

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**JOSEF
HEJNIC**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejnic** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **456158**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Moderní postup návrhu procesu profilování

Název diplomové práce anglicky:

Modern design process of rolling process

Pokyny pro vypracování:

- 1) úvod, seznámení s problematikou
- 2) Popis základní problematiky procesu profilování
- 3) Návrh postupu činností pro navržení procesu profilování v moderních podmínkách
- 4) Ověření navrženého postupu na vybraném díle
- 5) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Sheet Metal Forming Processes and Die Design, Vukota Bojanovic
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming
Metal Forming Handbook, SCHULER GmbH
ČSN EN ISO 6892-1
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. František Tatíček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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


Ing. Lukáš Chrástanský, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


Ing. František Tatíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

24.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací s vedoucím práce Ing. Františkem Tatíčkem, Ph.D. K vypracování jsem použil materiály, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 30. 7. 2020,

.....

Bc. Josef Hejnic

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D za pomoc při vypracování práce, podporu a trpělivost, Ing. Lukáši Chrášťánskému za pomoc a ochotu při vypracování simulací. Dále bych chtěl poděkovat firmě Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje za zázemí pro tvorbu experimentální části. Velké díky patří kolegovi Ing. Josefu Hejnicovi staršímu za cenné rady a nenahraditelné zkušenosti v tomto oboru, které mi předával v průběhu mnohých let praxe. Na neposledním místě bych chtěl poděkovat své rodině, Matoušovi a Markétě Krajníkovým a dalším přátelům, kteří mi byli oporou při psaní diplomové práce i celém studiu.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Název diplomové práce:	Moderní postup návrhu procesu profilování
Akademický rok:	2019/2020
Autor:	Bc. Josef Hejnic
Vedoucí práce:	Ing. František Tatíček, Ph.D.

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o problematice technologie profilování plechu. Zvyšování nároků v podobě složitých tvarů, zpřísňujících se geometrických tolerancí profilu a využití netradičních materiálů komplikují proces navržení profilace. Nejprve byl zpracován přehled technologie ohýbání a konstrukce profilovacích linek. Ve druhé části byl vypracován postup pro stanovení parametrů procesu profilování včetně začlenění moderních technologií do procesu navrhování. Tato metodika byla otestována na dvou zástupných příkladech – otevřeném profilu ve tvaru „U“ z materiálu DC04 a uzavřeném profilu – svařované trubce s tloušťkou stěny 0,1 mm z perspektivního materiálu Inconel 625. Při experimentu došlo k úspěšné výrobě profilů splňující veškeré parametry. Práce tak přináší úspěšný způsob navrhování profilací schopný obstát i v současně se zvětšujících nárocích na profilování.

Klíčová slova: profilování, návrh tvarových válců, tváření plechu

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 94

Počet obrázků: 57

Počet tabulek: 9

Annotation

University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Title of work:	Modern design process of rolling process
Academic year:	2019/2020
Author:	Bc. Josef Hejnic
Supervisor:	Ing. František Tatíček, Ph.D.

Abstract:

The master thesis is focused on the sheet metal profiling technology. The process of designing roll tools is exerting growing design complexity. This is mainly caused by increasing demands on forming profiles with complex shapes, by tightening geometric tolerances and by the use of progressive materials. First part of the thesis reviews the essential principles of bending technology and construction of profiling lines. The second part of the thesis presents a new method for designing roll tools according to defined input process parameters. The design is then tested using modern technology of simulation. This method of design roll tools was tested on two different examples - an open U-shaped profile made from DC04 material and a closed profile - a welded tube with a wall thickness of 0.1 mm made of perspective material Inconel 625. Both sets of roll tools were successfully produced and profiles met all requirements. The work thus brings a successful method of designing profiling process, able to face the simultaneously increasing demands on roll forming.

Keywords: roll forming, design of roll tools, sheet metal forming

Volume of work

Number of pages: 94

Number of pictures: 57

Number of tables: 9

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Technologie tváření	12
	2.1 Deformace v materiálu, tvařitelnost.....	12
	2.2 Technologie ohýbání	13
	2.2.1 Deformace v ohybu	13
	2.2.2 Neutrální osa	13
	2.2.3 Odpružení.....	14
3	Základní rozdělení tvářecích strojů.....	16
	3.1 Rozdělení dle charakteru vykonávaného pohybu.....	16
	3.1.1 Tvářecí stroje s přímočarý pohybem.....	16
	3.1.2 Tvářecí stroje s rotačním pohybem.....	17
	3.2 Rozdělení dle technologického určení	17
	3.2.1 Stroje pro objemové tváření	17
	3.2.2 Stroje pro plošné tváření.....	18
	3.2.3 Stroje pro ohýbání.....	19
	3.2.3.1 Mechanické lisy	19
	3.2.3.2 Ohýbačky	19
	3.2.3.3 Ohraňovací lisy	20
	3.2.3.4 Zakružovačky	20
4	Profilovací stroje	22
	4.1 Rozdělení profilovacích strojů.....	22
	4.2 Prvky profilovacích strojů na otevřené profily.....	23
	4.2.1 Sekce přípravy pásy	23
	4.2.1.1 Odvíjecí buben.....	23
	4.2.1.2 Rovnací válce	24
	4.2.1.3 Nastavení pásu	24
	4.2.2 Profilovací sekce.....	24
	4.2.2.1 Navádění.....	24
	4.2.2.2 Profilovací stojany	25
	4.2.2.3 Rovnací hlavy.....	27
	4.2.3 Sekce dělení profilu	27

4.2.4	Paketovací sekce	29
4.3	Prvky profilovacích strojů na uzavřené profily.....	29
4.3.1	Sekce přípravy pásky	29
4.3.2	Profilovací sekce	30
4.3.3	Svařovací sekce	30
4.3.4	Kalibrační sekce	31
4.3.5	Sekce dělení profilu	31
4.3.6	Paketovací sekce	31
5	Návrh procesu profilování	32
5.1	Výpočet rozvinu.....	32
5.2	Určení počtu profilovacích průchodů	34
5.2.1	Faktory ovlivňující počet průchodů.....	34
5.2.2	Výpočet počtu průchodů.....	35
5.3	Profilovací schéma	36
5.3.1	Orientace profilu	37
5.3.2	Vertikální rovina, základní průměry válců.....	37
5.3.3	Tvar profilu v průchodech	38
5.4	Upínací schéma	39
5.5	Kalibrace profilu, přehýbání.....	40
6	Software pro profilování.....	42
6.1	Princip funkce.....	42
6.2	Příklady softwaru pro profilování	43
6.2.1	Copra RF	44
6.2.2	Ubeco & LS-DYNA.....	44
6.2.3	Simufact Forming	45
7	Stanovení experimentu.....	47
8	Návrh profilace „U“ profilu	48
8.1	Vstupní data pro navrhování procesu profilování	49
8.2	Návrh profilace.....	51
8.2.1	Ověření počtu pořadí	51
8.2.2	Vertikální rovina, základní průměry válců.....	52
8.2.3	Výpočet rozvinu.....	53
8.2.4	Profilovací schéma	53

8.2.5	Upínací schéma	55
8.2.6	Výrobní dokumentace	58
8.3	Technologie výroby	60
8.4	Vzorkování.....	60
8.5	Kontrola kvality	63
8.6	Výsledky návrhu a testování „U“ profilu	64
9	Návrh profilace trubky $\varnothing 14,6$ mm	65
9.1	Popis základních charakteristik profilu	65
9.2	Profilovací linka	66
9.3	Návrh profilace	68
9.3.1	Stanovení počtu pořadí	69
9.3.2	Vertikální rovina	70
9.3.3	Výpočet rozvinu.....	71
9.3.4	Profilovací schéma	71
9.3.5	Upínací schéma	73
9.3.6	Výrobní dokumentace	75
9.4	Výroba a testování	76
9.5	Optimalizace procesu.....	77
9.5.1	Výsledky návrhu a testování trubky $\varnothing 14,6$ mm	80
10	Simulace profilování	81
10.1	Vstupní data.....	81
10.2	Průběh nastavení simulace.....	82
10.3	Výsledky simulace, začlenění do procesu návrhu	83
11	Závěr	85
	Seznam použité literatury	87
	Seznam obrázků	92
	Seznam tabulek.....	94

1 Úvod

V poslední době probíhá velký vývoj v různých odvětvích průmyslu, který využívá zpracování dílů pomocí procesu tváření. Tento rozvoj je způsoben čím dál většími nároky na jednotlivé díly, a to nejen v automobilovém průmyslu. Dochází k vytváření čím dál složitějších tvarů i požadavků na vlastnosti, které častokrát přesahují možnosti dosavadních technologických procesů a postupů. Pokrok je umožněn nejen kvůli nově vznikajícím materiálům, jejichž zpracování ale představuje určité výzvy, ale i díky možnosti využití nových postupů a výpočetní techniky pro procesy plošného tváření.

Do způsobů plošného tváření spadá také profilování. Tato technologie spočívá v kontinuálním tváření plechu pomocí několika párů tvarových válců v profilovací lince. Jedná se o postupné tváření, kdy jednotlivé tvary válců na sebe navazují. Využívá se pro výrobu otevřených i uzavřených profilů – nejčastěji svařovaných trubek a jeklů, v rozsahu tloušťek od několika desetin milimetru až po velké profily s tloušťkou až 10 mm. [1]

Profilování se vyznačuje obrovskou efektivitou. Ta je dána kontinuálním zpracováním plechu pomocí rotačních válců. Produktivní profilovací linky jsou schopny zpracovat několik tisíc tun materiálu měsíčně s velice nízkým procentem zmetků. Výhodou profilování je nízká energetická náročnost i nízké náklady vztažené na vyrobený kus. Těmito přednostmi se stávají profilovací linky žádanými v různých odvětvích průmyslu, například automobilovém, stavebním či lékařském. [1]

Vlivem vývoje návazných průmyslových odvětví dochází k značné změně výrobního sortimentu. Dříve byla na profilovacích linkách běžná výroba profilů s jednoduchými průřezy z běžné konstrukční oceli bez povrchové úpravy. Tyto profily nacházely uplatnění především ve stavebním průmyslu. Změny struktury hospodářství v Evropě vedly k omezení těžkého průmyslu a tím i provozu části oceláren. Produkce běžných ocelí se přesunula do zemí s levnější pracovaní silou i volnějšími ekologickými limity pro výrobu. Tím došlo v evropských podmínkách k utlumení produkce standardních profilovacích linek, které produkovaly velké množství profilů s nízkými nároky na přesnost a kvalitu.

Současné trendy vedou k využívání moderních materiálů, které mají specifické vlastnosti. Díky nim jsou kladeny mnohem větší nároky na proces navrhování válců. Důraz je kladen i na přesnou výrobu nástrojů – tvarových válců, jejich kvalitní tepelné zpracování a využití povlakování. Díky tomu jsou schopny odolat lépe pevným materiálům, které v dnešní době musí zpracovávat. Dalším požadavkem je dlouhá životnost nástrojů při zachování stále přísnějších tolerancí výrobku.

S těmito požadavky rostou nároky na návrh profilace. Zvětšuje se jeho obtížnost, která již tak není jednoduchá, především kvůli rozsáhlosti celého návrhu. V rámci procesu se navrhují desítky nástrojů, které na sebe navazují. Pro tyto nástroje se volí celá řada parametrů mimo jejich tvaru i například základní průměry válců či jejich podélná rozteč. Pokud při procesu dojde k zanesení chyby do návrhu, na přepracování a úpravu se vynakládají značné finanční náklady a dochází k prodloužení celé výroby.

V současné situaci neexistuje jednoznačný postup navrhování profilací. Technologové postupují především dle svých předchozích zkušeností. Tyto zkušenosti jsou obtížně přenositelné, a proto je cílem firem zabývajících se výrobou profilovacích linek dosáhnout exaktního způsobu navrhování profilací s využitím simulací tváření plechu v profilaci. To by mělo vést ke konstantním výsledkům a snížení závislosti na lidském faktoru. Celý návrh se komplikuje faktem, že většina výpočtů v návrhu profilace je definována pomocí empirických vztahů s omezenou platností.

S ohledem na výše uvedenou problematiku profilování vznikla tato práce, jejíž cílem je stanovit proces návrhu profilace, kde je možné využít moderní postupy a zároveň zachovat i prvek zkušeností tam, kde jsou nezbytné. Výsledkem by mělo být ověření tohoto postupu na rozdílných příkladech a ověřit tím všeobecnou využitelnost tohoto postupu při navrhování profilací v moderních podmínkách.

V diplomové práci bude popsána technologie ohýbání a profilování z technologického pohledu. Bude rozebrána konstrukce profilovacích strojů pro otevřené i uzavřené profily. Další částí práce je rozbor nezbytných parametrů, které vstupují do procesu profilování. Budou popsány jednotlivé fáze navrhování procesu profilování a stanoven postup, který bude následně ověřován. Prostor bude věnován i simulačním programům, principům jejich funkce a možnostem jejich začlenění do procesu navrhování.

V experimentální části budou pomocí tohoto postupu navrženy dvě profilace. První, na které bude provedeno ověření tohoto postupu, bude vyrábět díly do automobilového průmyslu z oceli určené pro hlubokotažné výlisky. Druhá bude sloužit k výrobě trubky o průměru 14,6 mm z žárupevné slitiny niklu Inconel 625 o velice nízké tloušťce 0,1 mm.

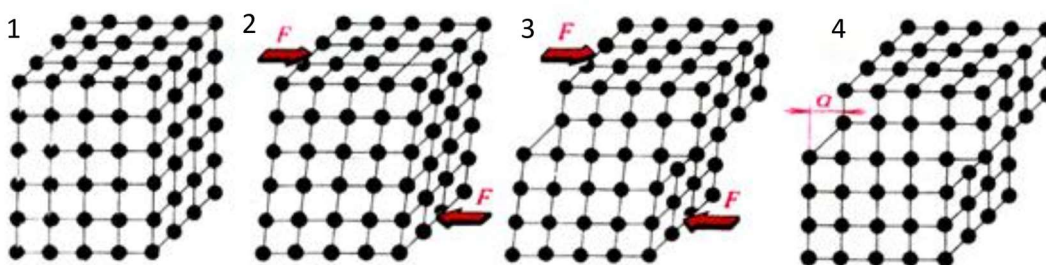
2 Technologie tváření

Tváření je výrobní proces, při kterém je formován vstupní materiál tak, aby bylo docíleno tvaru výrobku bez využití třískového obrábění materiálu. Základním předpokladem pro tváření je, aby tvářecí síla vyvolala v materiálu dostatečné napětí, které bude stačit na překonání meze kluzu tvářeného materiálu. [2]

Proces tváření je výrazně ovlivněn teplotou, dle které ho dělíme na tváření za studena, za tepla a za poloohřevu. Procesy tváření můžeme rozdělit také podle působení vnějších sil na objemové a plošné tváření. Tyto procesy je možné dělit a hodnotit i podle dalších kritérií, například podle tepelného efektu, případně stupně deformace. Proces plošného tváření, který probíhá za studena, se nazývá profilování. [2]

2.1 Deformace v materiálu, tvařitelnost

Deformace se projevuje změnou tvaru materiálu bez vzniku trhlin. Pokud po odlehčení zatížení materiálu dojde k návratu do původního tvaru, jedná se o elastickou (pružnou) deformaci. Tato deformace zapříčiňuje odpružení materiálu. Odpružení pak vnáší nepřesnosti do procesu tváření, které je potřeba eliminovat. Pokud při zatěžování se budou dále zvyšovat zatěžující síly, při kterých se zvýší napětí a bude překročena mez kluzu, v krystalové mřížce materiálu dojde k přesmyknutí vazeb a vzniku trvalé (plastické) deformace. Ta je ale stále doprovázena elastickou deformací. Schéma změn v krystalu při deformaci je znázorněn na obrázku č. 1. [2, 3]



Obrázek 1 Průběh deformace v krystalové mřížce materiálu: 1 – nedeformovaný krystal, 2 – vyvolání pružné deformace, 3 – vznik plastické deformace, 4 – trvalá (plastická) deformace po ukončení zatěžování [3]

K přesmyknutí atomů a vzniku další deformace v průběhu tváření dochází čím dál obtížněji vlivem výskytu vad v krystalu a narážení na hranice zrn. Přesuny atomů se postupně zastavují a dochází k vyčerpání plasticity materiálu. Při dalším zvyšování zatěžovací síly by došlo k překonání meze pevnosti a vzniku trhlin, které jsou nežádané a výrazně snižují kvalitu výrobku. [2, 3]

Schopnost provádět změny tvaru se nazývá tvařitelnost. Ta patří k technologickým vlastnostem materiálu. Zjišťována je pomocí technologických zkoušek tvařitelnosti. Zkoušek je značný počet, provádí se ty, které se nejvíce podobají technologii, kterou bude zkoušený materiál zpracováván. Mezi základní patří zkouška tahem, zkouška ohybem a zkouška pětčováním materiálu. V současné době se u plechů využívá měření křivky mezních deformací (FLC) pomocí moderních metod snímání procesu tváření kulového vrchlíku (metody Argus a Aramis). [3, 4]

2.2 Technologie ohýbání

Ohýbání je vedle stříhání nejhojněji využívaná technologie zpracování plechu. Patří k historicky nejstarším technologiím. V průběhu historie docházelo k vylepšování této technologie díky větším nárokům kladeným na provedení a na kvalitu produktů. S tím je spojena snaha o lepší zpracování problematiky ohýbání a odpružení.

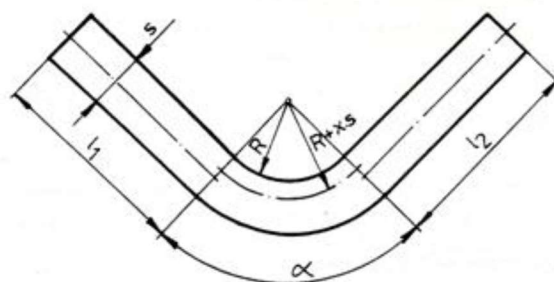
Pro uskutečnění ohybu využíváme ohybového momentu, který v materiálu způsobuje trvalou deformaci. Cílem ohýbání je dosáhnout žádaný tvar bez změny tloušťky materiálu. [2]

2.2.1 Deformace v ohybu

Při působení ohybového momentu dochází k nehomogenní deformaci materiálu. Vlákná materiálu na vnitřní straně ohybu jsou namáhána na tlak, naopak vlákna na vnější straně na tah. Jednotlivá vlákna v těchto částech nejsou namáhána rovnoměrně, ale záleží na jejich poloze vůči neutrální ose ohybu. Čím vzdálenější jsou od neutrální osy, tím dochází k jejich větší deformaci. [3,5]

2.2.2 Neutrální osa

Ve střední části ohybu vznikají oblasti, kde tahová a tlaková napětí nepřekračují mez kluzu daného materiálu, proto se trvale nedeformují. Spojnice těchto dvou oblastí se nazývá neutrální osa. Na neutrální ose nevzniká ani při působení ohybového momentu žádné napětí a tím pádem nedochází ani k plastické, ani elastické deformaci. [3, 6]



Obrázek 2 Posun neutrální osy [3]

Neutrální osa před započítím ohýbání leží uprostřed ohýbaného materiálu. S postupně se zmenšujícím rádiusem ohybu dochází k jejímu posunu směrem k vnitřní straně ohybu (obrázek 2). V tabulce 1 Tabulka 1 uvádím hodnoty součinitele polohy neutrální osy v závislosti na poměru vnitřního ohybového rádiusu k tloušťce. Vláknem ležícím na neutrální ose se tedy nedeformuje. Důležitá je jeho délka, díky které je možné zpětně dle poloměru ohybu a tloušťky správně stanovit rozvin plechu. [6]

Tabulka 1 Hodnoty součinitele polohy neutrální osy v závislosti na poměru ohybového rádiusu k tloušťce [3]

$\frac{R}{t}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40
$\frac{R}{t}$	1	1,2	1,5	2	3	4	Nad 5	
x	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,50	

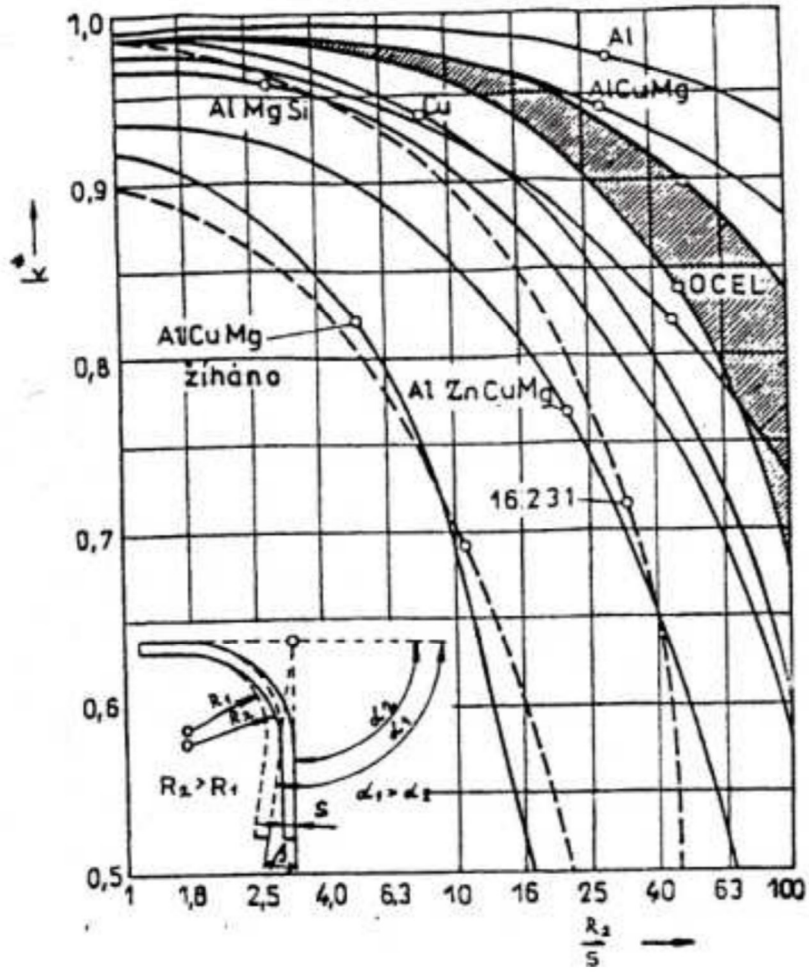
2.2.3 Odpružení

Odpružení způsobuje částečný návrat do původního rozměru tvaru po odlehčení vnějších ohybových sil, které způsobily deformaci. U ohybu způsobuje odpružení úhlovou odchylku γ . Čím má díl větší délku ramena, tím dojde k výraznějším rozměrovým změnám na jeho konci. Odpružení závisí na druhu a mechanických vlastnostech materiálu, poloměru ohybu R , velikosti úhlu ohybu a způsobu, kterým byl ohyb proveden. [3, 6]

Velikost odpružení je možné stanovit dle následujícího vztahu: [3]

$$K = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{R + 0,5 * s}{R + 0,5 * s}$$

Kde r_1 označuje vnitřní poloměr ohybu před odpružením, r_2 vnitřní poloměr ohybu po odpružení, α_1 úhel otevření před odpružením, α_2 úhel otevření po odpružení. Velikost odpružení K pro různé materiály lze zjistit z následujícího diagramu. Vstupní veličiny jsou zaznačeny na obrázku u tohoto diagramu.



