitole 8, tvar skutečné svorky se od CAD značně liší. Pro zpřesnění MKP simulací by bylo vhodné uvažovat tvar, který přesněji odpovídá fyzickému dílu. Tato úprava je též proveditelná.

9.1 Návrh experimentálního měření únavových vlastností svorky

Cílem tohoto měření je získat data, na základě kterých bude možné vykreslit Wöhlerovu křivku pro určitý typ kovopryžového pouzdra. Hlavní přínos však nespočívá v získání Wöhlerovy křivky jako takové, ale v pozorování a následném analyzování procesu testování.

Pro tento experiment byl vybrán stejný typ svorky jako v kapitole 7. Díky snazší dostupnosti většího množství byly pro toto měření vybrány svorky vyrobené v sériové výrobě. CAD model a fyzický díl je patrný z obrázku 73.



Obrázek 73: Vybraný typ svorky pro experimentální měření

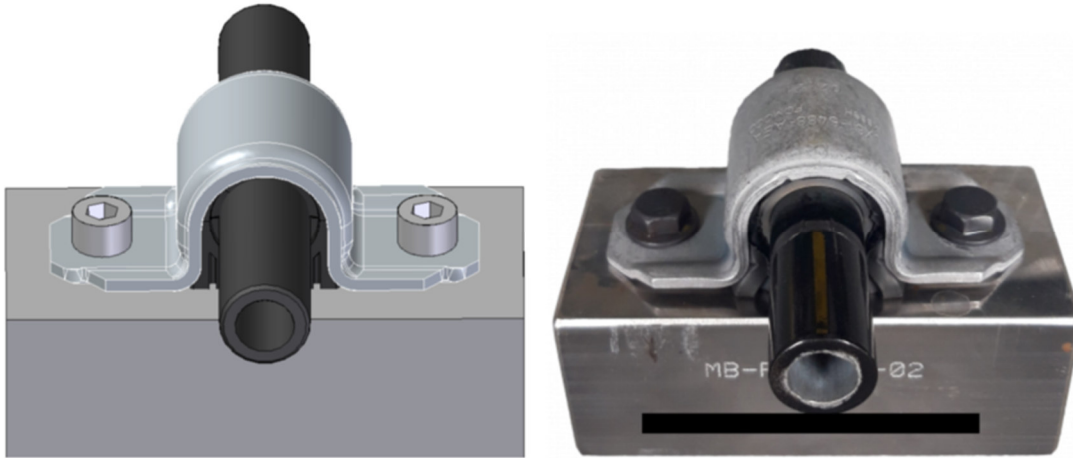
Měření proběhne na hydropulzátoru, což je stroj, který se ve firmě běžně používá k měření životnosti svorek.

CAD model kovopryžového uložení včetně části stabilizátoru a tomu odpovídající fyzické díly jsou patrné z obrázku 74.



Obrázek 74: CAD model a fyzický díl kovopryžového uložení stabilizátoru

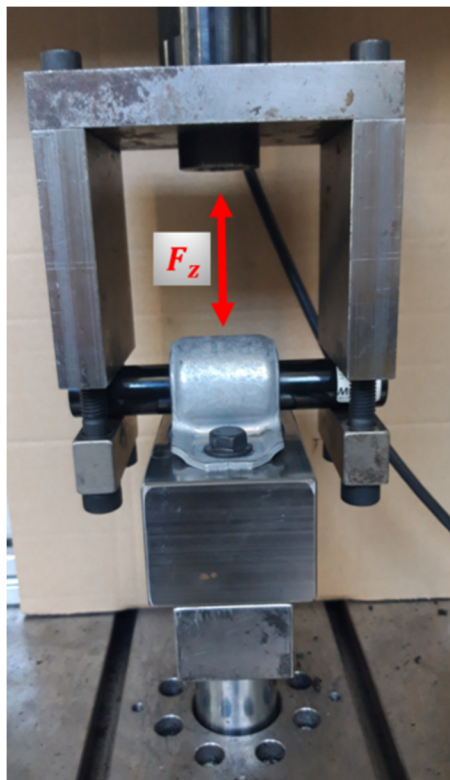
Pro jednoduchost byl směr zatěžující síly určen jako vertikální (ve směru os upínacích šroubů). CAD model a fyzický díl upnutého kovopryžového uložení stabilizátoru je patrný z obrázku 75.