Obrázek 3 Diagram velikosti odpružení K pro jednotlivé materiály [6]

3 Základní rozdělení tvářecích strojů

Procesy tváření se v současné době v průmyslu provádí výhradně pomocí tvářecích strojů. Tyto stroje nahradily náročné a nepřesné manuální metody tváření a umožnily tak obrovský rozvoj celé této technologie. Jedná se o zařízení, která musí být schopna překonat odpor materiálu, tak aby došlo k jeho trvalé deformaci. Jejich hlavními výhodami je produktivita a efektivita výroby, přesnost a opakovatelnost procesu u jednotlivých výrobků.

V této kapitole jsou rozděleny tvářecí stroje dle charakteru vykonávaného pohybu, technologického určení a budou zde popsány základní vlastnosti důležité pro mechanismy tváření. V závěru kapitoly je věnován prostor strojům, které jsou vhodné pro technologii ohýbání, která je úzce spojena se samotnou problematikou profilování.

3.1 Rozdělení dle charakteru vykonávaného pohybu

Základní rozdělení tvářecích strojů je dle charakteru pohybu, kterým je uskutečňováno tváření. Mezi nejběžnější způsoby patří tváření pomocí přímočarého a rotačního pohybu. Obecné druhy pohybů jsou pro speciální typy tvářecích operací a nebude jim věnován v této práci prostor.

3.1.1 Tvářecí stroje s přímočarým pohybem

Nejrozšířenější stroje provádějí proces tváření pomocí přímočarého pohybu beranu mezi horní a dolní úvratí. V obou úvratích stroje se rychlost pohybu beranu rovná nule. Podmínkou pro to, aby stroj byl schopen provést tvářecí operaci je, aby ve chvíli kontaktu beranu, případně nástroje upevněného na beranu, byla působící síla stroje F větší než síla F_0 nutná k překonání odporu a dosažení plastické deformace materiálu. energii tohoto stroje lze vyjádřit tímto vztahem:

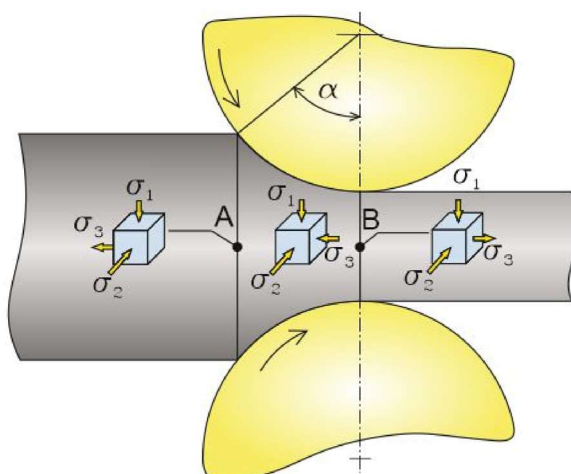
$$A = \frac{1}{2} m * v^2 + (F - mg)(h_1 - h_2)$$

kde m označuje hmotnost pohybujících se částí, v rychlost beranu v daném okamžiku, F působící síla beranu, g gravitační zrychlení, h_1 počáteční poloha tváření, h_2 koncová poloha. [7]

Nevýhodou charakteru tohoto pohybu je, že u strojů s běžnou konstrukcí se využívá k tváření pouze polovina cyklu a druhá polovina slouží pro návrat beranu do výchozí polohy. V současnosti stroje založené na tomto principu výrazně zvýšily počty pracovních cyklů za minutu, což ale může mít nepříjemné důsledky v souvislosti se zvyšující se rychlostí deformace $\dot{\epsilon}$.

3.1.2 Tvářecí stroje s rotačním pohybem

Klasickým zástupcem stroje s rotačním pohybem jsou válcovací tratě. Schéma válcovacího pořadí lze vidět na obrázku 4. Mezi hlavní výhody válcovacích tratí a strojů využívajících rotační pohyb patří možnost kontinuálního tváření bez rozdělení do jednotlivých cyklů, jako tomu je u tvářecích strojů s přímočarým pohybem. Díky tomu mohou tyto stroje dosahovat mimořádné produktivity. [7,8]



Obrázek 4 Schéma tváření pomocí rotačního pohybu – podélného válcování se znázorněnou napjatostí [9]

Do této kategorie spadají i profilovací linky, které podobně jako válcovací tratě využívají rotační pohyb tvarových válců. Avšak ve válcích dochází k postupnému ohýbání plechu s minimální změnou tloušťky zpracovávaného materiálu.

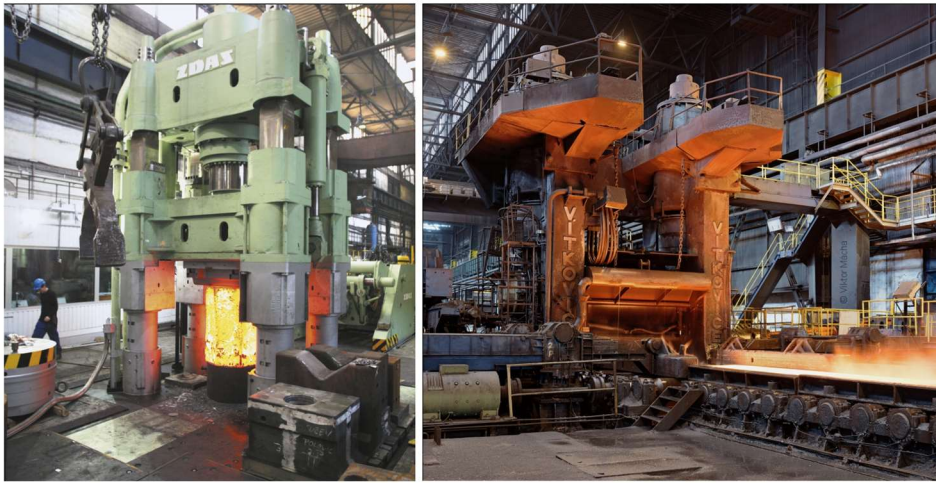
3.2 Rozdělení dle technologického určení

Tvářecí stroje lze rozčlenit dle technologického určení do dvou kategorií – stroje určené pro objemové tváření a stroje určené pro plošné tváření, stříhání a dělení materiálu.

3.2.1 Stroje pro objemové tváření

Stroje umožňují tváření materiálu ve všech směrech. Během tváření se uplatňuje trojosá napjatost. Objemové tváření probíhá při libovolných teplotách – za tepla, za studena, případně za poloohřevu. Stroje na objemové tváření jsou obecně robustnější, musí umět vyvozovat značnou jmenovitou sílu, obzvláště pokud mají tvářet materiál za studena. [3, 7]

Mezi stroje pro objemové tváření patří válcovací stolice a válcovací tratě, lisy, buchary určené pro kování, stroje určené k tažení případně protlačování drátů a profilů (obrázek 5).



Obrázek 5 Stroje pro objemové tváření – hydraulický lis Žďas CKV 1250/1600 (vlevo) a válcovací trať EVRAZ Vítkovice (vpravo) [10, 11]

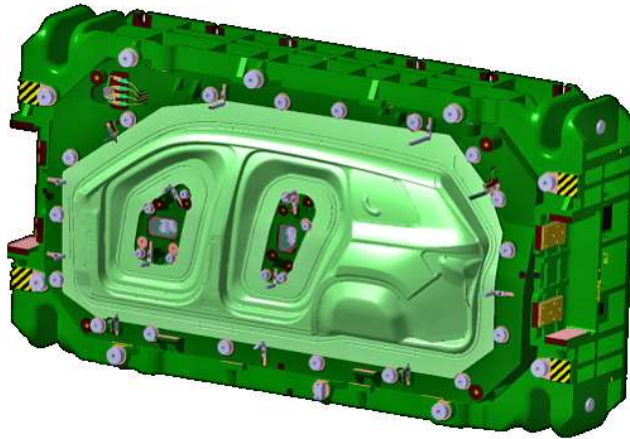
3.2.2 Stroje pro plošné tváření

Při zpracování materiálu ve strojích pro plošné tváření nedochází ke změně jeho tloušťky. Stroje pro plošné tváření jsou dále děleny dle tvářecí operace, která se na nich provádí – ohýbání a zakružování, stříhání, tažení a lisování plechů.

Stroje pro stříhání jsou nejrozšířenější tvářecí stroje. Využití procesu stříhání je součástí prakticky všech výrobních postupů výlisků, výtažků, ale i profilů. Někdy jde o stroje s poměrně širokým využitím, příkladem mohou být hydraulické nůžky na plech či děrovací stroj, kde pomocí jednoduché výměny pracovních nástrojů lze docílit vysoké variability strojů. Pro operace děrování a vystřihování se používají i běžné lisy se specifickými nástroji. Stříhadla, která jsou součástí profilovacích linek jsou naopak vysoce specializovaná, upravená pro stříhání specifického výrobního sortimentu. Při změně vyráběného profilu musí dojít minimálně k výměně střížné kazety, někdy k úpravě celého zařízení. [7, 8]

Pro operaci tažení se používají mechanické a hydraulické lisy, které jsou osazeny tažníkem a tažnicí, někdy i s přidržovačem.

Pokud je lis osazen jedním složitějším nástrojem, který v sobě kombinuje tažení, ohýbání, případně i vysekávání, je označována tato operace za lisování. Nástroj je označován jako razník a raznice (obrázek 6).



Obrázek 6 Ravnice pro lisování dílu karoserie automobilu [12]

3.2.3 Stroje pro ohýbání

Proces ohýbání materiálu může být prováděn na více typech zařízení. Mezi nejjednodušší patří ruční ohýbací přípravky, tento typ zařízení se nejčastěji využívá pro ohýbání trubek a drátů v dílenské výrobě. Mezi stroje využitelné v hromadné výrobě jsou řazeny mechanické lis, ohýbačky, ohraňovací lis a profilovací stroje. Speciálním typem stroje je zakružovačka, kterou se vyrábí profily s kruhovým případně eliptickým průřezem. Ta představuje alternativu pro profilovací stroje produkující uzavřené svařené trubky a oválné profily. [7,8]

3.2.3.1 Mechanické lis

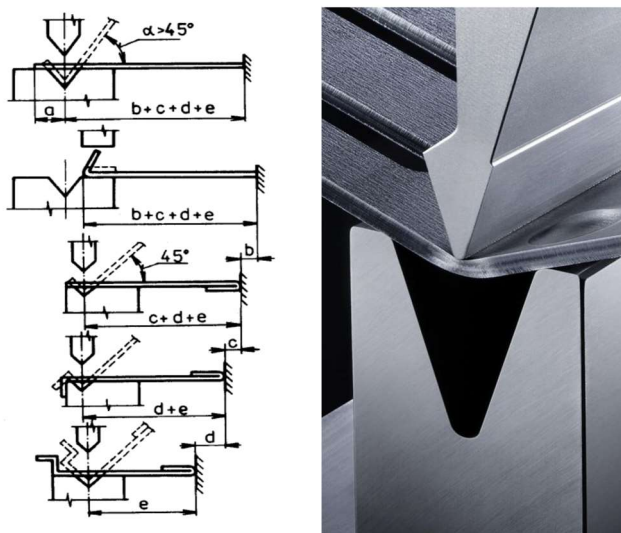
Mechanické lis se využívají pro ohýbání plechových dílů s malými rozměry. Tím ve většině aplikací nepředstavují vhodnou alternativu k profilovacím strojům. Nevýhodou těchto lisů je náchylnost na přetížení v koncové fázi ohýbání – kalibraci. Pokud by došlo k nesprávnému seřízení dolní úvratě, došlo by k poškození tohoto lisu. [7,8]

3.2.3.2 Ohýbačky

Ohýbačky jsou speciálně postavené stroje určené pouze pro tuto operaci. Jsou vhodnou alternativou pro velké součásti až do 4 m délky, na které není možné použít běžný mechanický lis. V jedné straně ohýbačky dochází k upnutí plechu. Po upnutí druhá strana rotačním pohybem vytvoří ohyb o požadovaném úhlu. Ovládání může být ruční či automaticky programově řízené. [5, 7]

3.2.3.3 Ohraňovací lisy

Ohraňovací lisy jsou speciálně upravené mechanické, případně hydraulické lisy. Princip ohýbání se podobá klasickým lisům s nástroji. Způsob ohýbání na ohraňovacích lisech je znázorněn na obrázku 7. Ohraňovací lišty (obrázek 7 vpravo) jsou poměrně univerzálními nástroji, které je možné použít pro více různých aplikací. Lišty mají z různých stran různé tvary, otočením lišty vzniká možnost vytvořit různé ohyby na jednom díle. V moderních strojích se používají programově řízené servopohony případně servopumpy u hydraulických lisů. Díky tomu je možné softwarově řídit polohu lišt vůči sobě, případně sílu, kterou mají vyvodit. Využívají se především pro ostré ohyby, které definujeme $\frac{R}{t} < 6$. Jsou vhodné pro ohýbání rozměrných dílů do délky až 8 m. Jedná se o nejpoužívanější alternativu k profilovacím strojům, obzvláště ve chvíli malosériové výroby. Výhodou jsou nízké (někdy žádné) náklady na zahájení výroby. Naopak ohraňovací lisy dosahují výrazně nižší produktivity obzvláště u složitějších tvarů profilu. [6, 13]

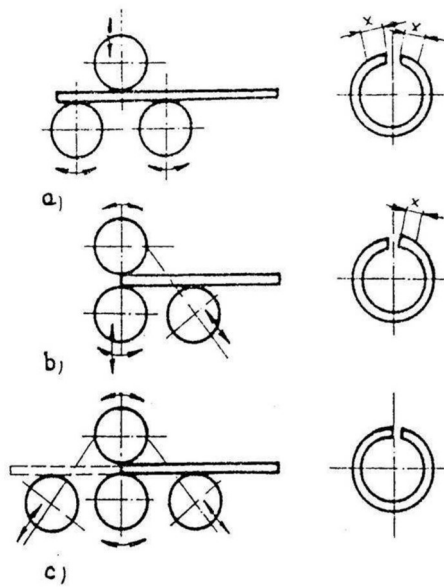


Obrázek 7: Postup ohýbání na ohraňovacím lisu (vlevo) a ohraňovací lišta (vpravo) [13, 14]

3.2.3.4 Zakružovačky

Na zakružovačkách je plech tvářen mezi dvěma válci s hladkým netvarovaným povrchem (obrázek 8). Vzájemnou polohou válců se určuje poloměr zaoblení. Zakružovačky lze členit dle počtu pracovních válců. Nejméně se může skládat ze dvou válců, kde jeden je vyroben z pružného materiálu. Vmačkáváním jednoho válce do druhého dochází k zakroužení materiálu, který se nachází mezi válci. Nejpoužívanější zakružovačky pro tenké plechy jsou čtyř válečkové, které dosahují nej přesnějších výsledků. [6, 13]

Pro malé série profilů oválného či kruhového průřezu jsou voleny před profilovacími stroji především díky nižším pořizovacím nákladům. U zakružování dochází ke vzniku problematických míst na kraji zakružovaného materiálu. Ty zůstávají skoro přímé. U náročných aplikací s přesnými geometrickými tolerancemi se proto i přes vysoké pořizovací náklady volí metoda profilování. [6, 13]



Obrázek 8 Zakružování na tří a čtyř válečkových zakružovačkách [13]

4 Profilovací stroje

Tyto stroje využívají technologii profilování, při které dochází k formování pásu plechu postupným podélným ohýbáním v několika párech tvarových válců tak, aby nedošlo ke změně tloušťky vstupního materiálu. Tvarové válce působí tlakem v místě kontaktu se zpracovávaným materiálem tak, aby bylo dosaženo plastické deformace v plechu. Někdy se podle těchto tvarových válců tyto stroje nazývají válcovací linky. Toto označení ovšem není přesné, protože dochází ke spojování s válcovacími tratěmi, na kterých probíhá výroba odlišného technologického charakteru – objemové tváření prováděné nejčastěji za tepla. Profilování na rozdíl od válcování probíhá za studena.

Jakýkoliv výrobek s konstantním tvarem průřezu v podélném směru lze vyrábět pomocí technologie profilování. Existují i profilovací stroje pro výrobu profilů s nekonstantním průřezem. Tyto stroje jsou oproti běžným profilovacím linkám poměrně choulostivé s ještě většími pořizovacími náklady. Proto se pro takové produkty častěji používá lisování. Výhodou profilovacích linek je především jejich produktivita, a tím i cenová dostupnost vyráběných produktů, díky čemuž se využívají v širokém spektru průmyslových odvětví. Mimo produktivity dosahují i vysoké spolehlivosti a stability provozu, díky čemuž jsou využívány například i pro lékařský průmysl. [15]

4.1 Rozdělení profilovacích strojů

Profilovací linky můžeme rozdělit dle několika kritérií. Hlavním kritériem je, zda se jedná o linku na uzavřené nebo otevřené profily. Linky na uzavřené profily obsahují několik prvků navíc především v souvislosti se svařováním naformovaného profilu. V této kapitole bude nejprve věnován prostor komponentům, ze kterých se sestávají stroje pro výrobu otevřených profilů. Druhá část bude věnována prvkům a odlišnostem linek na profily svařované.

Dalším členěním je to, zda jsou určeny pro výrobu profilů s konstantním průřezem v podélném směru, jak bylo zmíněno v předchozím odstavci. Linky pro výrobu profilů s nekonstantním průřezem vždy obsahují servopohony, které zajišťují axiální pohyb válců v čase. Tyto stroje zaujímají v oblasti profilování naprosto minoritní oblast, proto jim v této práci nebude věnován další prostor.

Profilovací linka je charakterizována maximální tloušťkou a šířkou plechu, kterou lze zpracovávat, počtem profilovacích pořadí či průchodů a rychlostí produkce. Mezi další důležité charakteristiky patří, zda se jedná o start-stop režim výroby, kdy dojde k zastavení pohybu válců před každým oddělením hotového kusu, nebo se

jedná o linku s kontinuální výrobou profilu, která musí být vybavena letmým dělením profilu. [16]

4.2 Prvky profilovacích strojů na otevřené profily

Prvky v této kapitole budou řazeny dle skutečného (technologického) uspořádání na profilovacích strojích. Nejprve budou popsány komponenty sekce přípravy pásy (odvíjecí buben, rovnací válce a nastavování pásu), následně prvky profilovací sekce (navádění, profilovací stojany a rychlovýměnné sekce) a v poslední části sekce dělení materiálu a paketování (studená a teplá pila, stříhadlo, výběhový stůl a paketování).

4.2.1 Sekce přípravy pásy

4.2.1.1 Odvíjecí buben

Odvíjecí buben zajišťuje dodávání vstupního materiálu do dalších částí profilovací linky. Vstupní pás plechu je dodáván namotaný ve svitcích. Tyto svitky jsou umístěny na trnu odvíjecího bubnu. Postupným rotačním pohybem odvíjecího bubnu je zajištěna odmotávání a dodávka pásu plechu do linky. Odvíjecí bubny jsou charakterizovány maximální nosností svitku, šířkou svitku, rozsahem rozevření trnu (pro upnutí svitku za vnitřní otvor). [1, 16]

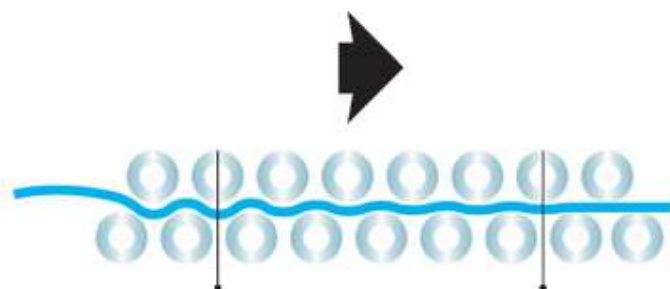
Trn bývá letmo umístěn v těle odvíjecího bubnu. Obsahuje mechanismus rozpínání tak, aby po nasazení svitku došlo k rozepnutí a zajištění svitku za vnitřní průměr. Upínání svitků může probíhat manuálně, elektricky nebo hydraulicky. Upínání těžkých svitků se provádí prakticky pouze pomocí hydraulického řešení. Velké odvíjecí bubny jsou vybaveny přítlačným ramenem s kladkou, která svitek přidrží tak, aby vlivem odpružení materiálu nedošlo k samovolnému rozmotání svitku. [1]

Odvíjecí bubny se rozdělují podle toho, zda obsahují samostatný pohon na hnané a nehnané, případně aktivní a pasivní. U nehnaných odvíjecích bubnů je odmotávání pásu plechu zajišťováno tahem profilovací sekce. V tomto případě dochází k takzvanému odmotávání do smyčky. Toto řešení je jednodušší a cenově dostupnější, používá se především u svitků s nižší hmotností a nižší rychlostí výroby. Nevýhodou je, že odmotávání pomocí tahu zbylé části linky může ovlivnit funkci a stabilitu profilovací sekce. [16, 17]

Hnané odvíjecí bubny jsou vybaveny vlastním pohonem – elektrickým motorem, případně hydromotorem. Jsou řízeny tak, že svitek odmotávají do smyčky. Tato smyčka bývá sledována čidlem (nejčastěji laserové nebo ultrazvukové čidlo), při zaznamenání zmenšení smyčky dojde k odmotání další části plechu. [17]

4.2.1.2 Rovnací válce

Úkolem této části linky je vyrovnat pásku plechu ohnutou především od navinutí na svitku. Rovnací část se skládá z několika válců, nejméně pěti. Na rozdíl od profilovacích pořadí případně tlačných válců není horní válec umístěn proti spodnímu. Plech je tím ohýbán střídavě nahoru a dolů (viz obrázek 9). Postupně se mezi válci zmenšuje přesazení a tím i střídavé ohýbání plechu. [18]



Obrázek 9 Funkce rovnacích válců [18]

4.2.1.3 Nastavení pásu

Tato část linky zajišťuje svaření konce jednoho svitku a začátku druhého. Díky tomu vzniká nekonečný pás plechu. Nastavením pásu plechu jsou eliminovány prostoje, které nastávají při novém zavádění pásu plechu do linky a potřeby vytahovat zbytek starého materiálu z koncových pořadí profilovací sekce. Tím je zvýšena produktivita a snížena zmetkovitost profilovací linky, kdy se musí vyhodit pouze část, která obsahuje příčný svar.

Nejjednodušší navařování se provádí pomocí ruční svářečky. Pro tlustější plechy se používá svařovací metoda TIG, pro tenké plechy do 0,5 mm se využívá odporové svařování. Velké produktivní linky bývají vybaveny automatizovaným nastavením pásy – automaticky dojde k zarovnání obou konců svitků, jejich vzájemnému přitlačení a svaření. [16]

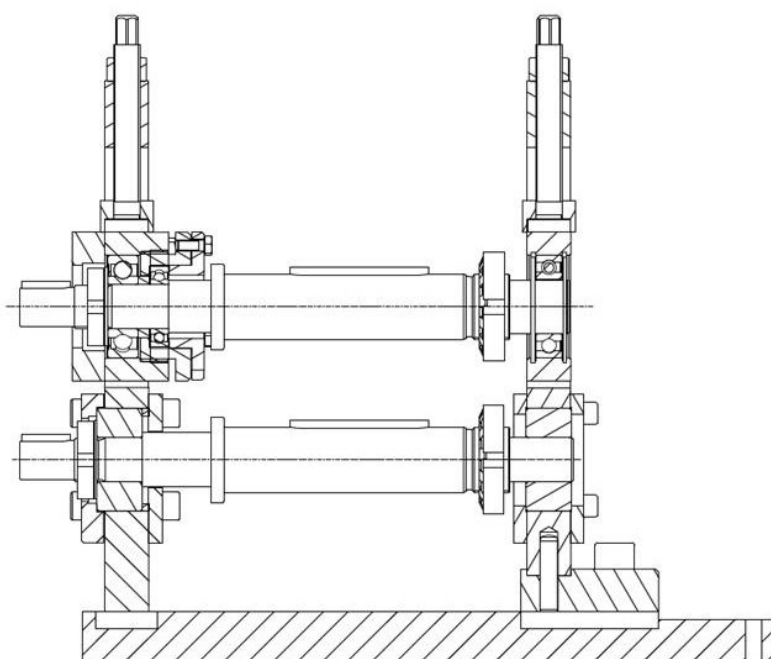
4.2.2 Profilovací sekce

4.2.2.1 Navádění

Před samotnými profilovacími stojany je umístěno navádění pásu plechu. Toto horizontální navádění slouží k usměrnění vstupujícího materiálu do prvního formovacího pořadí. Navádění je nejčastěji řešeno pomocí naváděcích pravítek s ložisky, které brání zadírání krajů pásky. Při špatném navedení pásky plechu dochází k vyosení pásky v profilovací sekci, což má za následek rozměrové nepřesnosti finálního výrobku. V krajním případě může dojít k vzniku přeložky ve válcích či stavu, kdy se plech dostane úplně mimo válce. [1, 16]

4.2.2.2 Profilovací stojany

Profilovací stojany jsou centrální částí linky. Každé pořadí se skládá ze dvou hřídelí s vodorovnými osami. Tyto jsou uloženy ve speciálních ložiskových domcích. Ve valné většině případů je dolní hřídel výškově nepohyblivá, jednotlivé stojany mají osy spodních hřídelí ve stejné výšce. Naopak horní hřídel je včetně uložení pohyblivá ve směru nahoru a dolů. Pohyb zajišťuje šroub, který je uchycen v pouzdře v horní části stojanu. Pomocí pohybu tohoto šroubu lze nastavovat vzdálenost mezi tvarovými válci a tím i ovlivňovat průběh profilování. [19]



Obrázek 10 Řez profilovacím stojanem (bez tvarových válců a distančních kroužků)

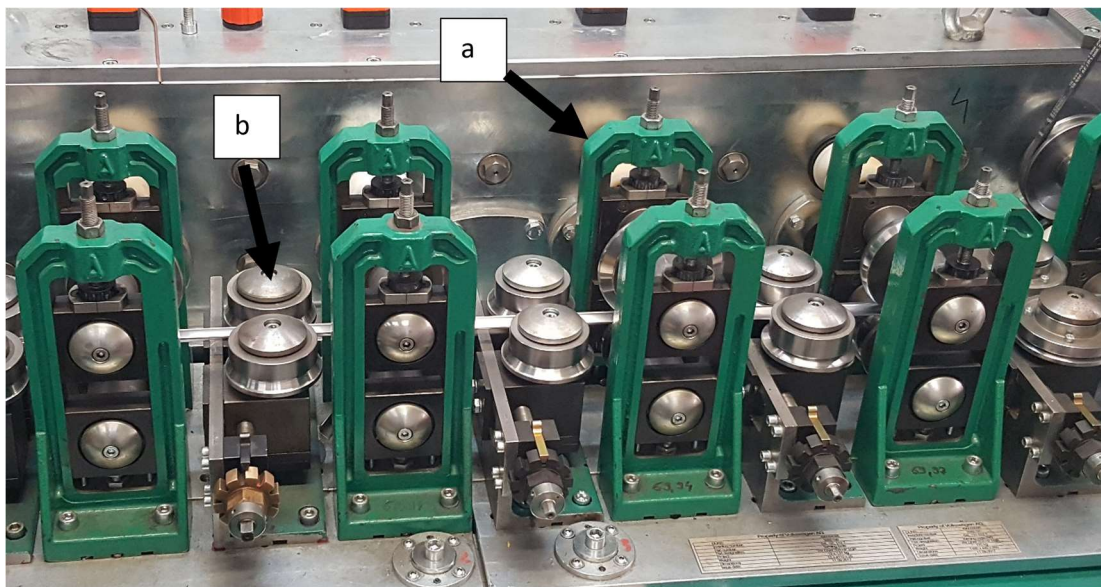
Tvarové válce jsou umístěny na těchto hřídelích. Jedna hřídel může být osazena i více tvarovými válci najednou. Toho se běžně využívá pro zjednodušení výroby tvarového válce, kdy místo jednoho širokého válce se složitým tvarem, se vytvoří více válců s jednotlivými sekcemi tvaru na sebe navazujícími. Válce musí být axiálně vymezeny na hřídeli, k tomu je využito distancí. Celá sestava hřídele, distancí a tvarového válce musí být zajištěna proti axiálnímu pohybu. Při axiální nepřesnosti dochází k přesazení spodního a horního válce, což zapříčiňuje četné problémy při následné produkci – výrobky mají neodpovídající tvar, místně rozválcovanou tloušťku materiálu nebo poškozený povrch. [19]

Hlavními parametry profilovacích stojanů je jejich pracovní šířka, průměr hřídele a válcovací rovina. Válcovací rovina je určena i základním průměrem tvarových válců. Nejčastěji se válcovací rovina umísťuje do dna profilu. V tomto případě zůstává válcovací rovina profilovacích stojanů v průběhu celé sekce stejná.

V případě umístění válcovací roviny do třetiny, případně na střed, profilu dochází u každého dalšího stojanu k poklesu válcovací roviny. Jak horní, tak dolní hřídel může být poháněna z rozvodové klece. Důležitý je poměr otáček horní hřídele vůči dolní. Pokud by byl poměr stanoven bez ohledu na funkční průměry válců, muselo by docházet k prokluzu válců a tím i k poškození pásu plechu. Pokud by v celé lince byly všechny stojany nehnané, musí být zařazena sekce, která má na starosti tažení profilu skrz profilovací sekci. V tomto případě se ale častěji k profilování nepoužívají tvarové válce ale pouze průvlaky. [1, 19]

Pro přenos krouticího momentu mezi hřídelí a tvarovým válcem je použito pero. Při profilování jsou hřídele namáhány na krut a ohyb. Na výslednou přesnost stroje má největší vliv průhyb hřídelí, vůle v jejich uložení a finální obvodové házení sestavy uložení, hřídele a tvarového válce.

Mimo horizontálních stojanů se používají i vertikální stojany, častěji se nazývají mezistolice. Nebývají hnané. Profilovací válce těchto mezistolic tvarují profil z bočních stran. U linek na výrobu profilu s kruhovitým průřezem (nejčastěji svařované trubky) je běžné, že za každou stolicí následuje mezistolice. U některých tvarů profilu nemají využití, nebyly by osazeny žádným válcem, proto se některé profilovací linky sestávají pouze z hlavních horizontálních stojanů. [19]



Obrázek 11 Rozložení charakteristické pro výrobu profilů s kruhovým průřezem. A – hlavní profilovací stojan, B – mezistolice (vertikální profilovací stojan)

Stojany v kalibrační sekci se svojí stavbou neliší od profilovacích stojanů. U otevřených profilů je rozdíl mezi profilovací a kalibrační sekci poměrně minimální. Rozdíl je především technologický. V kalibrační sekci jsou tvarové válce navrhovány již bez velkých ohybů na rozdíl od profilovací sekce. V této sekci dochází k ustálení

tvárových rozměrů a je možné eliminovat odpružení, které vzniká především při dělení profilu. [1, 19]

4.2.2.3 Rovnací hlavy

Rovnací hlavy, někdy nazývané Turkovy hlavy, jsou na profilovací linky osazeny za účelem podélného rovnání vyráběného profilu (obrázek 12). Nejčastěji se osazují opět tvarovými válci, které obepínají celý tvar profilu. Tyto válce nejsou nijak poháněné. Alternativou pro rovnací válce je tvarový průvlak. [16]

Vzájemným vychýlením polohy rovnacích adaptérů dochází k propnutí profilu proti směru vznikajícího ohybu, případně jeho stočení na krut. Pro možnost vytvoření ohybového momentu je potřeba tří bodů, proto se nejčastěji využívají tři rovnací hlavy. Někdy je jedna nahrazena posledním kalibračním pořadím, takže ke správné funkci stačí pouze dvě. [16, 19]

Ve speciálních případech se používají i tvarové průvlakky, které se využívají především u speciálních profilů. Díky nim je možné lépe vytvořit i profil s konstantním podélným rádiusem. Běžně se ale rovnací hlavy používají k dosažení lepší přímosti a odstranění zkroucení profilu.



Obrázek 12 Rovnací hlava [20]

4.2.3 Sekce dělení profilu

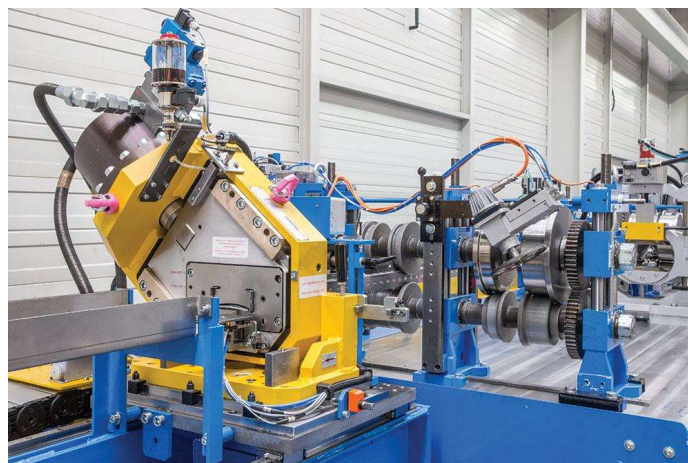
Po narovnání profilu dochází k dělení profilu na délku. K dělení slouží několik metod, nejběžnější je řezání teplou či studenou pilou a stříh. Stříh dělíme na odpadový a bezodpadový. Alternativními metodami dělení jsou například rozbrušování řezacími kotouči, které se používá u profilů s tloušťkou stěny

v desetinách milimetru, a také řezání laserem, jehož nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. [16]

Některé profily se vyrábí pouze jako polotovary pro další zpracování, jiné se dělí přímo na délku finálních kusů a dále se již neupravují. U finálních produktů je kladen větší důraz na přesnost děleného profilu. Délka profilu je měřena nejčastěji IRC (Incremental Rotation enCoder) snímačem umístěným těsně před sekci dělení profilu. Dosahovaná přesnost se pohybuje kolem milimetru na šestimetrových kusech při běžných výrobních rychlostech. U krátkých kusů je možné dosáhnout přesnosti dělení v desetinách milimetru. [16, 21]

Základní rozdělení stříhnu z pohledu funkce profilovací linky je na systém start-stop a letmé dělení. U systému start-stop dochází u každého kusu k zastavení materiálu v profilovací části. Následuje cyklus dělení, po jehož dokončení se opět pokračuje v profilování plechu. Výhoda tohoto řešení je především úspora v pořizovacích nákladech, nevýhodou zůstává nižší produktivita linky. Ta je způsobena časem prodlevy při dělení profilu i tím, že linka nemůže dosahovat takových rychlostí, případně by musela obsahovat pozvolný náběh, protože jinak by došlo k prokluzu mezi válci a páskou plechu. [21]

Systém letmého dělení (obrázek 14) přispívá ke stabilnímu a konstantnímu chodu profilovací sekce. Jeho nevýhodou je větší konstrukční složitost i vyšší požadavky na řízení stroje, kdy musí být dobře nastavena synchronizace mezi děličkou a zbytkem výrobní linky při všech rychlostech stroje. Další nevýhodou je zástavbová délka letmého dělení, která při vysokých výrobních rychlostech v kombinaci s využitím dělení pilovým kotoučem dosahuje rozměrů až 10 m. [16, 22]



Obrázek 13 Letmé stříhadlo [22]

4.2.4 Paketovací sekce

Poslední částí linky je paketovací sekce. Oddělený profil je dopraven na výběhový stůl. Odtud je buď automaticky, nebo ručně ukládán do beden nebo na palety. Z větších profilů se vytváří pakety, které je možné dále stohovat na sebe. Na vzhled a rozsáhlost této sekce má vliv velikost vyráběného profilu a rychlost linky. U velkých profilů je nezbytné využití další manipulační techniky – vysokozdvížných vozíků či jeřábů pro přesun do skladových prostorů. U výkonných profilovacích linek je častou příčinou nižší produktivity špatné logistické zajištění odběru hotových kusů. [16]

4.3 Prvky profilovacích strojů na uzavřené profily

V této části bude věnován prostor pouze komponentům profilovacích strojů, které jsou charakteristické pro výrobu uzavřených (svařovaných) profilů. Nejčastěji tyto stroje slouží k výrobě trubek. V této kapitole bude věnován prostor pouze komponentům, kterými se odlišují od profilovacích linek na otevřené profily.

4.3.1 Sekce přípravy pásky

Sekce přípravy pásky bývá u profilovacích linek na uzavřené profily, které zpracovávají větší tloušťky materiálu, doplněna o akumulátor. Akumulátor může být i součástí linek na otevřené profily, ale u výroby uzavřených profilů je jeho využití běžnější. Díky akumulátoru nedochází k zastavování linky a tím ani k přerušení výroby včetně procesu svařování. Tím se snižuje zmetkovitost výroby. Do akumulátoru je možné navinout několik svitků za sebou, a tím vytvořit dostatečnou zásobu materiálu pro výrobu na několik hodin. Hlavními parametry akumulátoru je maximální šíře pásu a hmotnost pásky, kterou je možné do něj navinout, dále maximální převíjecí rychlost, která by měla být až dvojnásobná vůči rychlosti výroby linky. Akumulátory dělíme dle provedení na horizontální a vertikální (obrázek 14). [21]



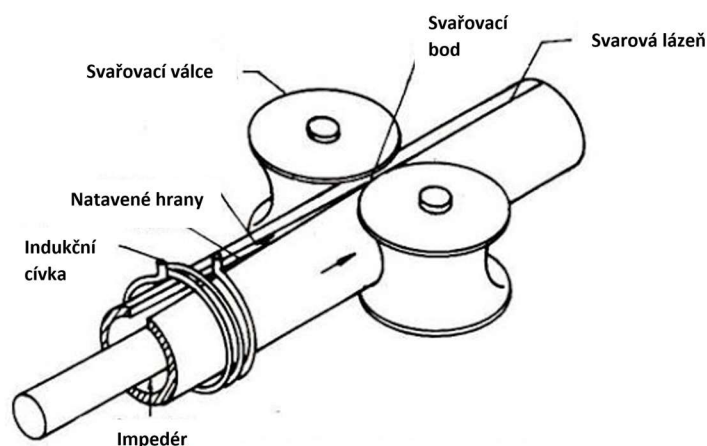
Obrázek 14 Horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) akumulátor

4.3.2 Profilovací sekce

Profilovací sekce se u uzavřených profilů skládá z klasického uspořádání stojan a mezistolice, tak jak to je znázorněno na obrázku 11. Tímto uspořádáním se lépe formuje uzavřený tvar profilu, kdy nedochází pouze k deformaci z horní a dolní strany. Díky tomu je možné tvar uzavřeného profilu dosáhnout na menším počtu hlavních stojanů a dosáhnout i lepšího povrchu vyráběného profilu, protože nedochází k zadírání profilu na kolmých plochách hlavních tvarových válců.

4.3.3 Svařovací sekce

V této sekci dochází k natavení hran pásky a jejímu spojení. Konstrukce této sekce je ovlivněna především technologií svařování. U velkých rozměrů trubek z nelegovaných ocelí se používá indukční svařování (obrázek 15). Vysokofrekvenčním svařováním je možné dosáhnout největší produktivity linky. Pro legované korozivzdorné oceli se používá svařování metodou TIG, případně laseru, a svařování probíhá v ochranném plynu. [16, 23]



Obrázek 15 Princip indukčního (High Frequency) svařování [23]

Důležitou součástí svařovací sekce je navádění štěrbiny do místa svařování. K tomu slouží speciální tvarové válce obsahující vodítka. Vodítka mají zabránit vlnění hran pásky a případnému natočení štěrbiny, které vzniká především vlivem nesymetrického tepelného pnutí v materiálu. Stabilita hran pásky ve svařovací sekci je jedno z kritérií hodnocení, zda byl proces profilování správně navržen. Časté přesazování hran či zvlněné hrany pásky jsou ukazatelem buď špatného seřízení profilovací sekce, nebo špatného navržení tvarů válců. [1, 16]

Svařovací válce spojují natavené hrany pásky. Někdy jsou následované i kovacími válci, které ještě za tepla přidržují a tvarují svarovou lázeň. Oba typy válců jsou velice tepelně exponované. Z tohoto důvodu jsou opatřeny speciálními povlaky

či bývají chlazené tak, aby nedocházelo k změknutí povrchu vlivem působení tepla, nebo jsou vyrobeny z keramiky. [1, 16]

Součásti svařovací sekce může být i monitorování hran pásky před svařením a sledování tvaru svaru. Některé linky jsou vybaveny zařízeními na kontrolu svaru například vířivými proudy či skenováním svaru při speciálním osvětlení. U výroby z pozinkované pásky následně dochází k dodatečnému nanesení zinkové vrstvy na svar.