Obrázek 75: Kovopryžové pouzdro upevněno k přípravku

9.1.1 Průběh měření

Způsob upnutí kovopryžového pouzdra do hydropulzátoru je patrný z obrázku 76, kde je také vyznačen směr zatěžovací síly F_z [kN].



Obrázek 76: Svorka v hydropulzátoru

Experiment byl proveden za standardních podmínek v laboratořích výše zmíněného vývojového oddělení. Výsledky jsou patrné z tabulky 1.

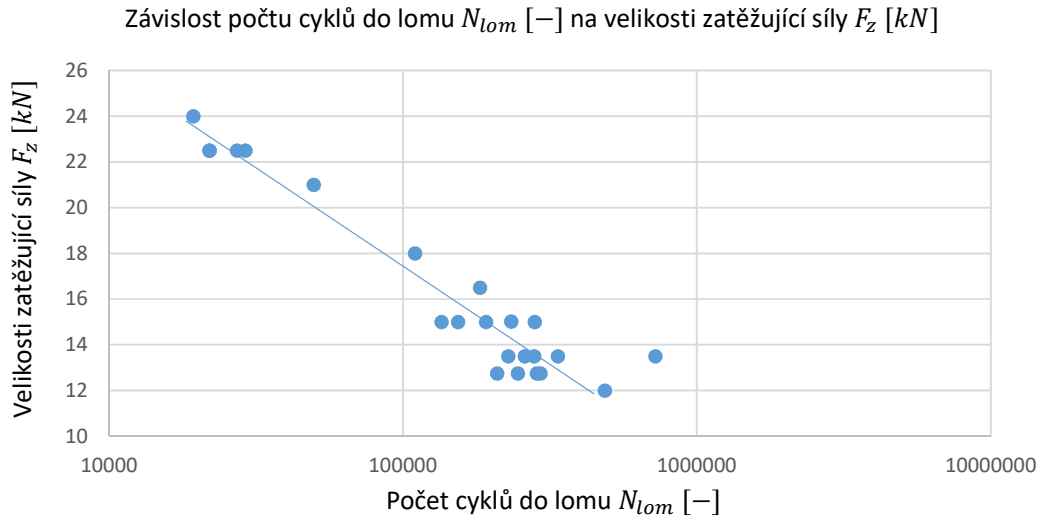
Tabulka 1: Výsledek experimentu

	Zkušební kus	F_z [kN]	f [Hz]	N_{lom} [-]	$N_{bez\ lomu}$ [-]
1	Nr.1	6	3		908 592
2	Nr.2	9	3		2 000 000
3	Nr.3	9	3		2 000 000
4	Nr.4	12	3		1 733 880
5	Nr.5	12	3		1 587 035
6	Nr.6	13,5	3	279 411	
7	Nr.7	12,75	3	209 175	
8	Nr.8	12,75	3	245 988	
9	Nr.9	12,75	3	285 629	
10	Nr.10	12	3		800 000
11	Nr.11	13,5	3	336 389	
12	Nr.12	12,75	3	293 644	
13	Nr.13	12	3	486 302	
14	Nr.14	12	3		1 761 339
15	Nr.15	15	3	280 792	
16	Nr.16	15	3	234 008	
17	Nr.17	16,5	3	182 650	
18	Nr.18	15	3	153 876	
19	Nr.19	15	3	191 850	
20	Nr.20	18	3	109 872	
21	Nr.21	21	3	49 669	
22	Nr.22	22,5	3	29 106	
23	Nr.23	22,5	3	21 947	
24	Nr.24	22,5	3	21 980	
25	Nr.25	22,5	3	27 224	
26	Nr.26	24	3	19 378	
27	Nr.27	15	3	135 241	
28	Nr.28	13,5	3		722 262
29	Nr.29	13,5	3	228 360	
30	Nr.30	13,5	3	259 982	