4.3.4 Kalibrační sekce

U profilovacích linek na výrobu uzavřených profilů je na rozdíl od linek na výrobu otevřených profilů jasně oddělená kalibrační sekce. Kalibrační sekce následuje po chladícím tunelu či v dostatečné vzdálenosti za svařovací sekci tak, aby nedocházelo k tepelnému namáhání tvarových válců. [16, 21]

Svojí stavbou se kalibrační sekce podobá té profilovací, opět je složena z hlavních stojanů, které jsou hnané, a mezistolic. Na začátku kalibrační sekce se používají takzvané twist válce. Tvarem se podobají bočním válcům. Výškovým přesazením těchto twist válců dochází ke stočení svaru. Tak je možné měnit pozici svaru v kalibrační sekci a tím i určit jeho orientaci u finálních výrobků. Kalibrační sekce se používá nejen k dosažení lepší přesnosti původního tvaru, ale také k celkové změně průřezu profilu. Většina uzavřených profilů se svařuje s kruhovým průřezem a až následně je překalibrována do požadovaného tvaru. Příkladem je výroba jechlů s čtvercovým a obdélníkovým průřezem. [16, 21]

4.3.5 Sekce dělení profilu

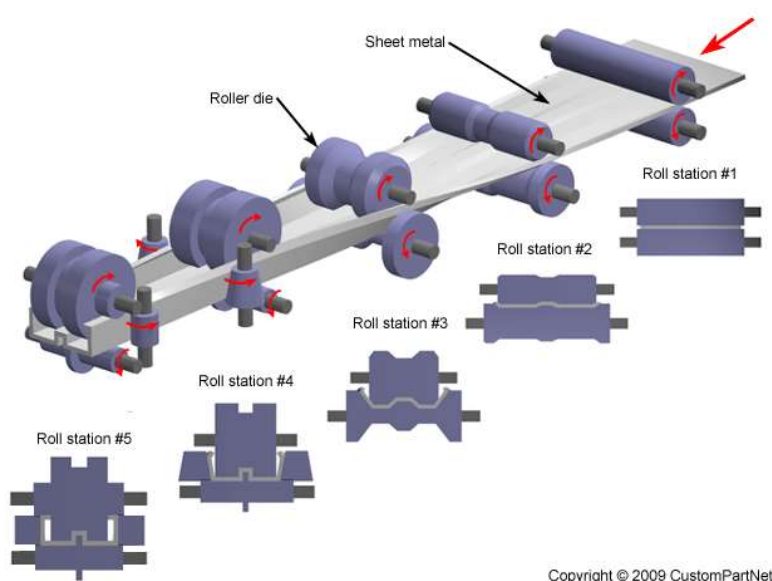
Při výrobě uzavřených profilů není možné použít dělení materiálu založené na metodě stop-start, kdy by docházelo k zastavení pohybu materiálu. Při zastavování by došlo k vadám ve svaru, nejčastěji k absenci svaru, či propalům. Z tohoto důvodu je u uzavřených profilů možné použít pouze letmé dělení. Samotná metoda dělení ovlivněna není.

4.3.6 Paketovací sekce

Podobně jako při dělení materiálu je i v této části linky při výrobě uzavřených profilů dbáno na plynulost chodu linky. U těchto linek se využívají sofistikovanější systémy odběru hotových kusů, na rozdíl od výroby otevřených profilů, kde je možné použít obyčejný výběhový stůl například se shozem do zásobníku. Po naplnění tohoto zásobníku by došlo k zastavení linky, což by opět mělo za důsledek přerušování procesu svařování.

5 Návrh procesu profilování

Tato kapitola se zabývá návrhem samotného profilování – procesu, kdy dochází k postupnému formování pásky plechu do finálního tvaru (obrázek 16). Profilování se provádí nejčastěji na tvarových válcích, proto většina této kapitoly bude věnována jejich navrhování. Alternativou k tvarovým válcům jsou průvlakly, které jsou vhodné především pro malé tloušťky zpracovávaného materiálu. Pro správnou funkci celého procesu je potřeba zvolit velké množství parametrů a dodržet mnoho zásad. I při precizním zpracování návrhu se u složitých profilů stává, že musí dojít k úpravě tvarů válců, případně ke změně koncepce celé profilace.



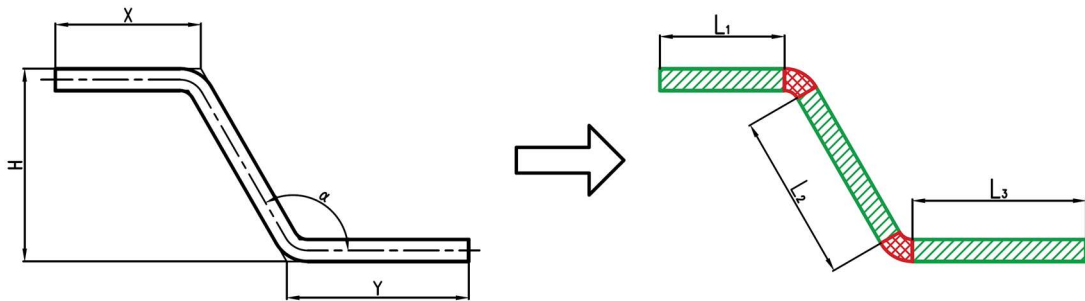
Obrázek 16 Profilování – postupné tvarování pomocí rotačních válců [24]

Postupně bude věnován prostor otázkám orientace profilu, výpočtu rozvinu plechu, určení počtu profilovacích průchodů a také jejich základnímu návrhu. Následně bude věnován prostor samotnému navrhování průchodů a tvarů válců. V závěru kapitoly bude věnován krátký prostor specifickému přístupu při návrhu průvlaků místo válců.

5.1 Výpočet rozvinu

Výpočet rozvinu je důležitá součást navrhování samotného procesu profilování. Při špatné šířce vstupní pásky plechu není možné dodržet správné rozměry a tolerance finálního produktu. Profily se vždy skládají z rovných a zakřivených částí. Samotné sečtení délky rovných částí a středové osy by nepřineslo správně potřebný rozvin materiálu. Část problematiky posunu neutrální osy byla popsána v rámci kapitoly věnující se technologii ohýbání. Koeficientu posunu

neutrální osy někdy také označovanému jako „K“ faktor a značícímu se malým nebo velkým písmenem k, byl věnován prostor v úvodní kapitole této práce. Zde již pouze využiji výše zmíněné poznatky. [3, 6]



Obrázek 17 Rozdělení profilu na segmenty

Při manuálním výpočtu rozvinu pásky se rozdělí profil na rovné a zakřivené segmenty (obrázek 17). Rovné elementy (na obrázku označené zeleně) během profilování zůstávají konstantní, jejich délka se nemění. Nejčastěji je ale profil určen kótami k průsečíkům a případně výškou, proto je pro zjištění délek L_1 , L_2 , L_3 potřeba využít následující výpočet či případně tuto hodnotu získat ze softwaru, který umožní tyto délky zjistit přímo.

$$L_1 = X - (R + t) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

X v tomto vztahu označuje délku segmentu, R poloměr zakřivení, t tloušťku materiálu a α úhel rádiusu.

Pro délku L_2 za předpokladu stejných rádiusů a úhlů sklonu jednotlivých segmentů X a Y :

$$L_2 = \frac{H}{\sin \alpha} - (2R + t) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

Určení rozměru L_3 :

$$L_3 = Y - (R + t) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

Výpočet zakřivených částí spočívá ve výpočtu délky posunuté neutrální osy dle následujícího vztahu. R_i označuje hodnotu vnitřního rádiusu, x polohu neutrální osy.

$$L_R = \frac{\pi}{180} (R_i + xt) \alpha$$

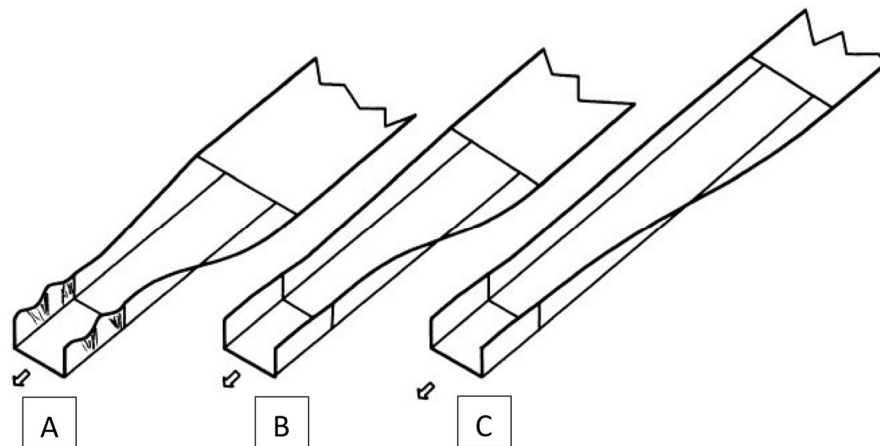
Po výpočtu jednotlivých elementů se hodnota rozvinu rovná jejich součtu. Tento výpočet platí pro všechny typy profilů nezávisle na počtu rovných a zakřivených elementů. [1]

U svařovaných profilů je nutné přidat k samotnému rozvinu ještě přídavek na svar. Část tohoto kovu se odpaří, z části vznikne kořen samotného svaru. Tento přídavek je závislý na metodě svařování a tloušťce materiálu. U laserové technologie svařování odpovídá přibližně 1,2 – 2násobku tloušťky materiálu. [19, 23]

5.2 Určení počtu profilovacích průchodů

Počet pořadí neboli průchodů významně ovlivňuje proces profilování. Cílem je dosáhnout co nejmenšího počtu profilovacích průchodů tak, aby proces byl ještě stabilní a funkční. Při zbytečně velkém počtu průchodů se zvyšuje výrobní cena profilovací sekce. Naopak podceněním počtu vzniknou na profilu vady, nejčastěji zvlnění profilu. Odstranění těchto vad je velice náročné, většinou je spojeno se změnou celé koncepce profilace, kdy musí být sekce rozšířena o další profilovací stojany. V tomto případě dochází k enormnímu prodražení kvůli velkému množství úprav a také k značné časové prodlevě při zhotovování celé profilovací linky. [16]

Určení počtu profilovacích průchodů je poměrně těžká otázka. Neexistuje nějaká standardní nebo normalizovaná metoda pro výpočet. V praxi volí množství profilovacích pořadí návrhář především dle svých předchozích zkušeností. [1]



Obrázek 18 Vliv počtu profilovacích pořadí: A) nedostatečný – zvlnění profilu, B) správný, C) zbytečně velký [1]

5.2.1 Faktory ovlivňující počet průchodů

Faktorů ovlivňujících množství průchodu je celá řada. Zde jsou uvedeny ty nejdůležitější, které by se při návrhu neměly opomenout.

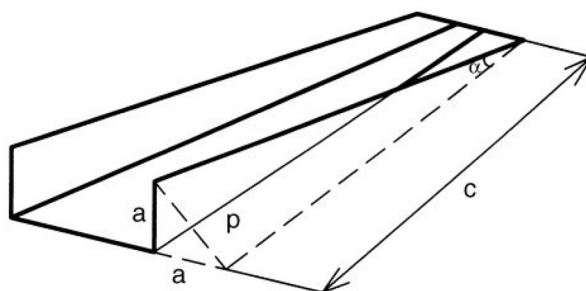
Hlavním faktorem na počet pořadí je tvar samotného profilu. Pokud se jedná o složitý tvar s mnoha ohyby, bude jeho výroba vyžadovat více pořadí než u profilu s jednoduchým tvarem. Vliv má i úhel jednotlivých ohybů a jejich těsnost a návaznost na sebe. [25]

Množství průchodů je závislé také na materiálu. U něj závisí na jeho mechanických vlastnostech a také na tloušťce. U pevnějšího materiálu s nižší tažností musí být profilování prováděno pozvolněji ve více průchodech. Vliv tloušťky materiálu na počet pořadí je diskutabilní a závisí především na konstrukčním provedení profilovací sekce. Často je pro tlustší materiál voleno automaticky více průchodů. Pokud je celá sekce dostatečně tuhá, vyžaduje pro tužší materiál paradoxně méně průchodů. U tenkých materiálů dochází naopak vlivem rychlého přibalování k vlnitosti hran v podélném směru, proto pro jejich správné naformování je potřeba větší množství průchodů. Posledním důležitým faktorem je povrchová úprava materiálu. Nejnáročnější je formování lakovaného pásu plechu, který vyžaduje větší množství průchodů, tak aby nedošlo k porušení vrstvy laku. [1, 25]

Dalším faktorem, který ovlivňuje množství průchodů, je kontinuálnost pásky, případně zda obsahuje nějaké otvory. Při formování pouze krátkých částí budou nároky na množství průchodu vyšší než při kontinuálním pásu. U plechu s otvory, které se vystřihují přímo do pásky, závisí především na umístění těchto otvorů a jejich velikosti. Pokud jsou otvory v části výrazného formování, může dojít k navýšení množství průchodů až o 80 % vůči návrhu profilace pro plech bez těchto otvorů. V opačném případě bude docházet k značným deformacím kolem otvorů, případně i k zastavení celé profilovací sekce vlivem vyhnutí plechu těsně za otvorem mimo spáru mezi tvarovými válci. Toto nastává, pokud je otvor umístěn do kraje plechu a profil nemá konstantní hranu. [25]

5.2.2 Výpočet počtu průchodů

S příchodem softwarového řešení navrhování vznikla potřeba mít možnost stanovit počet pořadí pomocí nějakého vztahu zohledňujícího alespoň část těchto faktorů. Přestože neexistuje normalizovaný výpočet počtu pořadí, vzniklo několik způsobů výpočtu, které mají pomoci k učení správného množství. [25]



Obrázek 19 Potřebné veličiny pro výpočet dle úhlu přihýbání [1]

Jednou z metod stanovení počtu pořadí je výpočet dle úhlu přihýbání hrany. Tato metoda je vhodná především pro jednoduché profily. Výpočet je určen níže uvedenými vztahy, které vychází z hodnot označených na obrázku 19. Tento vztah nezohledňuje mnoho faktorů, často se používá pouze pro hrubou orientaci. [1]

$$p = \sqrt{2a^2} = a\sqrt{2} = 1,414 a$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{p}{c} \rightarrow c = \frac{p}{\operatorname{tg} \alpha}$$

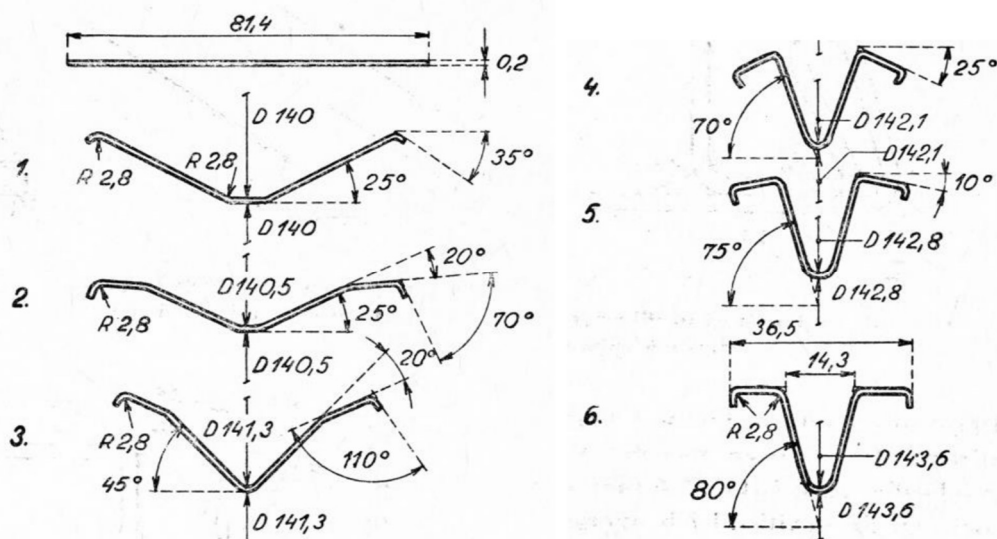
Z těchto vztahů je možné určit délku profilovací sekce, z níž při znalosti podélné rozteče (HD) pořadí je možné určit i počet pořadí dle následujícího vztahu: [1]

$$x = \frac{c}{HD} + 1$$

Další možností je určení množství průchodů podle mezního napětí na hraně. Mimo tyto vztahy existují empirické vzorce, které jsou využívány i softwary. Ne vždy se jedná o plně otestované vztahy, které jsou platné pro různé typy profilů. Tyto výpočty zohledňují i množství otvorů v profilu a jsou aplikovatelné i na poměrně složité tvary. [1]

5.3 Profilovací schéma

Po určení počtu průchodů potřebných k výrobě daného profilu může dojít k tvorbě samotného profilovacího schématu. V anglické literatuře je označen pojmem „flower diagram“, v praxi se někdy označuje jako profilovací „pavouk“. Vytvořením tohoto schématu se určí, jak samotná technologie profilování bude probíhat. Ve schématu se určují tvary profilu postupně pro každé pořadí. Při špatném návrhu tohoto schématu dochází k poškození profilu, tvarové nestabilitě, či neschopnosti dlouhodobě udržet stabilitu procesu. [26, 27]



Obrázek 20 Profilovací schéma pro otevřený profil [26]

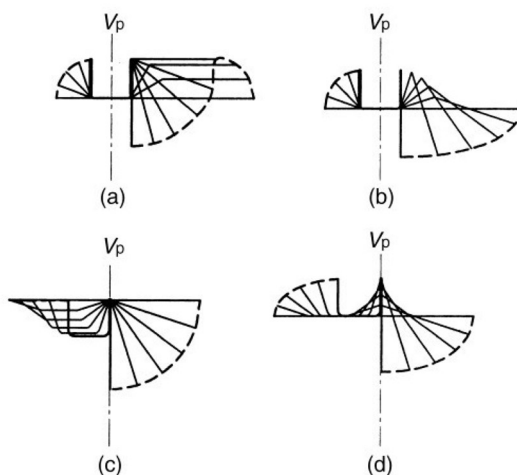
5.3.1 Orientace profilu

Na začátku navrhování profilovacího schématu je určit orientaci profilu vůči směru profilování. Pokud se jedná o symetrický profil, orientace je volena tak, aby byly ohyby v jednotlivých průchodech symetrické. Dále je výhodnější orientace profilu taková, aby jeho delší rozměry byly umístěny rovnoběžně s osami válců. Při této orientaci bude docházet k menšímu zadírání na stěnách profilu v hlavních formovacích průchodech. Obecně platí, že se vždy volí taková orientace, aby bylo možné profil naformovat s nejmenšími deformacemi v materiálu a díky tomu i v nejmenším počtu profilovacích pořadí. [1]

Na orientaci kalibrační sekce u uzavřených profilů má hlavní vliv pozice svaru vůči tvaru profilu. Pro některé aplikace profilu je vyžadována přesná poloha svaru. Pokud je to možné, orientace profilu se volí tak, aby byl svar nahoře a nemuselo docházet k zbytečnému stáčení profilu pomocí twist válců před kalibrační sekci.

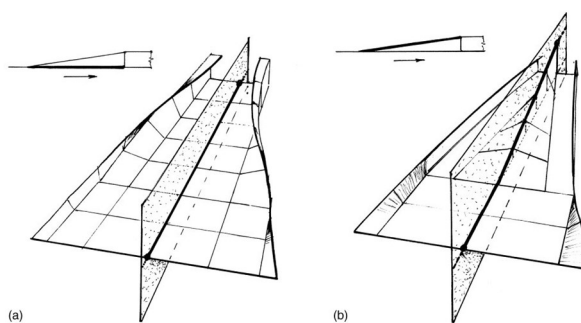
5.3.2 Vertikální rovina, základní průměry válců

Po volbě orientace profilu je dalším krokem určit polohu vertikální vodící roviny. Vybraný prvek profilu se bude pohybovat ve vertikálním směru. Příklady umístění do různých míst profilu jsou vidět na obrázku 21. Umístění v prvním případě (a) je nejběžnější u konvenčních profilovacích procesů. Při tomto umístění ale dochází k velkému a nesymetrickému namáhání hran profilu. Naopak na pohyb hran je nejpříznivější poslední možnost, hrany se formují symetricky a nedochází k tak velkému pohybu. Nevýhodou této možnosti je špatně definované rozdělení materiálu v prvních průchodech, kdy může dojít k posunu materiálu, a tím vzniku bočnic nesprávné délky. [1, 28]



Obrázek 21 Pozice vertikální roviny a její vliv na pohyb hran [1]

Dalším krokem je určení, zda se bude tento vybraný element posouvat ve vertikální rovině, či nikoliv. Pokud ne, daný element v průběhu profilovací sekce zůstává na stejném místě (obrázek 22a). Při této variantě je konstantní výška válcovací roviny a nedochází ke změně základního průměru tvarových válců. Dalšími možnostmi je, že vybraný element se pohybuje v průběhu profilování směrem vzhůru (obrázek 22b) případně dolů. Volba pohybu elementu ovlivňuje základní průměry válců. Ty je potřeba vždy volit v kombinaci s převodem z rozvodové klece tak, aby docházelo k vytahování profilu. Při zachování stejného převodového poměru se základní průměr válce musí postupně zvětšovat, v krajním případě zůstávat stejný. Pokud by nebyla splněna tato podmínka, materiál v předchozím pořadí by se pohyboval rychleji než v následujícím. To by vedlo ke vzniku přeložky na plechu v místě mezi profilovacími stojany. [1, 27, 28]



Obrázek 22 Pohyb vybraného elementu v horizontální rovině při profilování – a) bez horizontálního pohybu, b) element v průběhu profilování stoupá [1]

5.3.3 Tvar profilu v průchodech

Po určení základních vstupních parametrů je vykresleno samotné profilovací schéma. Při navrhování je potřeba dbát na rovnoměrné a postupné přihýbání plechu

bez výrazných skoků. Při velkých změnách mezi jednotlivými průchody dochází k velkému napětí na hranách plechu nebo v místech ohybu. Prudké změny mohou nastat špatným rozvržením ohybů v rámci profilovacího schématu.

V tomto případě je potřeba přepracovat profilovací schéma a rozdělit ohyb kritického místa mezi více průchodů. Nejhorší možnost nastává při zvolení nedostatečného množství profilovacích stojanů. V tomto případě jsou velké změny ohybu mezi všemi průchody. K napravení tohoto stavu nezbyvá než změnit koncepci celé profilovací linky a navýšit počet profilovacích stojanů. [1, 29]

Další zásadní volbou při tvorbě profilovacího schématu je, zda budou jednotlivé ohyby vznikat současně a v průběhu celé profilovací sekce společně, nebo zda budou jednotlivé ohyby vznikat postupně až po dokončení toho předchozího. První varianta je náročnější na dopočet jednotlivých segmentů mezi ohyby. Nevýhodná může být i při dodatečných úpravách tvarových válců či jejich seřizování. Vždy se lépe nastavuje profilovací sekce, kde jednotlivé průchody neovlivňují všechny ohyby najednou. Pokud například dojde ke vzniku různého odpružení v materiálu v jednotlivých částech profilu, není možné toto chování dorovnat pouhou změnou nastavení spáry mezi jednotlivými válci. Druhá varianta je nevýhodná z důvodů vyššího počtu průchodů či případně většího napětí na hranách a v místech ohybu, kdy k ohybu jednotlivých částí dochází na kratší vzdálenosti a menším počtu průchodů. Výhodou druhé varianty mohou být jednodušší tvary válců a tím i úspora materiálu a nákladů při výrobě. [1,29]

5.4 Upínací schéma

Při tomto kroku se využívá tvar plechu z profilovacího schématu. Cílem je navrhnout tvar válců tak, aby válcovací pořadí dokázalo vyprofilovat pásku do požadovaného tvaru. Tvar válců nelze vytvořit pouhým obtisknutím kontury plechu z profilovacího schématu pro dané pořadí. V tomto případě by došlo k zadírání pásky a nebylo by možné profilovací pořadí jednoduše seřizovat.

Při navrhování správného tvaru válců dochází k odlehčování neboli uvolňování tvarů, kde kontakt s plechem není důležitý pro vytvoření ohybu. Ve správném případě dochází při stlačování válců k sobě k přednostnímu tlaku v místech ohybu. Tento fakt umožňuje následné seřizování válců pomocí stavěcích šroubů. Při nedostatečně ostrém tvaru plechu se zmenší mezera mezi válci a dojde k zvýraznění ohybu od daného válce. Naopak v případě příliš výrazného tvarování je možné válec pomocí šroubů nadzvednout, čímž se omezí jeho vliv na profilování plechu. Pokud by plech dosedal v celé kontuře profilu, při přitlačení válců by došlo pouze k zvýšení tlaku na celý povrch plechu a nedošlo by k výraznějším změnám tvaru profilu. To by

znamenal, že i při sebemenší změně mechanických vlastností vstupního materiálu by bylo zapotřebí neustále upravovat tvar válců. [30]

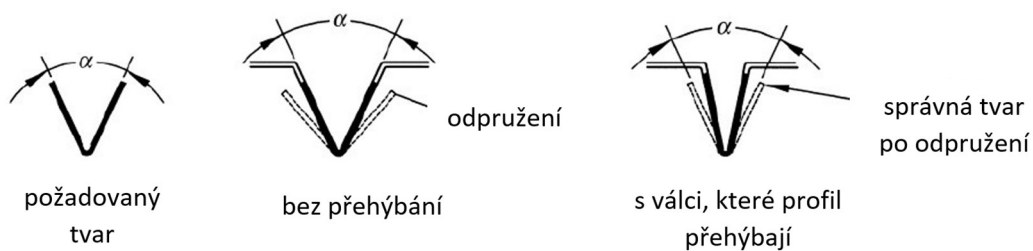
Dále je nutné vyvarovat se kontaktu válce s plechem ve dvou různých průměrech. To je další důvod uvolňování tvarů válců. Uvolňují se tak, aby ke kontaktu s materiálem došlo pouze v místech, kde válce mají stejnou obvodovou rychlost. V místech, kde toto není splněno, je potřeba, aby mezi válci byla větší mezera, než je tloušťka plechu. Pokud toto není dodrženo, dochází k zadírání plechu a poškození jeho povrchu. Pokud je horní i dolní válec poháněn, je nutné zachovat poměr mezi styčnými průměry ve shodě s poměrem převodovým poměrem ozubených kol v rozvodové kleci. [30]

Kromě výše uvedeného je třeba stanovit mezera mezi válci. Tato mezera je vždy mezi nefunkčními límci kol. Velikost této mezery se určuje na základě tloušťky plechu. Pokud by byla nedostatečná, tak při přitažení válců by došlo k nežádoucímu kontaktu těchto límců. Při příliš velké mezeře naopak může dojít k vtažení plechu mezi válce a jeho zdeformování. [1]

Důležitým kritériem při navrhování jednotlivých válců zůstává i jednoduchost výroby, s čímž je úzce spojena i cena.

5.5 Kalibrace profilu, přehýbání

Kvůli elastickému chování materiálu dochází po ukončení vlivu sil způsobujících ohyb k odpružení materiálu. K zabránění odpružení materiálu je potřeba profil kalibrovat. Při kalibraci profilů dochází k přehýbání ohybů tak, aby se profil po odpružení dostal do správného tvaru (obrázek 23).



Obrázek 23 Odpružení a přehýbání profilu [1]

Vliv na velikost odpružení u profilování mají tyto faktory (odpružení roste):

- Pokud je vyšší mez kluzu R_e a mez pevnosti R_m
- Je nižší modul pružnosti E
- Je větší poměr mezi rádiusem ohybu r a tloušťkou materiálu t ($r:t$)
- S rostoucí mezerou mezi válci

- Příliš malý úhel ohybu (menší než určitý limit) [1, 31, 32]

Další rozsáhlá problematika souvisí s odpružením při dělení profilu. Toto odpružení lze s různými výsledky eliminovat různými metodami. Pro otevřené profily se v rámci kalibrace profilu využívá větší přehnutí profilu v kombinaci s následným vrácením do původního tvaru profilu. [31]

U kalibrování uzavřených profilů, které se svažují již ve finálním tvaru – trubky a ovály, dochází při kalibraci k zpřesňování rozměrů. Využívá se faktu, že svařený profil je již tužší, proto dochází k menšímu odpružení. Tím se lépe dosahuje požadovaných tvarů. Takto se vyrábí přesné, precizně formované svařované trubky. V profilaci se formuje trubka o několik desetin větší na průměr, následně v kalibrační sekci je trubka redukována při zlepšení geometrie. Při využití průvlastu při kalibraci je možné dosahovat přesnosti a kruhovitosti v několika málo setinách milimetru. [1]

Profily s čtvercovým, obdélníkovým či jiným speciálním tvarem bývají v kalibrační sekci přeformovány z původního kruhovitěho tvaru. Při formování je dbáno na to, aby nedocházelo k zadírání boků profilu. Zadírání se předchází správným tvarem válců na mezistolicích, které deformují profil z boku.

6 Software pro profilování

V této kapitole bude popsána metoda, na které jsou založeny programy pro simulování procesu tváření, příklady jednotlivých softwarů a jejich možností.

Mimo klasické simulační programy existují i programy, které samy dokáží navrhovat části profilace či asistovat při návrhu technologovi. Tyto programy často naráží na nedostatek obecně platných vztahů, které by bylo možné při automatizaci procesu navrhování využít. Většina vztahů, které stanovují určité hodnoty, jsou empirické, platí pro určité případy v omezeném rozsahu. Značnou část procesu navrhování tvarových válců provádí technolog na základě zkušeností, které získal v předchozích podobných případech. Při nedostatku zkušeností se proces obtížně navrhuje, tvary válců nejsou správně stanoveny, či například není zohledněno odpružení materiálu. Přes tyto komplikace je snaha vyvinout program, který by dokázal poskytovat stabilní a dobré výsledky a omezil by tak závislost procesu návrhu na lidském faktoru.

V této práci bude věnován prostor především simulačním programům. Cílem simulací je dopředu určit chování materiálu, aniž by musely být vytvořeny prototypové tvarové válce, a tím šetřit náklady a čas vývoje. Mezi výsledky simulací patří tvar finálního profilu, průběh napětí či velikost odpružení při dělení tohoto profilu. Tyto programy samy nestanovují tvary válců, pouze určují chování materiálu v navržené profilaci. Tvůrci těchto simulačních programů se ale opět s problematikou chování materiálu mezi tvarovými válci, přístupu k jednotlivým vlastnostem jako je například tření na povrchu válců. Při simulaci se jen těžko zohledňuje množství variant nastavení, které je schopna obsluha vytvořit se stejnými tvary válců, proto ani správná simulace nemusí vždy vést k dobrému výsledku v praxi. [33, 34]

6.1 Princip funkce

Software pro simulace tváření je založen na metodě konečných prvků (MKP). Tato metoda využívá diskretizaci – rozdělení ploch a objemů tělesa na konečný počet elementů. Rovinné plochy jsou touto metodou rozděleny na trojúhelníkové, případně čtyřúhelníkové prvky, prostorové části na čtyřstěny nebo šestistěny. Z těchto útvarů je vytvořena síť prvků, pro kterou je možné provést výpočet pomocí výpočetní techniky. V krajních bodech této sítě se nacházejí uzlové body. [33, 35]

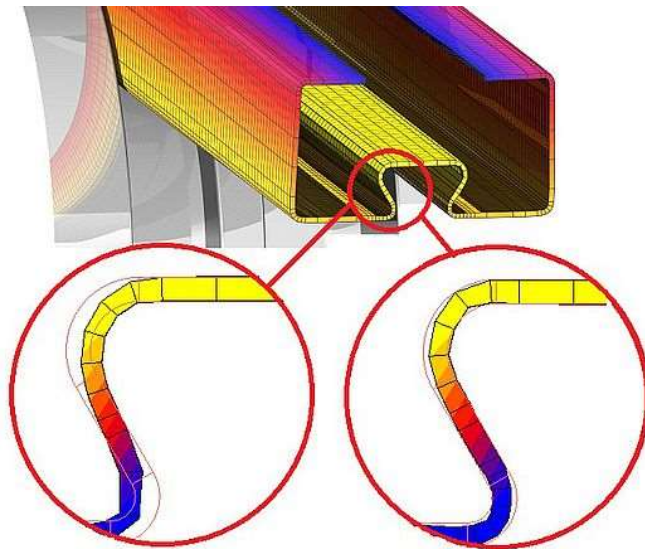
Předpokladem je spojitost sestavené sítě. Dalším předpokladem pro možnost využití metody konečných prvků je možnost sestavení lineárních algebraických rovnic, které popisují chování daných elementů. Pokud jsou tyto rovnice sestaveny pro posun jednotlivých elementů, jedná se o deformační variantu metody konečných

prvků, která je nejpoužívanější metodou. Další variantou je silová varianta MKP, která řeší rovnice pro napětí. [35, 36]

Pro uzlové body se využívá aproximační funkce, nejčastěji polynomické funkce. Počet stupňů polynomu závisí na tvaru sítě (trojúhelníková nebo čtyřúhelníková). Čím hustější síť elementů, tím přesnější a zároveň i náročnější výpočet je. Pro zjištění hodnot v intervalech mezi uzlovými body sítě se využívá interpolace. [33, 35]

Při tváření se uplatňují ty principy deformace, které jsou energeticky nejvýhodnější. Pokud z okrajových podmínek může vzniknout více řešení, nastane ta varianta, která nejlépe vyhoví principu minimální potenciální energie. Z interpolací posunutí jednotlivých uzlů se určí celková potenciální energie všech uzlových stupňů volnosti pole posunutí. [35]

Výsledkem je souhrnná matice tuhosti složená z matic tuhosti pro jednotlivé uzlové body. Z této matice je sestaven systém lineárních rovnic, který slouží pro výpočet uzlových parametrů deformace. Následně je možné vypočítat tenzory napětí v jednotlivých místech. Tím je určeno jak napětí, tak deformace pro jednotlivá místa v materiálu. Při znalostech chování materiálu při těchto hodnotách napětí a deformace je možné pro jednotlivá místa určit další údaje, jako například odpružení, ztenčení, vznik trhlin a podobně. [35, 36]



Obrázek 24 Rozdělený profil na čtvercovou síť elementů při výpočtu MKP (vpravo adaptovaná síť v průběhu výpočtu) [37]

6.2 Příklady softwaru pro profilování

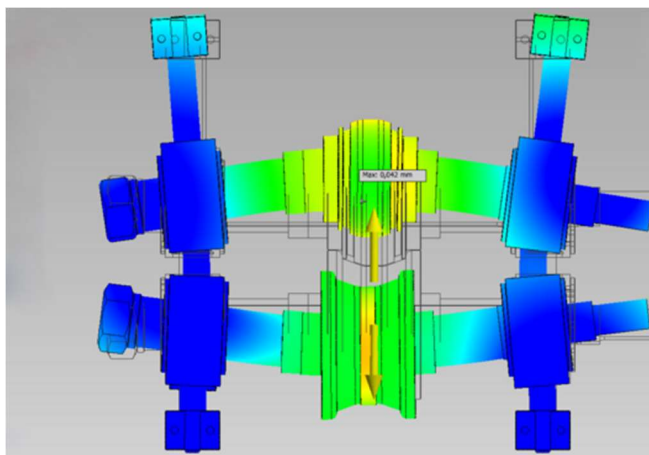
V této části budou uvedeny hlavní zástupci programů, které slouží k navrhování a simulování procesu profilování.

6.2.1 Copra RF

Copra RF je jedním z nejrozšířenějších programů určených pro podporu navrhování procesu profilování. Jedná se o hybridní program, který mimo samotného simulačního procesu je schopen podporovat samotný proces návrhu tvarových válců. Tato část programu slouží jako plugin, který je možné nainstalovat do softwarů zpracovávající 3D dokumentaci jako jsou Autodesk Inventor nebo SolidWorks. [38]

Copra umožňuje proces navrhování jak pro otevřené, tak pro uzavřené profily. Pro navrhování profilací na uzavřené profily existuje speciální program s názvem Copra RF Tubes. V rámci něj je možné navrhovat profily s kruhovým i obdélníkovým průřezem. [38]

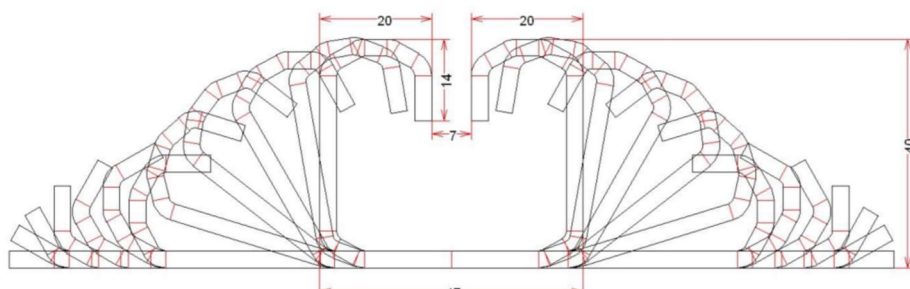
Samotné simulace probíhají v části programu Copra FEA RF. Tento program je založen na pokročilé metodě konečných prvků, kde je hustota jednotlivých elementů automaticky upravována v rámci simulace, takže dochází k přesnějším výsledkům. Mimo simulace chování plechu v profilaci je možné tento program využít i pro simulování chování jednotlivých komponentů profilace, mezi které patří tuhost profilovacího stojanu a průhyb hřídelí. Výsledek této simulace je uveden na obrázku 25. [38]



Obrázek 25 Simulace tuhosti profilovacího pořadí v programu Copra FEA RF [38]

6.2.2 Ubeco & LS-DYNA

Dalším zástupcem programů podporujících profilování je Ubeco. Tento program slouží k navrhování profilací. Existuje několik verzí tohoto programu, plná verze dokáže vytvářet návrh profilovacího schématu (obrázek 26) i jednotlivé tvary válců. Tyto tvary válců je možné vyexportovat do 3D CAD softwarů SolidWorks od firmy Dassault Systemes, SolidEdge od firmy Siemens. [39]



Obrázek 26 Profilovací schéma vytvořené v programu Ubeco [39]

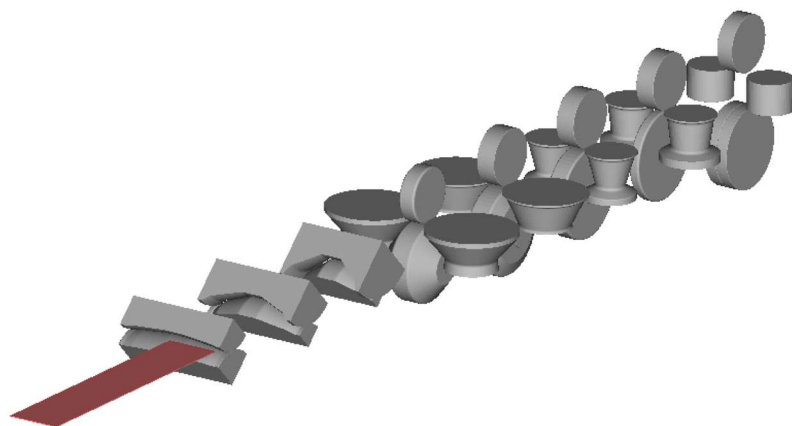
Pro samotné simulace využívá nejvyšší verze programu Ubeco propojení s programem LS-DYNA od firmy Livemore Software Corp. Do tohoto programu umožňuje vyexportování geometrie jednotlivých válců. LS-DYNA následně provádí simulaci na základě metody konečných prvků. V rámci simulace je možné získat napětí v profilu, ale i jeho výsledný tvar. Výhodou propojení těchto dvou programů je automatická příprava a export geometrie tvarových válců z návrhářského programu Ubeco do simulačního programu LS-DYNA. Následně již proběhne automatické nastavení sítě jak na plechu, tak na tvarových válcích. Při automatickém nastavení dojde k zohlednění velikosti jednotlivých elementů v závislosti na poloze dané části v profilu. Pokud se jedná o část ohybu, vzniká v tomto místě hustější síť než v místě, kde je profil rovný. [39]

6.2.3 Simufact Forming

Program Simufact Forming je velice univerzální nástroj umožňující zpracování simulací pro široké spektrum technologických aplikací. V oblasti tváření umožňuje simulovat plošné a objemové tváření za tepla i za studena. Program dokáže pracovat s procesy hlubokého tažení, ohýbání, profilování či válcování. [40]

Na rozdíl od předchozích programů (či propojení dvou programů), umožňuje Simufact Forming pouze simulaci procesu profilování. V programu není možné vytvořit samotný návrh profilace. Tvary pro jednotlivé pořadí musí být do programu importovány dle již existujícího upínacího schématu. [40]

Simufact Forming umožňuje automatické nastavení hustoty sítě dle zadaného profilu. Při tomto nastavení dojde k automatickému zvýšení počtu elementů v místech ohybu. Výstupem z programu je mimo tvaru profilu i průběh napětí a deformace v jednotlivých částech profilu. Na základě těchto údajů je možné posoudit množství pořadí dané profilace, rovnoměrnost rozložení ohybů v průběhu profilování, či následné odpružení materiálu. Vzorově nastavená simulace je na obrázku č. 27. [40]



Obrázek 27 Simulace profilace v programu Simufact Forming [40]

7 Stanovení experimentu

Vlivem komplikovanosti procesu profilování, při kterém dochází k tváření na několika nástrojích za sebou, se ne vždy setká navržený postup a metodika vypracování návrhu profilace s úspěšnou výrobou vzorků. Při nesprávném návrhu profilace vznikají výrobcí nemalé škody a dochází ke značnému časovému posunu dokončení celé profilovací linky. Snaha o spolehnutí se pouze na simulační software, či software, který se aktivně podílí na návrhu profilace, přináší velice rozporuplné výsledky. V praxi nakupují firmy drahý software s vidinou nahrazení práce technologického konstruktéra těchto nástrojů, případně nahrazení jeho nedostatečných zkušeností s problematikou profilování. Po negativních zkušenostech jsou simulační softwary označovány za nevhodné či nepřínosné.

Cílem experimentální části bylo navržení profilace, popsání jednotlivých kroků, které k tomu byly nezbytné, otestování profilace s případným navržením optimalizace na další úpravy. Tímto měl být ověřen postup popsáný v teoretické části. Následně byl zvolen program pro simulování, kde měly být porovnány výsledky dosažené pomocí simulace s reálnými daty z výroby. Přínosem praktické části by měl být spolehlivý postup pro návrh profilování ověřený v různých podmínkách včetně návrhu začlenění simulace nejen pro podmínky firmy Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje, ve které byla zpracována.

Pro praktickou část byly vybrány dva zástupné příklady profilování. Jako první byl vybrán otevřený „U“ profil, pro který byla navržena kompletní profilace. Tento profil byl vyráběn z materiálu DC04, tedy oceli určené pro hlubokotažné výlisky. Po vytvoření výrobní dokumentace byly tvarové válce zadány do výroby a následně provedena zkouška. Ve druhé části byl navržen a optimalizován proces profilování tenkostěnné trubky $\varnothing 14,6$ z moderního niklové slitiny Inconel o tloušťce 0,1 mm.

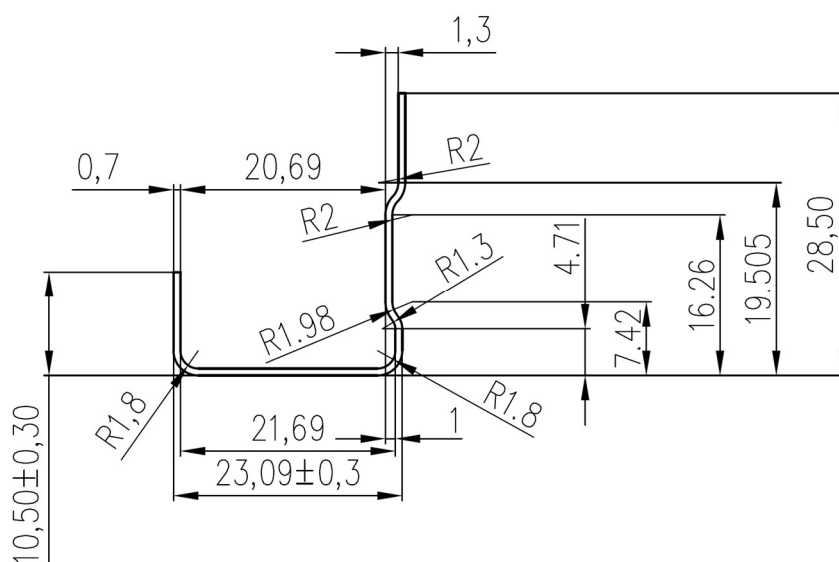
Experimentální část probíhala souběžně jak na Fakultě strojní, kde probíhaly simulace ověřující proces profilování, tak ve firmě Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje, kde byl ověřen proces profilování, který jsem navrhl v této práci.