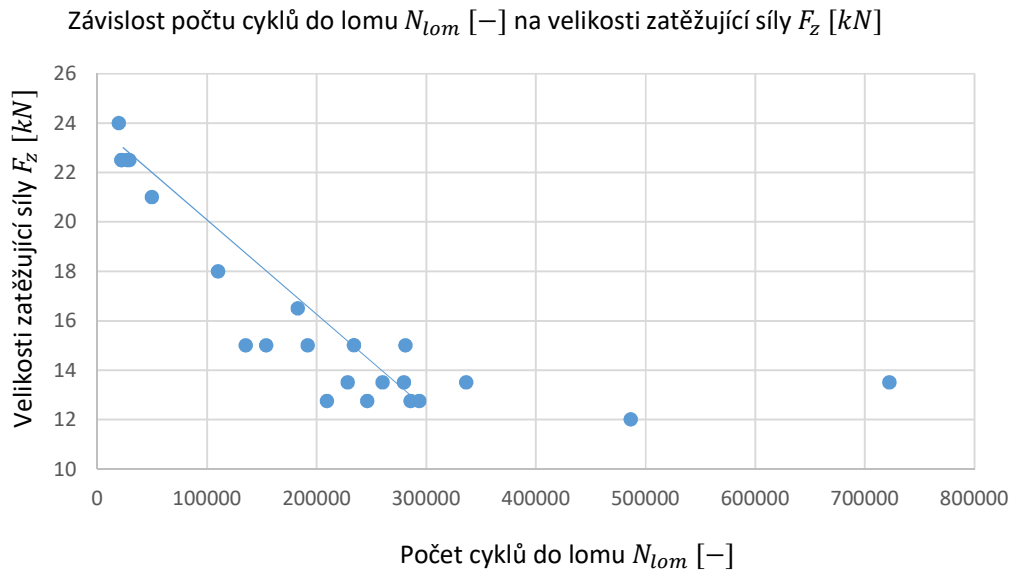
9.1.2 Vyhodnocení experimentu

Experiment neproběhl zcela dle očekávání, jelikož některá měření nebyla zaznamenána a některá měření byla ukončena předčasně. Tato situace nastala kvůli změně oproti standardnímu postupu měření, kdy je velikost zatěžující síly určena dopředu pro

každý vzorek. Autor chtěl určovat velikost zatížení pro daný vzorek na základě výsledků předchozích měření, což mělo za následek, že některá měření proběhla jinak, než autor zamýšlel. I přes to je však žádoucí naměřené hodnoty znázornit v souřadnicích $F_z - N_{lom}$, viz obrázek 77 a 78.



Obrázek 77: Znázornění výsledků experimentu v semilogaritmických souřadnicích



Obrázek 78: Znázornění výsledků experimentu ve standardních souřadnicích

Z grafického znázornění výsledků je patrné, že rozptyl naměřených hodnot je poměrně vysoký a opakovatelnost měření nízká. Navíc se v několika případech stalo, že svorka při vyšší hladině zatížení vydržela větší počet cyklů do lomu (například porovnání

vzorku číslo 6 se vzorky 7 a 8). Tato situace je samozřejmě neodpovídá žádné teorii a je nepřijatelná.

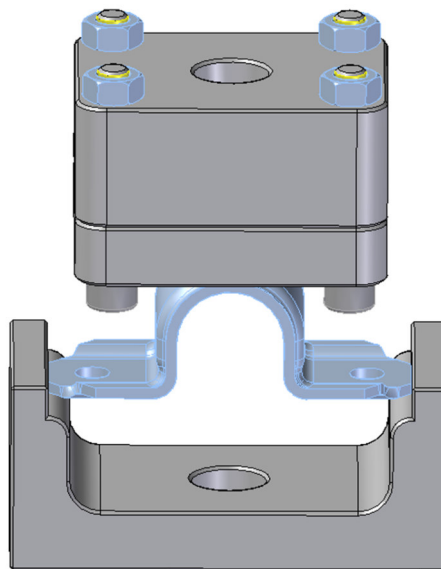
Kromě již výše zmíněných faktorů, které snižují kvalitu měření, je na vině i změna mechanických vlastností pryžového silentbloku v průběhu měření. Opatřebení tohoto dílu je patrné na první pohled, viz obrázek 79.