8 Návrh profilace „U“ profilu

Cílem první fáze bylo ověření vytvořeného postupu při navrhování otevřeného profilu, pro který by následně bylo možné provést simulaci. Byl vybrán nesymetrický otevřený profil (obrázek 28), pro který vznikl požadavek na výrobu profilace v partnerské firmě. Záměrně byl vybrán relativně jednoduchý profil z materiálu DC04 (vlastnosti uvedeny v tabulce č. 2). Na tomto profilu bude snadné ověřit správnost postupu a posloupnosti návrhu. Díky relativní jednoduchosti jsou tvarové nástroje na tomto profilu snadno nastavitelné, čímž umožní poměrně snadné nastavení simulace.

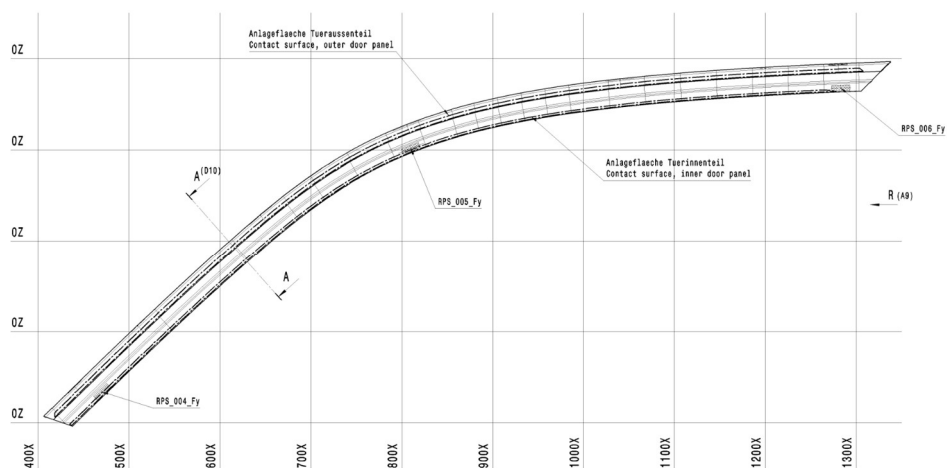
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu DC04 [45]

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]
DC04	< 210	270 – 350	38



Obrázek 28 Nesymetrický "U" profil

Tento profil se využívá jako polotovár pro výrobu dvou dílů v automobilovém průmyslu. Oba finální díly (obrázek 29) jsou umístěny v rámu dveří u užitkového automobilu Volkswagen Crafter.



Obrázek 29 Tvar jednoho z finálních dílů

8.1 Vstupní data pro navrhování procesu profilování

Běžně při návrhu profilovací linky není mnoho vstupních dat dopředu zadáno a je na technologovi, aby je v rámci procesu navrhování zvolil. V tomto konkrétním případě se jednalo o výměnné nástroje na existující profilovací linku, proto musely být brány v potaz rozměry této linky. V procesu navrhování profilace bylo ověřeno, zda jsou tyto parametry dostatečné a zda je možné využít profilovací linku pro výrobu tohoto konkrétního typu profilu.

Základním vstupním údajem je průřez zadaného profilu s rozměry a tolerancemi. Průřez profilu je znázorněn na obrázku 28. Tolerance nebyly uvedeny na výkrese, ale byly specifikovány zákazníkem v rámci poptávky následující tabulkou.

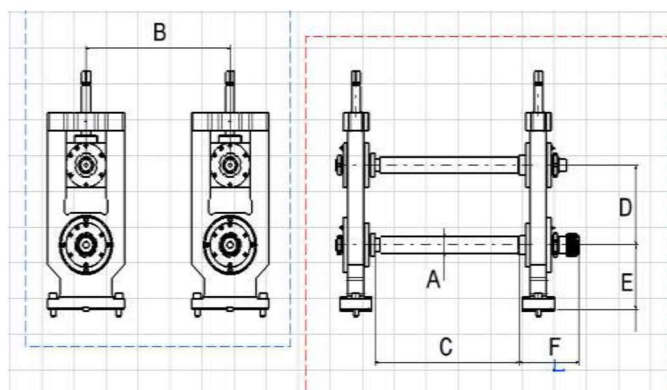
Tabulka 3 Tolerance „U“ profilu

Rozměr	Tolerance
Tloušťka	$\pm 10 \%$ nominální tloušťky
Výška	$\pm 0,3$ mm
Rádusy	$\pm 0,1$ mm
Ostatní délkové rozměry	$\pm 0,3$ mm
Tolerance přímosti	0,3 mm/m

Následující vstupní údaje souvisí s charakteristikami linky, na kterou měla být profilace vyráběna. Jedná se o pravolevé provedení profilovací linky. Z parametrů linky je hned po navrhování procesu nejdůležitější počet profilovacích pořadí – tato linka obsahuje 14 pořadí bez mezistolic. Další údaje důležité pro navrhování především z důvodů kompatibility profilovacího nářadí s linkou jsou uvedeny v následující tabulce se zakótováním v obrázku 30.

Tabulka 4 Základní rozměry profilace

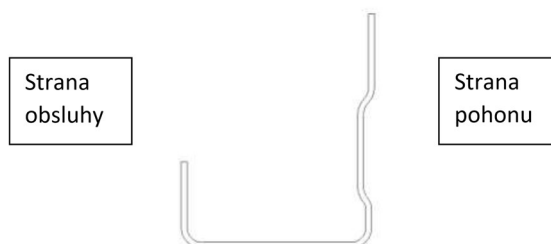
Parametr	Rozměr [mm]
Průměr hřídelí	45
Velikost pera	12
Podélná rozteč profilačních stojanů (B)	290
Výška osy spodní hřídele (E)	100
Délka hřídele (C)	320



Obrázek 30 Schéma s vyznačenými hodnotami z tabulky s parametry profilace

Maximální teoretická rychlost výroby tohoto typu profilu dle smlouvy je 40 m/min. Dle skutečných parametrů linky byla rychlost 25 m/min. Tvarové válce, včetně rovnacího průvlatku, musí být navrženy tak, aby ani při maximální rychlosti nedocházelo k otlakům, stopám či rýhám na profilu.

Dalším parametrem je i orientace profilu vůči toku materiálu. Původní požadavek zákazníka byla orientace profilu dnem vzhůru, delší bočnice profilu na straně pohonu linky. Tato orientace je výhodná v případě, že by se do profilu měly vystřihávat otvory. V tomto případě by nedocházelo k ulpívání odpadu na dně profilu. Tento požadavek se v průběhu navrhování profilace změnil. Finální zadání stanovilo profilování dnem dolů, vyšší stranou k pohonu (obrázek 31).



Obrázek 31 Orientace profilu při válcování

Profil bude rovnán pomocí průvlaku z bronzu. Dělení profilu bude prováděno pomocí bezodpadové děličky.

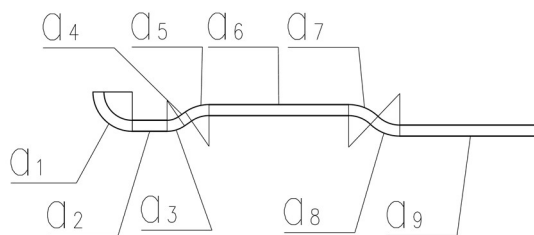
8.2 Návrh profilace

V rámci experimentu byl vypracován návrh profilace dle postupu, který byl popsán a navržen v teoretické části této práce. Postupně byly ověřeny některé vstupní parametry, vypracováno profilovací schéma, dále bylo vytvořeno upínací schéma pro každé pořadí a navrženy detaily tvarů jednotlivých kol.

8.2.1 Ověření počtu pořadí

Profilovací linka obsahuje 14 profilovacích pořadí. V této části bylo provedeno ověření, zda je toto množství dostatečné pro výrobu tohoto profilu. Pokud by se ukázalo množství 14 průchodů jako nedostatečné není možná na této lince kvalitní a stabilní výroba takového profilu. Nedostatečný počet pořadí a délka, ve které se přihýbá profil, má za následek zvlnění plechu a rozměrovou nestabilitu.

Pro stanovení počtu byla použita metoda výpočtu počtu pořadí podle úhlu přihýbání. Výpočet počtu pořadí podle úhlu přihýbání je vysvětleno blíže v kapitole návrhu procesu profilování. Tím, že se nejedná o symetrický profil, bude výpočet proveden pro vyšší bok profilu. Nejprve byla stanovena délka neutrálního vlákna pro daný bok pomocí součtu délky vlákna pro jednotlivé části, tyto délky byly určeny pomocí softwaru Autodesk AutoCAD (obrázek 32).



Obrázek 32 Rozdělený bok profilu na jednotlivé segmenty

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9$$

$$a = 3,194 + 2,21 + 0,969 + 0,549 + 1,385 + 8,884 + 1,791 + 1,791 + 9 \text{ mm}$$

$$a = 29,773 \text{ mm}$$

$$p = 1,414 a = 1,414 * 29,773 = 42,099 \text{ mm}$$

Pro tuto tloušťku ještě s ohledem na prolis na bočnici profilu byl zvolen úhel přihýbání $\alpha = 1^\circ$

$$c = \frac{p}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{42,099}{\operatorname{tg} 1^\circ} = 2411,85 \text{ mm}$$

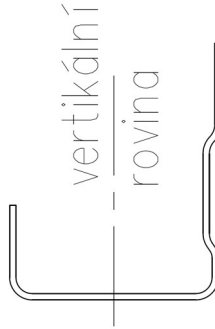
$$x = \frac{x}{HD} + 1 = \frac{2411,85}{290} + 1 = 9,3 \rightarrow 10 \text{ pořadí}$$

Minimální počet pořadí pro profilování tohoto typu profilu tohoto výpočtu je 10. Tento výpočet zohledňuje pouze stojany, na kterých dochází k profilování. Tím, že se jedná přesný profil, je nutná jeho kalibrace a eliminace odpružení, k tomu bude zapotřební další 2 až 3 pořadí. Při zohlednění kalibrace profilu bylo ověřeno, že výroba tohoto profilu je možná na 14 pořadích s podélnou roztečí 290 mm.

Dále bylo také zohledněno množství počtu pořadí na podobné, již vytvořené profilace. Zda je dostatečný počet průchodů, je možné stanovit i zpětně při navrhování profilovacího schématu. V prvních pořadích na jednoduchých ohybech by neměl úhel ohybu na jednom pořadí přesáhnout 40° . V dalších pořadích, kde se již pracuje s delšími bočnicemi, případně se jedná o ohyb bočnice, která je už nějak formována, by neměla být změna úhlu větší než 15° . Tyto předpoklady byly v rámci návrhu splněny.

8.2.2 Vertikální rovina, základní průměry válců

V dalším kroku byla určena vertikální rovina profilu. Tato rovina byla umístěna do středu rovného dna profilu (obrázek 33). Toto umístění je důležité pro stanovení pozice jednotlivých ohybů na profilu. Dalším parametrem profilace, který byl navržen, je pohyb tohoto vybraného elementu v průběhu profilování. I vzhledem k parametrům profilovací linky byl zvolen víceméně vodorovný pohyb elementu v rámci jednotlivých pořadí. Rozhodující základní průměr se nachází v místě styku s vybraným elementem nacházejícím ve vertikální rovině. Pro první válec byl zvolen tento průměr 123,5 mm. Do 6. pořadí bylo zvoleno zvyšování základních průměrů o 1,5 mm na každé pořadí, na každém dalším pořadí se základní průměr zvyšuje o 0,5 mm. Toto navyšování základních průměrů válců bylo zvoleno s ohledem na dostatečný tah celé profilace.



Obrázek 33 Volba vertikální roviny profilace

8.2.3 Výpočet rozvinu

Výpočet rozvinu byl stanoven na základě délky neutrální osy. Pro tento tenký materiál byla v místech ohybu stanovena poloha neutrální osy do jedné třetiny od vnitřní strany ohybu. Výpočet rozvinu byl proveden obdobně jako výpočet délky ohýbané bočnice v kapitole návrhu procesu profilování. Do výpočtu ale vstupovalo všech 12 elementů. Délky neutrálních os jednotlivých prvků byly stanoveny pomocí programu Autodesk AutoCAD.

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9 + a_{10} + a_{11} + a_{12}$$

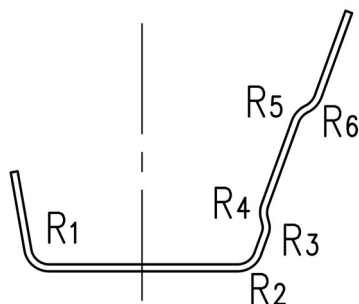
$$a = 3,194 + 2,21 + 0,969 + 0,549 + 1,385 + 8,884 + 1,791 + 1,791 + 9 + 18,15 + 3,194 + 8 \text{ mm}$$

$$a = 59,112 \text{ mm}$$

Z tohoto výpočtu byl stanoven rozměr svitku pro vzorkování $59,2^{-0,2} \times 0,7$ mm.

8.2.4 Profilovací schéma

Na základě vypočítaných údajů bylo vypracováno profilovací schéma. Na začátku tvorby bylo stanoveno, že prvních 11 pořadí se použije pro klasické formování profilu. Poslední 3 pořadí budou určené pro kalibraci rozměrů a eliminaci odpružení při stříhu profilu.



Obrázek 34 Označení rádiusů při v profilovacím schématu

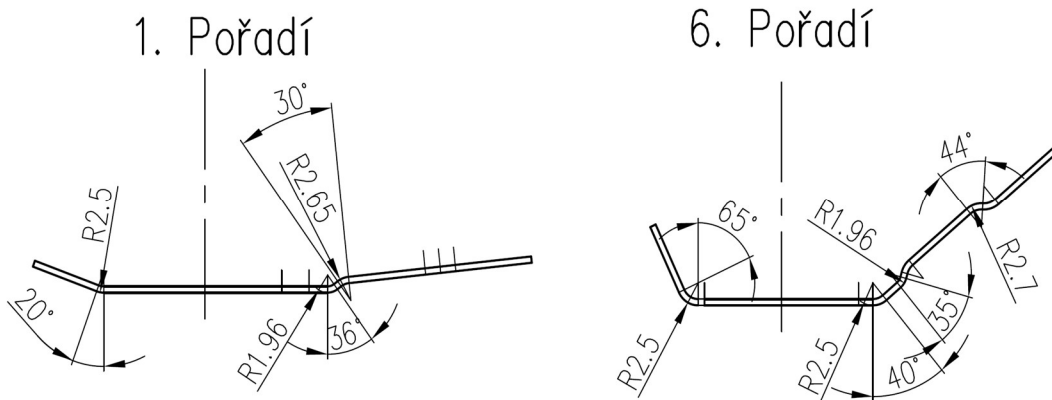
Při navrhování profilovacího schématu byl zvolen postup s konstantními hodnotami poloměrů. Na jednotlivých pořadích se liší úhly, na kterých je vytvořen ohyb. Se změnou úhlu souvisí i zkracování zbytku, který se pro daný ohyb počítá. Na obrázku 34 jsou označeny jednotlivé rádiusy. Podle těchto čísel rádiusů je sestavena následující tabulka úhlů ohybů poloměrů.

Tabulka 5 Velikost úhlů ohybových částí pro jednotlivé pořadí "U" profilu

Číslo pořadí	Úhel kruhové výseče pro daný poloměr [°]					
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
1	20	0	36	30	0	0
2	30	0	35	35	30	30
3	40	0	34,5	34,5	44,5	44,5
4	50	20	34,5	34,5	43,65	43,65
5	60	30	34,5	34,5	43,65	43,65
6	65	40	34,5	34,5	43,65	43,65
7	70	50	34,5	34,5	43,65	43,65
8	75	60	34,5	34,5	43,65	43,65
9	80	70	34,5	34,5	43,65	43,65
10	85	80	34,5	34,5	43,65	43,65
11	90	88	34,5	34,5	43,65	43,65
12	93	93	34,5	34,5	43,65	43,65
13	90	90	34,5	34,5	43,65	43,65
14	90	90	34,5	34,5	43,65	43,65

Tato tabulka nejlépe popisuje celé profilovací schéma a postup při jeho navrhování. Pro úplnost zde uvádím zakótované profilovací schéma od dvou pořadí – 1. a 6. pořadí (obrázek 35). V první fázi byly nejprve vytvářeny ohyby na bočnici na straně pohonu. Na 2. a 3. pořadí došlo k nepatrnému přehnutí těchto rádiusů, aby došlo k ustálení rozměrů těchto ohybů a nedošlo při stříhu k narovnání bočnice. Od 4. pořadí jsou tyto ohyby již plně naformovány a pracuje se pouze s ohyby celých bočnic. Tyto bočnice jsou postupně přihýbány až do úhlu 93° (na 12. pořadí). Na 13. pořadí je

naopak tento úhel narovnan zpět a tím částečně vyprofilováno i dno, které je na posledním pořadí vráceno zpět do roviny. Opět toto drobné přetažení přes úhel je vytvořeno z důvodů rozměrové stálosti i při stříhu.

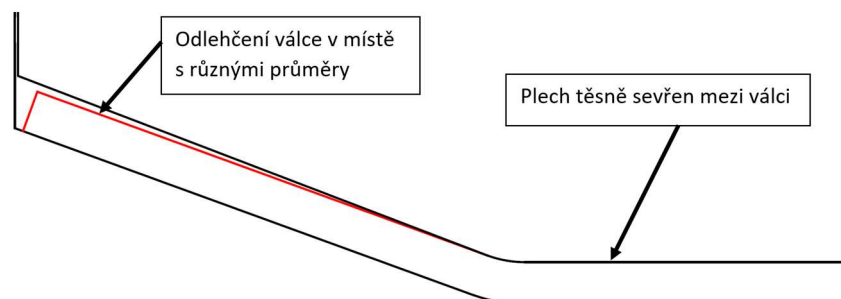


Obrázek 35 Profilovací schéma U-profilu pro 1. a 6. pořadí

Profilovací schéma a podobně i upínací schéma a zbytek výrobní dokumentace, bylo vytvořeno ve 2D konstrukčním softwaru Autodesk AutoCAD.

8.2.5 Upínací schéma

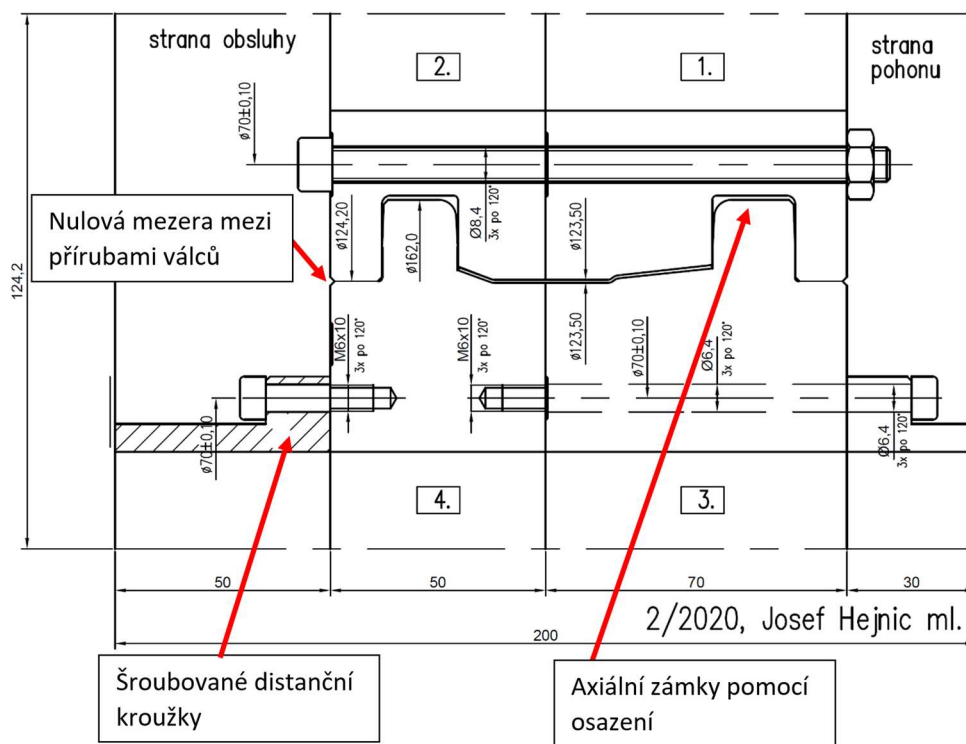
V následující fázi bylo vytvořeno upínací schéma pro daný profil. Upínací schéma se tvoří zvlášť, vždy pro každý průchod. Jedná se o sestavu, ve které je označeno umístění válců. V upínacím schématu jsou zaznačeny názvy jednotlivých válců. Dále obsahuje základní rozměry válců – šířku a základní průměr, délky jednotlivých distancí. Kromě výše zmíněného je možné z upínacího schématu určit teoretickou vzdálenost mezi osami horní a dolní hřídele, běžně se ale pro měření vzdálenosti válců používá měření spáry mezi válci pomocí spárových měrek.



Obrázek 36 Provedené odlehčení válců v místech s různými průměry v prvním pořadí

Při vypracování upínacího schématu byl využit tvar plechu z profilovacího schématu. Příkladem může být profilovací schéma z prvního průchodu (obrázek 36). I díky přísným požadavkům na kvalitu povrchu finálního produktu (bez otlaků a škrábanců). Při tvorbě kontury válců bylo nezbytné se proto vyvarovat styku dosednutí válců v celé kontuře, kde by již neplatilo, že válce mají stejnou obvodovou rychlost.

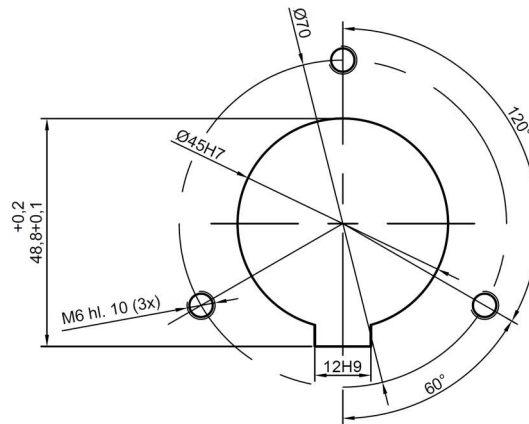
Tvary válců byly vypracovány tak, aby splnily požadavky od zákazníka. Z tohoto důvodu obsahují zámky pomocí do sebe dosedajících osazení (obrázek 37). Tyto zámky slouží jako axiální zajištění horních válců vůči spodním. Spodní válce jsou zajištěny pomocí distančních kroužků, které určují polohu vůči vertikální rovině profilu na každém stojanu. Toto provedení je nákladnější vůči výrobě distančních kroužků jak na dolní, tak horní hřídel. Zvýšená cena je dána potřebou větších polotovarů, kdy s rostoucím průměrem se výrazně zvyšuje i hmotnost. Dále je zvýšená cena způsobena delším obráběním těchto profilů na CNC soustruhu, kde je třeba naopak více materiálu odebrat.



Obrázek 37 Upínací schéma prvního pořadí s vyznačenými úpravami vůči běžnému schématu

Dalším požadavkem bylo, aby na spodní hřídeli byly distanční kroužky s přírubami, za které budou připevněny k tvarovým válcům. Pokud je na hřídeli osazeno více válců, musí být spolu sešroubovány. Toto propojení bylo navrženo pomocí třech šroubů s rozměry M6 u dolních válců a M8 u horních válců po 120° na roztečné kružnici o průměru 70 mm (obrázek 38). Opět se jedná o požadavek, který

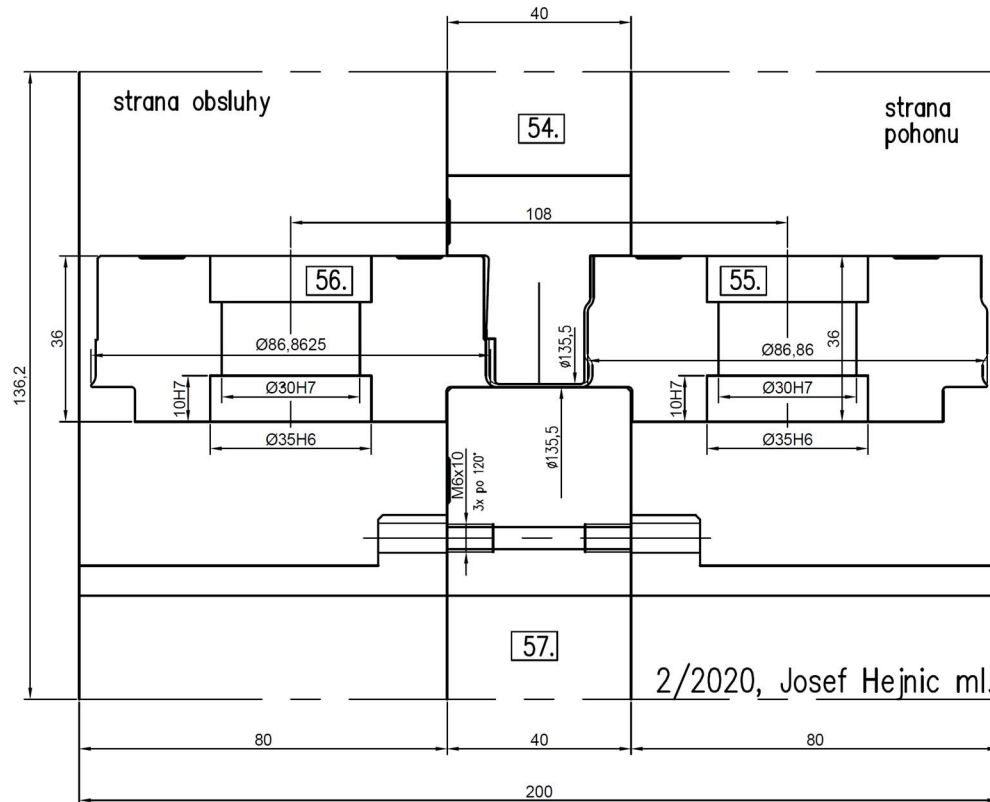
výrobu profilace prodražuje. Výhodou tohoto řešení je rychlejší výměna profilace a lepší skladování, kdy nemůže dojít k záměně distančních kroužků. Běžnější provedení je s klasickými distančními kroužky, které pouze dosedají na bok válce a nejsou nijak spojeny s tvarovým válcem.



Obrázek 38 Navržené vrtání spodních válců

Tvarové válce byly navrženy tak, aby krajní límce horního a dolního válce byly sesazeny bez vůle na sebe. Při tomto sesazení vznikne mezi tvarovými válci mezera přesně na tloušťku plechu. Díky tomu je celá profilace jednoduše opakovatelně seřiditelná. Z tohoto důvodu je nezbytná velice precizní volba tvarů válců i volba vyšších tolerancí válců. Při špatném tvaru profilu, který kvůli vyššímu odpružení, než se předpokládalo, není možné pouze válce k sobě více sesadit, ale musí dojít k úpravě kontury válce na CNC soustruhu.

Z důvodů jednodušší výroby i nižší cenové náročnosti výroby, jsou tvarové válce v 1. – 13. pořadí skládány ze 4 tvarových válců. Rozdělení horního válce na dva má za následek jak lepší manipulaci, tak především jednodušší obrábění válců s osazenými průměry na CNC soustruhu.



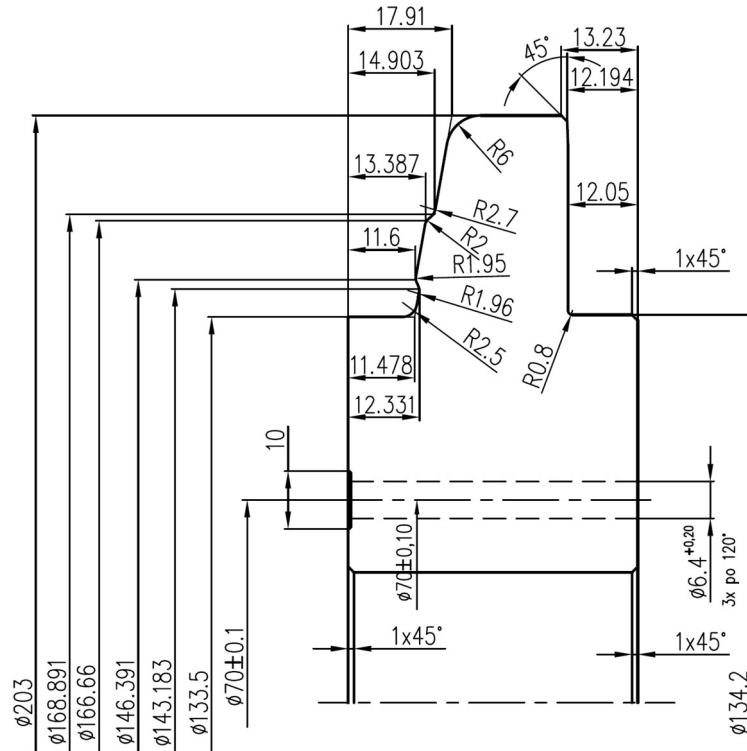
Obrázek 39 Upínací schéma 14. pořadí, které obsahuje boční tvarové válce umístěné na vestavbě

Netypické složení válců obsahuje 14. pořadí. Při návrhu bylo nezbytné mít možnost ovlivnit finální úhel bočnic a tím i šířku nezávisle na dalších parametrech profilu. Tento požadavek bylo nejjednodušší vyřešit vestavbou do posledního pořadí. Toto pořadí je složeno, jak z horního a dolního válce, tak z bočních válců, které je možné nezávisle seřizovat (obrázek 39).

8.2.6 Výrobní dokumentace

Pro potřeby výroby je nezbytné v dalším kroku vytvořit výkresovou dokumentaci pro každý válec. Samotný proces profilování je přesně určen pomocí upínacího schématu válců, na kterých jsou již určené přesné tvary jednotlivých válců. Výkresy obsahují tyto okótované tvary včetně rozměrových a geometrických přesností.

Jelikož se kontura skládá z několika na sebe navazujících rádiusů, bylo pro kótování využito určení polohy průřezu tečen a hodnota poloměru rádiusové části. Zakótovanou konturu válce z 10. pořadí lze vidět na obrázku 40.



Obrázek 40 Kótování tvarové části válce

Válce obsahují zápich o šířce 10 mm do hloubky 0,5 mm na nefunkční části válce (boční strana). Tento zápich umožňuje označení válců specifickým číslem, které se skládá z čísla profilace a specifického čísla válce, které určuje jeho pozici v profilaci. Označení válce je shodné s číslem výrobního výkresu.

Všechny neoznačené rozměry jsou tolerovány $\pm 0,03$ mm pomocí poznámky nad razítkem. Neoznačené hrany a rádiusy jsou zaobleny s poloměrem 0,5 mm. Obvodová i čelní házení tvaru vůči vrtání maximálně 0,03 mm. Drsnost platná pro neoznačené plochy byla stanovena na Ra 0,8, tvarová plocha válce, kde dochází ke styku s plechem, musí být zaleštěna na drsnosti Ra 0,4.

Ve fázi tvorby výrobní dokumentace byl zvolen materiál tvarových válců. Vybrána byla nástrojová ocel s označením X153CrMoV12 (označení dle normy ČSN 19 573). Tato ocel je charakteristická svou vysokou odolností vůči otěru a dobrou prokalitelností, využívá se především pro střížné a lisovací nástroje. Pro toto využití bylo předepsáno tepelné zpracování – kalení v ochranné atmosféře (případně vakuově) na tvrdost minimálně 56 HRC. Z důvodů, že se jedná o přesné tvarové válce, bylo předepsáno, že válce musí být obrobeny i pomocí tvrdého obrábění na CNC soustruhu po zakalení válců.

Tímto způsobem byly vypracovány výkresy pro všech 57 tvarových válců. Mimo výrobní dokumentace k tvarovým válcům byly vytvořeny i výrobní výkresy k distančním kroužkům, vestavbě, na které jsou umístěny boční válce ve 14. pořadí, a dva průvlaky, jeden pro rovnání profilu, druhý naopak pro zakružování.

8.3 Technologie výroby

Výroba tvarových válců proběhla většinou přímo ve firmě Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje. Nejprve byly objednány polotovary s technologickými přídávky z nástrojové oceli. Na konvenčním soustruhu byly opracovány čela polotovaru, byl upraven průměr polotovaru a vyhrubován otvor pro hřídel. Následně pomocí obrážky byla vytvořena drážka pro pero. Za tuto drážku bylo provedeno vycentrování na frézce, kde byly za pomoci přípravku navrtány díry pro šrouby na roztečné kružnici ve správné orientaci vůči drážce pro pero. Samotné vrtání děr a závitování bylo provedeno na konvenční stojanové vrtačce. Na závěr první fáze zpracování byla do polotovarů na CNC soustruhu vyhrubována kontura válců s přídávkem.

Takto obrobené válce byly odeslány do kalírny, kde byly vakuově zakaleny na požadovanou tvrdost. Po zakalení byla vybroušena díra $\varnothing 45H7$ pro hřídel, válce byly následně broušeny naplocho pro dosažení správné šířky. Následně byly válce obráběny na CNC soustruhu. Vlivem vysoké tvrdosti válců se pro obrábění používají destičky z kubického nitridu boru, tím je možné dodržet předepsanou přesnost i kvalitu opracovaného povrchu.

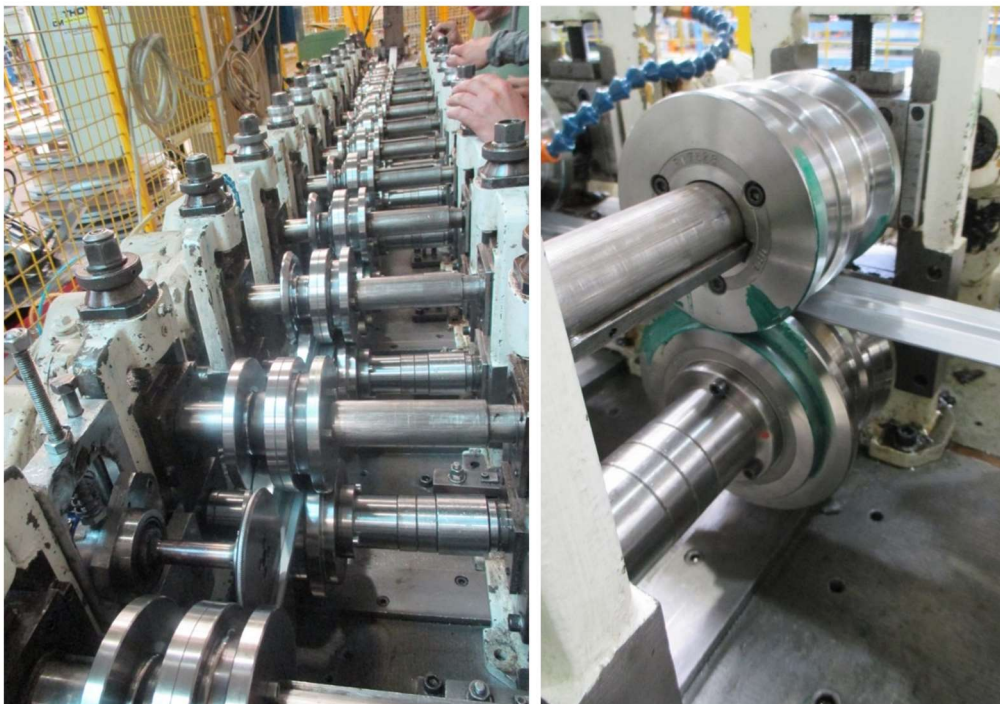
V poslední fázi výroby byly válce sesazeny a sešroubovány dle upínacího schématu. V jednotlivých krocích výroby byly kontrolovány upravované rozměry válců, finální kontrola tvaru proběhla jako poslední operace. Válce byly kontrolovány na průsvit a šířku spáry na plech pomocí spárových měrek při sesazení horních a dolních válců. Při kontrole byly odhaleny dva válce, u kterých se neshodoval tvar s protilehlým válcem. Jedna chyba vznikla špatným okótováním kontury tvarového válce, chyba na druhém válci vznikla při výrobě na CNC soustruhu. Oba zmetky byly opravitelné z původního špatného tvaru válce, proto pouze došlo k opětovnému obrobení na CNC soustruhu.

8.4 Vzorkování

Po dokončení výroby byly tvarové válce se všemi doplňkovými díly osazeny na profilovací linku, za účelem ověření správnosti návrhu tvarových válců. Vzorkování ukáže všechny nedostatky, které vznikly jak při návrhu celé technologie profilace, tak i dílčí chyby, které vznikly nepřesností ve výrobě či například při nedůsledné tvorbě výkresové dokumentace.

Před vzorkováním došlo nejprve k samotnému nasazení tvarových válců na profilovací linku, z tohoto důvodu bylo nutné demontovat přední těla profilovacích stojanů. Následně byly nasunuty sestavy válců současně na horní i dolní hřídel. Po nasazení válců došlo zpět k montáži předního těla stojanu. Celou sestavenou profilaci lze vidět na obrázku 41 vlevo.

V dalším kroku byly válce bez plechu sesazeny k sobě. Díky na sebe dosedajícím límcům válců k tomu byl využit postup sesazení takzvaně „na barvu“. Bylo naneseno drobné množství běžné vodou rozpustitelné barvy na oba límce horního kola. Válec se postupně symetricky spouštěl dolů pomocí stavěcích šroubů stojanu, dokud na obou stranách nedojde k rozetření barvy na tomto límci. Rozetření barvy je patrné na obrázku 41 vpravo (snímek pořízen až po zavedení plechu). Ve chvíli, kdy došlo k rozetření barvy, nebyla mezi límci prakticky žádná mezera a válce tak byly nastaveny do výchozího výrobního nastavení. Následně došlo opět k optické kontrole štěrbiny mezi válci, kterou měl procházet plech - především, zda je ve všech místech mezi válci rovnoměrná a odpovídá přibližně upínacímu schématu.



Obrázek 41 Sestavená profilace přímo na lince (vlevo) a postup sesazení profilovacích válců "na barvu"

V dalším kroku byl upraven začátek vstupního svitku, kterému byly ustříženy rohy přibližně $10 \times 45^\circ$, po ustřížení byly na kraji plechu sraženy hrany, které vznikly stříháním. Obě tyto činnosti pomáhají hladšímu a rovnoměrnějšímu zavádění pásky do profilovacích válců. Následně byl plech protažen vstupním naváděním a zaveden postupně do jednotlivých pořadí pomocí ručního ovládní pohonů linky. Při zavádění

pásky nedocházelo ke stáčení či vychylování pásky, nebylo proto zapotřebí profil při zavádění ručně deformovat tak, aby ho bylo možné navést do štěrbin v dalším pořadí. Již toto ukazovalo na vhodný návrh profilace, ve které nedochází k příliš strmým ohybům plechu. Průchod plechu po 6. pořadí je zobrazen na obrázku 42, tvar plechu odpovídal profilovacímu schématu, které je znázorněno na obrázku 35.

Po zavedení plechu do rovnacího průvlaku v ručním režimu byl spuštěn automatický režim linky. Automatický režim byl provozován v nízké rychlosti 5 m/min, především kvůli nemožnosti využití sekce dělení profilu. Vlivem zpoždění v dodání střižnic do bezodpadového stříhadla, které nebyly součástí dodávky profilace a zákazník si je zajišťoval sám, muselo dojít při vzorkování k ručnímu oddělování profilu.



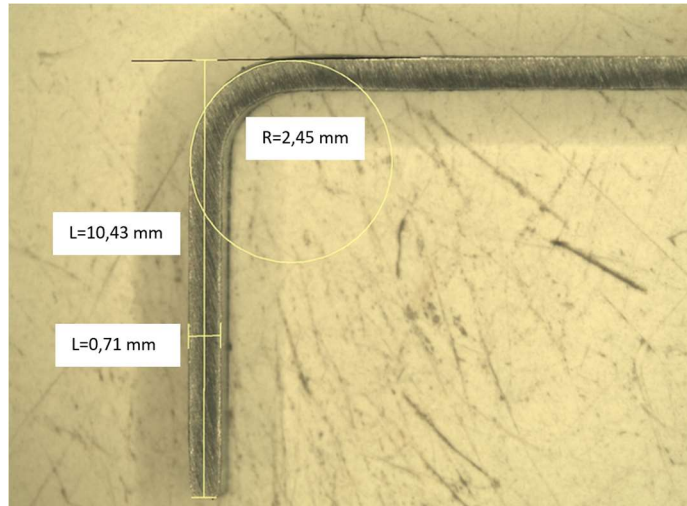
Obrázek 42 6. pořadí s naformovaným plechem

Při automatickém režimu linky nebylo slyšet žádné zvuky, které by upozorňovaly na zadírání profilu či drčení hrany plechu v profilaci. Po delším provozu automatu se začal válec z 12. pořadí ohřívat více, než by při zpracování pásky bylo běžné. Při optické kontrole bylo zjištěno, že do sebe zapadající osazení byla příliš těsná, takže mezi nimi nebyla vůle, docházelo k tření mezi válci, čímž se zahřívaly. Pro průběh testování toto zahřívání nemělo výrazný vliv. Při delším provozu linky v automatickém režimu při plné rychlosti by ale mohlo dojít k výraznému ohřátí válce a vlivem toho ke ztrátě jeho tvrdosti či zvýšenému zadírání na povrchu rozehřátého válce. Z tohoto důvodu byla navržena úprava osazených průměrů válců na CNC, testování profilace však mohlo proběhnout dále.

Celá profilace byla provozována v automatickém režimu přibližně dvě hodiny. Při tomto testování byly vyrobeny vzorky pro testování dalších zařízení, které dále zpracovávají tento profil do finálního produktu.

8.5 Kontrola kvality

Po spuštění linky do automatického režimu byl odebrán vzorek, na kterém byla provedena kontrola kvality.



Obrázek 43 Měření profilu pomocí digitálního profil projektoru

Nejprve byly na profilu změřeny základní rozměry – šířka a výška pomocí posuvného měřítka. Další měření se provádělo již na krátkém kusu, nejprve pomocí prosvícení přiloženého profilu na šablonu s následným zvětšením pod profilovým projektorem. Toto měření pomocí vzorové kontury se ukázalo jako vhodné, proto byly na profilu měřeny standardně rozměry, které byly porovnány se zadávacím výkresem. Tabulka naměřených hodnot profilu s porovnáním se zadanými rozměry profilu je uvedena níže, rádiusy jsou číslovány dle obrázku 34. V naměřených hodnotách je uvedena tloušťka plechu, ta je ovlivněna především tloušťkou vstupního materiálu, při profilování nedošlo k pozorovatelné změně tloušťky materiálu.