Obrázek 79: Příklad opotřebení pryžového silentbloku po životnostním měření

9.2 Návrh měření třibodového ohybu

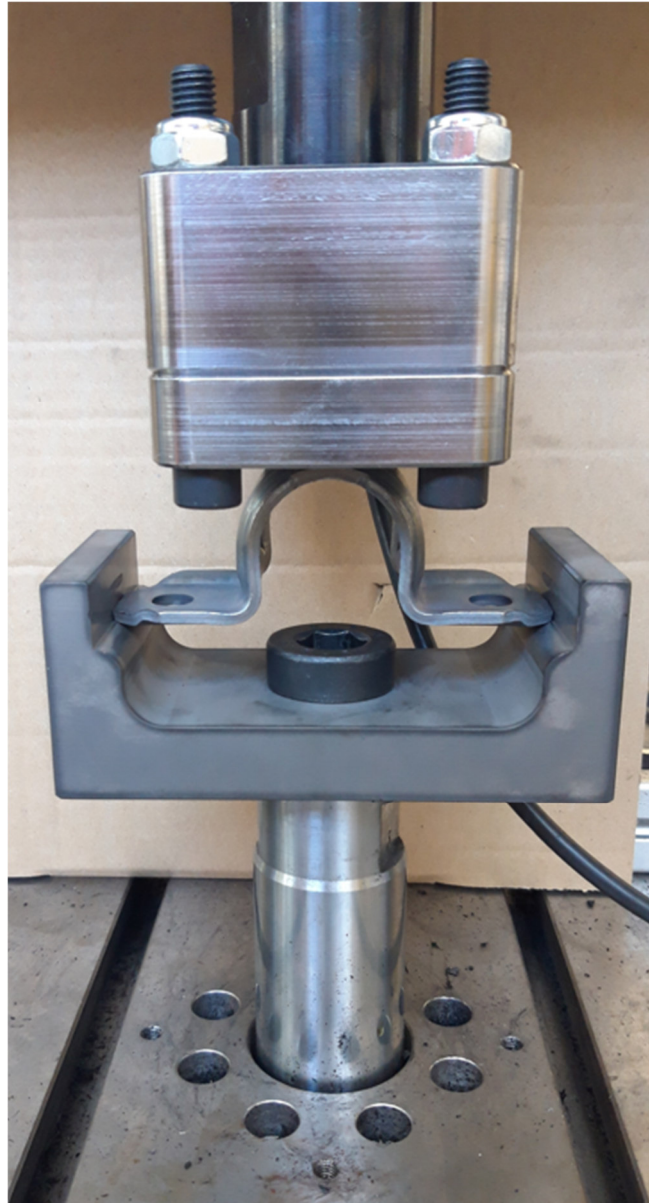
Vzhledem ke zkreslení naměřených dat bylo rozhodnuto provést experimentální měření bez pryžového silentbloku. Na základě výsledků takového měření totiž bude možné posoudit, jakou míru zkreslení do měření vnáší změna mechanických vlastností pryžového silentbloku. Třibodový ohyb bude probíhat se stejným typem svorek a na stejném měřícím stroji jako tomu bylo u předchozího experimentu. Rozdíl bude spočívat v použití odlišného přípravku a ve způsobu namáhání svorky. Návrh měření je patrný z obrázku 80.



Obrázek 80: Návrh třibodového ohybu svorky

9.2.1 Provedení měření tříbodového ohybu

Přípravek pro měření únavových vlastností svorek tříbodovým ohybem umístěný v hydropulzátoru je patrný z obrázku 81. Směr zatěžovací síly je opět vertikální, viz obrázek 76.



Obrázek 81: Provedení tříbodového ohybu svorky

Měření proběhlo na čtyřech předem definovaných hladinách zatížení, viz obrázek 82. Na každé hladině bylo otestováno 10 vzorků. Naměřená data jsou patrná z tabulky 2.

Tabulka 2: Výsledky měření třibodového ohybu

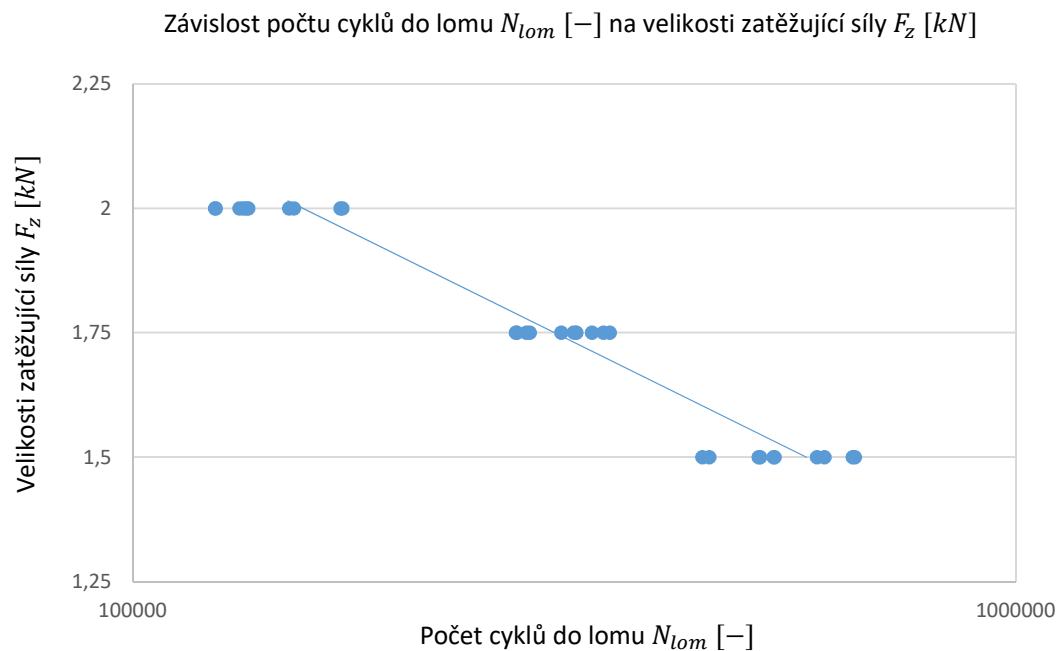
#	Zkušební kus	f [Hz]	N_{lom} [-]	$N_{bez\ lom}$ [-]
1	Nr.1_hladina1	3	124 035	
2	Nr.2_hladina1	3	133 525	
3	Nr.3_hladina1	3	124 236	
4	Nr.4_hladina1	3	134 716	
5	Nr.5_hladina1	3	172 825	
6	Nr.6_hladina1	3	172 038	
7	Nr.7_hladina1	3	152 380	
8	Nr.8_hladina1	3	135 167	
9	Nr.9_hladina1	3	150 374	
10	Nr.10_hladina1	3	132 177	
11	Nr.11_hladina2	3	271 825	
12	Nr.12_hladina2	3	316 380	
13	Nr.13_hladina2	3	272 372	
14	Nr.14_hladina2	3	279 380	
15	Nr.15_hladina2	3	305 889	
16	Nr.16_hladina2	3	318 136	
17	Nr.17_hladina2	3	341 406	
18	Nr.18_hladina2	3	347 110	
19	Nr.19_hladina2	3	281 756	
20	Nr.20_hladina2	3	331 525	
21	Nr.21_hladina3	3	449 899	
22	Nr.22_hladina3	3	595 845	
23	Nr.23_hladina3	3	511 910	
24	Nr.24_hladina3	3	657 953	
25	Nr.25_hladina3	3	513 749	
26	Nr.26_hladina3	3	607 834	
27	Nr.27_hladina3	3	533 382	
28	Nr.28_hladina3	3	654 281	
29	Nr.29_hladina3	3	532 358	
30	Nr.30_hladina3	3	441 836	
31	Nr.31_hladina4	3		2 078 490
32	Nr.32_hladina4	3		2 000 000
33	Nr.33_hladina4	3		2 000 000
34	Nr.34_hladina4	3		2 000 000
35	Nr.35_hladina4	3	1 373 119	
36	Nr.36_hladina4	3		2 000 000
37	Nr.37_hladina4	3		2 000 000
38	Nr.38_hladina4	3		2 000 000
39	Nr.39_hladina4	3		2 000 000
40	Nr.40_hladina4	3		2 000 000

	F_{\min}	F_{\max}	F_m	F_a
hladina 1	1000	5000	3000	2000
hladina 2	875	4375	2625	1750
hladina 3	750	3750	2250	1500
hladina 4	600	3000	1800	1200

Obrázek 82: Definování jednotlivých zatěžovacích hladin

9.2.2 Vyhodnocení třibodového ohybu

Z naměřených hodnot je patrné, že opakovatelnost tohoto měření je daleko vyšší, než opakovatelnost předchozího měření. Ani jednou nedošlo k situaci, že by svorka zatížená nižší silou vydržela víc cyklů, než svorka zatížená větší silou. Tím pádem lze konstatovat, že míra zkreslení, kterou do měření vnáší pryžový silentbok, je pravděpodobně vysoká. Grafické znázornění výsledků je patrné z obrázku 83.



Obrázek 83: Znázornění výsledků třibodového ohybu v semilogaritmických souřadnicích

10 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout úpravy, které by vedly k optimalizaci procesů, jež probíhají v rámci prototypové výroby svorek stabilizátorů ve vývojovém oddělení firmy Mubea. Pro proces návrhu rozměrů polotovaru svorky byla na základě teoretických poznatků navržena nová metodika. Pro proces návrhu výrobních nástrojů byly na základě teoretických poznatků navrženy možné dílčí úpravy. Pro proces kontroly fyzických dílů svorek pomocí 3D skeneru byl navržen postup tvorby 3D SCAN modelů a následného vyhodnocení. Pro proces experimentálního měření byly navrženy úpravy, které eliminují některé vlivy zkreslení. Tím byly vytyčené cíle této práce splněny.

Práce je koncipovaná do dvou částí, přičemž první část je rešeršního charakteru a jsou v ní shrnovány nejdůležitější teoretické poznatky související s procesy prototypové výroby svorek stabilizátorů. Druhá část je analytického charakteru – na základě teoretických poznatků jsou zde navrženy nové metodiky a úpravy těch stávajících. V druhé kapitole je představena a popsána vyráběná součást - svorka stabilizátoru. V dalších třech kapitolách jsou popsány vybrané teoretické poznatky k okruhům: technologie tváření (lisování), technologie 3D skenování, únava materiálu. V šesté kapitole je popsána situace ve firmě, aby v následujících třech kapitolách mohly být navrženy úpravy zmíněných procesů.

Navržené metodiky a úpravy je třeba ověřit v praxi a posoudit jejich zavedení. Dále je třeba se zaměřit i na procesy, které ve zmíněném vývojovém oddělení sice neprobíhají (viz kapitola 6), ale jsou součástí procesu prototypové výroby. Tato práce je tak pouze dílčí částí pokračujícího procesu optimalizace prototypové výroby svorek stabilizátorů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČVANČARA, V. *Návrh fixačního přípravku pro únavové zkoušky svorek stabilizátorů*. Praha, 2020. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní.
- [2] KRASULA, J. *Návrh stabilizátoru automobilu*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [3] VLK, F. *Podvozky motorových vozidel*. Brno, 2000. Nakladatelství a vydavatelství VLK. ISBN 80-238-5274-4.
- [4] NOVOTNÝ, J. *Technologie 1: slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. Praha, 2006. Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-02351-6.
- [5] KLIBER, J. *Základy tváření kovů*. 3. vydání. Ostrava, 2008. VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1794-1.
- [6] PROCHÁZKA, J. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha, 1982. Ediční středisko Českého vysokého učení technického.
- [7] TATÍČEK, F. a HALTUF, R. *Akademie tváření: stříhání*. MM Průmyslové spektrum. 2010, 14(6), 72-74. ISSN 1212-2572.
- [8] TATÍČEK, F. a PILVOUSEK, T. *Akademie tváření: ohýbání*. MM Průmyslové spektrum. 2010, 14(8), 52-53. ISSN 1212-2572.
- [9] PAŠALOV, T. *Výroba části podávacího mechanismu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie.
- [10] RICHTER, D. *Optimalizace nastavení rovnaček pro odstranění vlnitosti za tepla válcovaného plechu*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava.
- [11] *Ruční zpracování kovů: rovnání a ohýbání, sekání, nýtování* [online] [cit. 2022-07-10] Dostupné z: <https://digit.isste.cz/op-hs/assets/793230837126.%20Rucni%20zpracovani%20kovu%20rovnani%20a%20ohybani,%20sekani,%20nytovani.pdf>
- [12] VEBER, J. *Řízení jakosti a ochrana spotřebitele*. 2. aktualiz. vyd. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1782-1.
- [13] RAJA, V. a FERNANDES, K. J. *Reverse engineering: an industrial perspective*. London: Springer, 2008. ISBN 978-1-84628-855-5.
- [14] WANG, W. *Reverse Engineering Technology of Reinvention*. Hoboken: CRC Press, 2010. ISBN 9781439806319.
- [15] PREČAN, F. *Aplikace reverse engineeringu na součást sportovního vybavení*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní.

- [16] Rapid prototyping: *Souřadnicové měřicí stroje*. Katedra výrobních systémů: 3D digitalizace a Rapid Prototyping [online]. [cit. 2022-07-10]. 2011. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/rp1_skripta.pdf
- [17] ČERMÁK, J. *Metody 3D skenování objektů*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [18] ŠNAJDÁREK, L. *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] HRBKOVÁ, E. *Aplikace reverzního inženýrství v oblastech s vysokými požadavky na přesnost*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní.
- [20] LH87. In: Brtservis.cz [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://brtservis.cz/wp-content/uploads/2022/02/LH87-2G-685x1024.jpg>
- [21] ZUNA I., POUŠEK L: *Úvod do zobrazovacích metod v lékařské diagnostice*. Praha 2000. Vydavatelství ČVUT v Praze.
- [22] Rejstřík pojmů. <https://www.nzip.cz> [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/rejstrik-pojmu>
- [23] SOLDÁT, F. *Reverse engineering – rekonstrukce modelu olejového čerpadla*. Praha 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní.
- [24] SKOUPÝ, P. *3D optické měřicí a skenovací systémy pro strojírenství*. Brno 2007. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [25] DOKOUPIL, F. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [26] TIŠNOVSKÝ, P. *Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700*. Elektrověda 2003. ISSN 1213-1539.
- [27] RŮŽIČKA, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha, 1989. Ediční středisko ČVUT v Praze.
- [28] MICHALEC, J. *Pružnost a pevnost II*. Praha, 1994. České vysoké učení technické v Praze. ISBN 80-01-01087-2.
- [29] *Technologie tváření kovů* [online]. [cit. 2022-07-20]. Technická univerzita Liberec. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Uložení zkrutného stabilizátoru na podvozku automobilu [1].....	2
Obrázek 2: Břity stabilizátoru [2].....	4
Obrázek 3: Kovopryžové pouzdro zkrutného stabilizátoru [1].....	4
Obrázek 4: Stříhání [4] (upraveno).....	10
Obrázek 5: Fáze stříhání [9] (upraveno).....	11
Obrázek 6: Průběh střížné síly [7] (upraveno).....	12
Obrázek 7: Ohýbání [8] [10] (upraveno).....	12
Obrázek 8: Schéma napětí a deformace při ohýbání [8].....	13
Obrázek 9: Odpružení [8].....	14
Obrázek 10: Přetvoření průřezu při ohybu [8].....	14
Obrázek 11: Zvlnění plechu [10].....	16
Obrázek 12: Rovnání plechu [11].....	16
Obrázek 13: Schéma procesů klasického a reverzního inženýrství [15].....	18
Obrázek 14: Proces 3D skenování [16] (upraveno).....	19
Obrázek 15: Rozdělení 3D skenerů [17] (upraveno).....	20
Obrázek 16: Destruktivní 3D skener CSS-3000 [18].....	21
Obrázek 17: Kloubové paže a souřadnicový měřicí stroj [13].....	22
Obrázek 18: SMS LH 87 od firmy Wenzel [20].....	23
Obrázek 19: Tvary měřících dotyků [16].....	24
Obrázek 20: Ekvidistantní plocha naskenovaná pomocí SMS [16].....	25
Obrázek 21: 3D skenery na mechanické, respektive robotické paži [13].....	26
Obrázek 22: Princip výpočetní tomografie [21].....	27
Obrázek 23: Vizualizace 3D skenování metodou CT [23].....	28
Obrázek 24: Schéma 3D skenování metodou CT [13] (upraveno).....	29
Obrázek 25: Triangulační metoda [13] (upraveno).....	30
Obrázek 26: Metoda měření doby letu [13] (upraveno).....	31
Obrázek 27: Stereovidění [25].....	32
Obrázek 28: Princip interferometru [18].....	33
Obrázek 29: Náhodný průběh napětí v čase [27].....	34
Obrázek 30: Harmonický průběh napětí v čase [27].....	34
Obrázek 31: Druhy harmonického zatížení [28].....	35
Obrázek 32: Vzhled lomové plochy [1] (upraveno).....	36
Obrázek 33: Tvary Wöhlerových křivek [27].....	37
Obrázek 34: Členění oblastí únavy [27].....	38
Obrázek 35: Schéma konstruování s ohledem na únavu.....	38
Obrázek 36: Hysterezní smyčka po prvním zatěžovacím cyklu [27].....	39
Obrázek 37: Změny tvaru hysterezních smyček [27].....	39
Obrázek 38: Sériová výroba svorky postupovým lisováním.....	42
Obrázek 39: Odebrání děr modelu svorky.....	43
Obrázek 40: Model svorky před rozvinem.....	44
Obrázek 41: Rozvin modelu svorky pomocí funkce „Flatten“.....	44
Obrázek 42: Upravený rozvin svorky.....	44



Obrázek 43: Hodnoty součinitele posunutí neutrální osy [29] (upraveno)	45
Obrázek 44: Náčrt neutrálního vlákna v příčném směru	45
Obrázek 45: Náčrt neutrálního vlákna v podélném směru	46
Obrázek 46: Náčrt středního vlákna v příčném směru	47
Obrázek 47: Modelování střední částí - prolisu	48
Obrázek 48: Modely výrobních nástrojů svorky pro první operaci	49
Obrázek 49: Model svorky po druhé výrobní operaci	49
Obrázek 50: Druhá výrobní operace svorky	50
Obrázek 51: Třetí výrobní operace svorky	50
Obrázek 52: Fyzický model svorky z proutypové výroby	53
Obrázek 53: CAD model svorky	53
Obrázek 54: Nabarvená svorka	53
Obrázek 55: Kalibrace polohy snímacích kamer	54
Obrázek 56: Svorka umístěna na rotačním stole	54
Obrázek 57: CAD model svorky v programu Colin 3D	55
Obrázek 58: Určení počtu rotací	55
Obrázek 59: První snímek svorky	56
Obrázek 60: Ořezová rovina	56
Obrázek 61: Model svorky po první sekvenci	57
Obrázek 62: Síťovaný (polygonový) model svorky	57
Obrázek 63: 3D SCAN model svorky ve formátu STL	58
Obrázek 64: Část výrobního výkresu svorky s vyznačenými parametry	58
Obrázek 65: Spuštění nástroje Inspector Full	59
Obrázek 66: Importování modelů svorky	59
Obrázek 67: Zarovnání modelů svorky z programu Colin 3D	59
Obrázek 68: Barevná mapa s použitím zarovnání „Best fit“	60
Obrázek 69: Výsledné zarovnání 3D SCAN modelu svorky na CAD model	60
Obrázek 70: Vytvoření geometrického prvku díry	61
Obrázek 71: Odměření rozměru osové vzdálenosti	61
Obrázek 72: Výsledky měření funkčních parametrů svorky	62
Obrázek 73: Vybraný typ svorky pro experimentální měření	65
Obrázek 74: CAD model a fyzický díl kovopryžového uložení stabilizátoru	65
Obrázek 75: Kovopryžové pouzdro upevněno k přípravku	66
Obrázek 76: Svorka v hydropulzátoru	66
Obrázek 77: Znázornění výsledků experimentu v semilogaritmických souřadnicích	68
Obrázek 78: Znázornění výsledků experimentu ve standardních souřadnicích	68
Obrázek 79: Příklad opotřebení pryžového silentbloku po životnostním měření	69
Obrázek 80: Návrh tříbodového ohybu svorky	69
Obrázek 81: Provedení tříbodového ohybu svorky	70
Obrázek 82: Definování jednotlivých zatěžovacích hladin	72
Obrázek 83: Znázornění výsledků tříbodového ohybu v semilogaritmických souřadnicích	72



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výsledek experimentu	67
Tabulka 2: Výsledky měření tříbodového ohybu.....	71