Tabulka 6 Naměřené rozměry "U" profilu

Rozměr	Zadaná hodnota [mm]	Tolerance [mm]	Změřená hodnota [mm]	Vyhovující rozměr
Šířka profilu	23,15	± 0,3	23,21	ANO
Délka kratší bočnice	10,5	± 0,3	10,43	ANO
Délka delší bočnice	28,5	± 0,3	28,59	ANO
Rádus dna u kratší bočnice (R1)	2,5	± 0,1	2,45	ANO
Rádus dna u delší bočnice (R2)	2,5	± 0,1	2,43	ANO
Rádus bočního prolisu (R3)	1,96	± 0,1	1,91	ANO
Rádus bočního prolisu (R4)	2,65	± 0,1	2,71	ANO
Rádus bočního prolisu (R5)	2,7	± 0,1	2,79	ANO
Rádus bočního prolisu (R6)	2,7	± 0,1	2,74	ANO
Délka začátku prolisu ode dna profilu	7,38	± 0,3	7,46	ANO
Délka konce prolisu od dna profilu	19,51	± 0,3	19,59	ANO
Tloušťka	0,7	± 10 % (± 0,07 mm)	0,71	ANO
Přímost	Do 0,3 mm/ 1 m	-	0,2 mm/1 m	ANO

Na povrchu profilu nebyly nalezeny škrábance či jiné poškození profilu, které by byly způsobeny profilací a bránily by dalšímu použití profilu.

8.6 Výsledky návrhu a testování „U“ profilu

Z naměřených hodnot bylo zřejmé, že profil dosáhl ve všech rozměrech zadaných rozměrů a parametrů a tím vyhověl dodacím podmínkám. V rámci testování byla ověřena velikost rozvinu vstupní pásky, vhodnost návrhu této profilace na 14. pořadí, správnost stanovení tvaru v jednotlivých profilovacích pořadích, vhodné výrobní tolerance těchto válců i přesnost samotné výroby.

9 Návrh profilace trubky Ø14,6 mm

V druhé části experimentu byl vytvořen návrh profilace na tenkostěnnou trubku o průměru 14,6 mm a tloušťce stěny 0,1 mm. V průběhu druhé fázi byla navržena celá profilace na tuto trubku, bylo provedeno testování, následně byly výsledky dosažené testováním na této profilaci porovnány s výsledky dosaženými pomocí simulace. Na základě vzniklých poznatků byla profilace postupně optimalizována tak, aby splnila požadavky na kvalitní formování a umožnila svaření takto tenkého materiálu.

9.1 Popis základních charakteristik profilu

Z pohledu tvaru se jednalo o jednoduchý profil s kruhovým průřezem. Specifickou vlastností tohoto profilu byla tloušťka materiálu, která činila 0,1 mm. Takto malá tloušťka zvyšovala požadavky na kvalitní formování. Obecně při výrobě trubek je nezbytné kvalitně naformovat krajní ohyby, které k sobě dosedají v místě svařování. Zároveň je nutné, aby v průběhu profilování nedocházelo k zvlnění hran pásky či stáčení hran. Obě tyto vady se významně projevují na kvalitě svaru. S klesající tloušťkou k těmto problémům dochází častěji.

Pro výrobu trubky byly stanoveny dva materiály – korozivzdorná ocel s označením 1.4571 a niklová slitina Inconel 625 (označení dle normy 2.4856). Oba tyto materiály vykazují dobrou tažnost. Korozivzdorná ocel je dobře tvářitelná vlivem velkého rozpětí mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. I u Inconelu je toto rozpětí dostatečné ovšem vlivem vyšších hodnot bude mít větší tendenci k odpružení. V této práci byl dále popsán návrh a optimalizace profilace pro materiál Inconel 625.

Tabulka 7 Mechanické vlastnosti vstupního materiálu pro výrobu TR14,6x0,1 [41, 42]

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]
1.4571	240	540 - 690	40
Inconel 625	460	800	50

Požadavkem bylo, aby trubka o průměru 14,6 mm byla vyráběna společně s dalšími 6 typy tenkostěnných trubek v rozsahu průměrů 8 – 60 mm a tlouštěk materiálu 0,1 – 0,2 mm na jedné profilovací lince. Výrobní program linky měl být měněn pomocí rychle výměnných sekcí tak, aby bylo možné v krátkém čase variabilně přejít na jiný typ výrobku. Zadané výrobní délky se liší dle průměru, standardně se pohybují mezi 600 – 1000 mm.

Tyto tenkostěnné trubky se využívají jako polotovary pro výrobu vlnovcových kompenzátorů pro potrubí (obrázek 44). Vlnovce těchto rozměrů se vyrábí v hydroformingových lisech, kde jsou zevnitř nafukovány tlakem vody, z boku je postupně stlačují trysky do speciální formy, kde se formují jednotlivé záhyby. Polotovar těchto rozměrů se používá pro tvorbu až 4 vlnovců najednou. Obecně vlnovce nacházejí využití často jako pružné členy do výfukového potrubí u automobilů. Konkrétně tyto vlnovce jsou součástí těla speciálních ventilů s nulovým únikem médií do atmosféry. Používají se pro toxická, hořlavá, žíravá, radioaktivní či jedovatá média.



Obrázek 44 Vlnovec – finální výrobek z tenkostěnných trubek [43]

Ze způsobu dalšího zpracování byly kladeny největší požadavky na kvalitu svaru. Svar musí vydržet natlakování v lise, aniž by došlo k jeho porušení. Svar musí mít takové vlastnosti, aby došlo k porušení základního materiálu dříve, než by došlo k defektu ve svaru. Naopak hodnoty průměrů a kruhovitostí nedosahují příliš přísných hodnot, protože v další operaci je dále vytvarována.

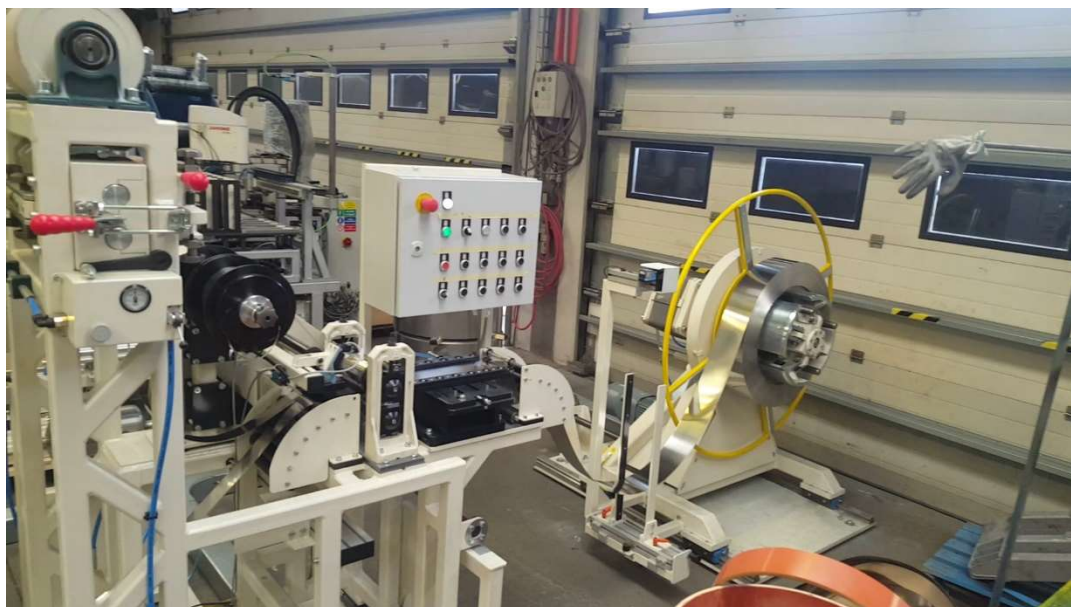
9.2 Profilovací linka

Ve firmě Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje byla navrženy a vyrobeny ostatní komponenty profilovací linky na výrobu těchto tenkostěnných trubek. Základní charakteristiky profilovací linky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8 Základní parametry linky pro výrobu TR 14,6x0,1

Maximální zpracovávaná tloušťka materiálu	0,2 mm
Maximální šíře pásu pro profilování	190 mm
Maximální šíře pásu v převíjecí sekci	300 mm
Rozsah průměru vyráběných trubek	6–60 mm
Maximální teoretická rychlost linky	7 m/min ± 10 %
Maximální rychlost linky při svařování	6 m/min ± 10 %
Délka vyráběných kusů	300–2000 mm
Zástavbový prostor pro umístění linky	14 000 x 3 500 mm

Na začátku profilovací linky je umístěna převíjecí sekce (obrázek 45), která je složena z odvíjecího bubnu, systému pro ořez pásky plechu a navíjecího bubnu. V převíjecí sekci je upravována šíře původního svitku na požadovaný rozvin, ze kterého je vyráběna dále v lince trubka. Zbytek po odříznutí pásky je opětovně navinut do svitku. Ořez je prováděn pomocí dvou párů poháněných kotoučových nožů umístěných na jednom stojanu. Vzdálenost mezi jedním párem kotoučových nožů je vymezena pomocí distančního kroužku. Tento distanční kroužek je různý pro každý vyráběný rozměr trubky. Jeho délka je definována šířkou rozvinu pásky, která je zpracovávána.



Obrázek 45 Převíjecí sekce (odvíjecí buben s jednotkou ořezu)

Z převíjecí sekce páska pokračuje průvěsem do profilovací sekce linky. Před samotnou profilovací sekcí je umístěno navařování svitku pomocí odporové svářečky. Toto nastavování pásy umožňuje kontinuální výrobu na profilovací lince. Následuje navádění, kterým začíná samotná profilovací sekce. Tato sekce včetně postupu jejího navrhnutí je popsána v následující kapitole.

Za profilovací sekcí následuje svařovací uzel. S ohledem na vysoké požadavky kvality svaru i s ohledem na další zpracovávané materiály, které obsahují vysoké procento těžce tavitelných legujících prvků, byla zvolena laserová technologie svařování. Pro svařování byl vybrán pevnolátkový laser TruDisk 1000 od firmy Trumpf o maximálním výkonu 1 kW. Svar je chráněn pomocí atmosféry čistého argonu, který je přiváděn jak na vnější, tak na vnitřní stranu svaru.

Za svařovacím uzlem je osazen pár kalibračních válců, tyto válce formují již svařenou trubku tak, aby dosáhla vyšší kruhovitosti. Návrh těchto válců je zmíněn v další kapitole. Za kalibračními válci následuje tažná sekce, která zajišťuje podélný pohyb profilu. Tažná sekce je složena ze tří samostatných jednotek, které upnou trubku do přesných čelistí a vytahují ji z profilace. Synchronizace je prováděna pomocí motorů s odměřováním a je vytvořena tak, aby vždy dvě jednotky vytahovaly profil, zatímco poslední jednotka koná vratný pohyb do výchozí pozice.

Na konci linky je trubka dělena na finální délky. Kvůli nízkým tloušťkám trubky není možné použít konvenční technologii dělení materiálu, které vždy výrazně deformovalo trubku. Po testech bylo přistoupeno k laserovému dělení materiálu. Za sekcí dělení materiálu následuje poloautomatický výběhový stůl, ze kterého jsou hotové kusy odebírány obsluhou.

9.3 Návrh profilace

Při návrhu profilace musela být zohledněna především velice malá tloušťka materiálu. Díky malé tloušťce materiálu jsou na tvářecí nástroje vyvíjeny velice nízké tvářecí síly. Naopak je jednoduché deformovat materiál i v nesprávných místech, touto deformací dochází k poškození tvaru profilu, které již není možné napravit. U profilování trubky, kde nedochází ke vzniku ostrých ohybů, hrozí k vyjetí materiálu mimo osu profilace, časem i mimo štěrbinu mezi válci.

S klesající tloušťkou materiálu je potřeba zvýšit nároky na přesnost výroby. U tloušťky materiálu 0,1 mm se nepřívětivě projevují obvodové i čelní házení válce v řádu setin milimetru. Vyrábět tvarové válce, hřídele i celé uložení v přesnostech o řád vyšších by znamenalo značné navýšení nákladů. U výroby některých komponentů by musely být využity nové technologie.

S ohledem na tuto problematiku bylo zvoleno profilování pomocí průvlaků. Průvlakly jsou statické tvářecí nástroje, které nevykonávají žádný pohyb. Plech je protahován skrz štěrbinu, které jsou mezi spodní a horní částí průvlaklu. Tím je plech postupně formován do kruhovitěho tvaru. S důrazem na kvalitu naformování hran plechu kvůli svařování byly před první průvlak vytvořeny tři malé pořadí, které krajní ohyby vytváří.

V následujících podkapitolách jsou postupně stanoveny parametry této profilace.

9.3.1 Stanovení počtu pořadí

Pro určení délky profilace byl využit vztah pro určení počtu pořadí dle úhlu přihýbání, který byl využit a ověřen v přechozím experimentu s „U“ profilem. Jelikož se nejedná o klasický ohyb profilu s dvěma rovnými rameny, bude jako trajektorie, kterou musí hrana urazit zvolena polovina obvodu trubky. Jelikož se jedná o výpočet, který stanovuje přibližný počet, a jedná se o velice tenký materiál, byla ve vztahu využita délka vnějšího vlákna v ohybu.

$$p = \frac{1}{2} * O_{Tr14,6x0,1} = \frac{1}{2} * \pi * d = \frac{1}{2} * \pi * 14,6 \text{ mm} = 22,93 \text{ mm}$$

S ohledem na nízkou tloušťku materiálu a snahu o pozvolné tváření materiálu byl zvolen úhel přihýbání $\alpha = 1^\circ$.

$$c = \frac{p}{\text{tg } \alpha} = \frac{22,93}{\text{tg } 1^\circ} = 1313,86 \text{ mm}$$

Podélná rozteč byla stanovena na 140 mm. Tato rozteč byla zvolena s ohledem na předešlé zkušenosti s formováním trubky $\varnothing 10,2$ mm a tloušťce 0,2 mm.

$$x = \frac{c}{HD} + 1 = \frac{1313,86}{140} + 1 = 10,3 \rightarrow 11 \text{ pořadí}$$

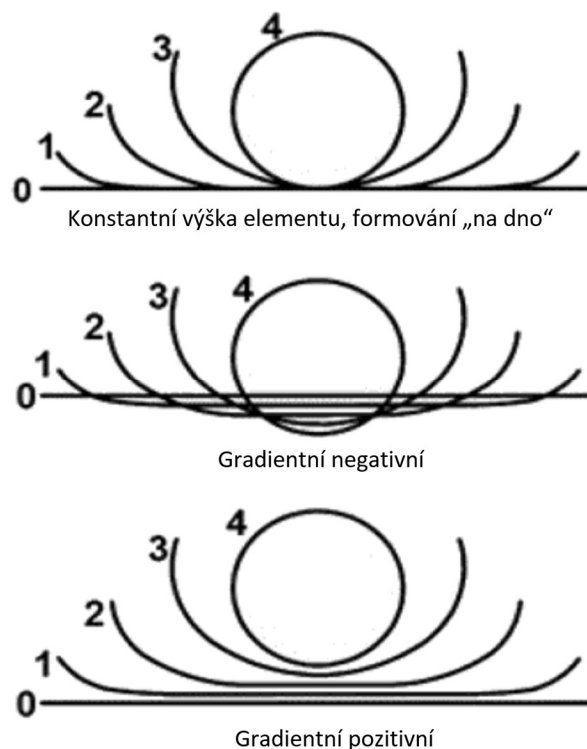
Minimální počet pořadí pro profilování trubky o průměru 14,6 mm a tloušťce byl stanoven na základě výpočtu dle úhlu přihýbání hrany na 11. Těchto 11 profilovacích pořadí bude osazeno průvlakly. Mimo tyto průvlakly byly navrženy ještě další 3 pořadí pro kvalitní naformování krajů pásky (zmiňováno již v úvodu). Tyto pořadí budou osazeny klasickými tvarovými rotačními válci.

Vypočítané hodnoty byly porovnány s předešlými zkušenostmi s formováním trubek. Pro formování trubek podobných průměrů, ale pomocí tvarových válců bylo využito 6 hlavních stojanů a 6 mezistolic. Toto množství přibližně odpovídá výše uvedenému výpočtu.

9.3.2 Vertikální rovina

Následně byla stanovena vertikální rovina profilu. Z důvodů symetrického profilu nebylo mnoho možností stanovení polohy této roviny. Vertikální rovina profilu stanovena do prostředku rozvinu, což odpovídá dnu hotové trubky.

K pohybu vertikální roviny při profilování trubek je možné přistoupit třemi rozdílnými přístupy. V prvním případě je trubka profilována takzvaně „na dno“. V tomto případě vybraný element z vertikální roviny v průběhu profilování zůstává v konstantní výšce. Druhý přístup je gradientní negativní. V tomto případě vybraný element v průběhu profilování klesá. Tento přístup je vhodný především pro formování plochých oválných trubek. Poslední přístup je gradientní pozitivní. Při tomto návrhu se postupně zvyšuje výška profilovací roviny. Všechny znázorněné přístupy lze vidět na obrázku 46.



Obrázek 46 Možnosti pohybu elementu ve vertikální rovině [19]

Pro tuto profilaci byla zvolena metoda s konstantní výškou elementu ve vertikální rovině. Díky profilování pomocí průvlaků nedochází ani k mírnému pohybu vzhůru kvůli zvyšování základních průměrů válců.

9.3.3 Výpočet rozvinu

V dalším kroku byl vypočítán rozvin materiálu. Nejprve byl stanoven poměr vnitřního ohybového rádiusu k tloušťce.

$$\frac{R_{int}}{t} = \frac{7,2}{0,1} = 71$$

Dle tohoto poměru byl určen součinitel pohybu posunu neutrální osy $x = 0,50$. To znamená, že neutrální osa se nachází v polovině tloušťky materiálu.

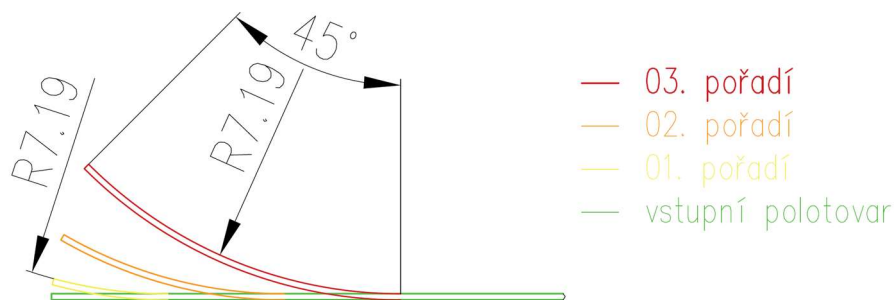
Z těchto hodnot byl stanoven rozměr teoretického rozvinu pro profilování pomocí následujícího vztahu:

$$a = 2 * (R_{int} + 0,5 * t) * \pi = 2 * (7,2 + 0,5 * 0,1) * \pi \text{ mm} = 45,55 \text{ mm}$$

K tomuto teoretickému rozvinu materiálu byl přičten technologický přídavek na svar, který v tomto případě odpovídá jedné tloušťce materiálu, tzn. 0,1 mm. Celkový rozvin materiálu pro tuto trubku po přídavku na svar činí 45,65 mm.

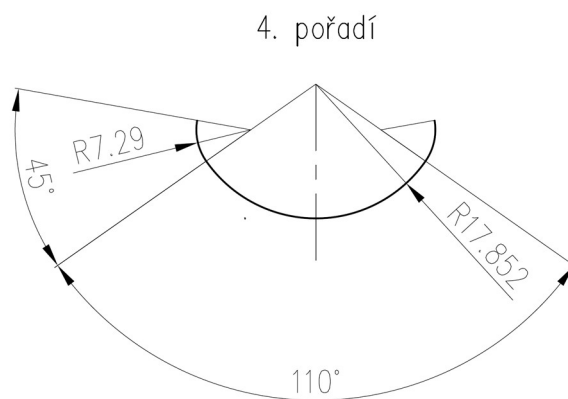
9.3.4 Profilovací schéma

Profilovací schéma se skládá ze dvou částí. V první části byly navrženy krajní ohyby, které se budou uskutečňovat na třech malých profilovacích pořadích. Tyto ohyby se formují s konstantním rádiusem a proměnlivým úhlem, ve kterém je ohyb realizován (obrázek 47). Ve třetím pořadí je dosaženo krajního úhlu 45° při vnitřním poloměru ohybu 7,19 mm. Takto vytvarovaný ohyb kraje je již konstantní až do svařování. Přesnost tohoto ohybu ovlivňuje kvalitní sesazení hran při svařování. Při nesymetrickém vytvarování na straně pohonu a obsluhy dochází k přesazení pásky ve svařovacím průvlak. Svar, který vznikne při spojení takto naformovaných okrajů, nemá správné geometrické vlastnosti. Vlivem vzniklých vrubů u kořene svaru dochází k defektům při nafukování trubky tlakovou vodou.



Obrázek 47 Schéma profilování krajních ohybů v prvních třech pořadích

Ve druhé části je pracováno naopak se středovou částí profilu. Tato středová část profilu je tvářena celá, to znamená, že postupně klesá hodnota poloměru ohybu. V posledním pořadí je trubka naformována s vnějším poloměrem 7,42 mm. Finální poloměr je dotvářen až ve svařovacím průvlaku. Pokud by došlo k brzkému naformování trubky do kulatého průřezu, došlo by snadněji k jejímu stáčení. Vlivem stáčení by bylo nemožné tuto trubku kontinuálně svařovat, protože by se neustále vychylovala spára. Na následujícím obrázku je znázorněno profilovací schéma pro 4. pořadí, podobně bylo navrženo profilovací schéma pro všechny další pořadí. Pro zkrácení jsou hodnoty pro jednotlivé pořadí zapsány do tabulky č. 9, která udává poloměry a úhly ohybu (číslování v tabulce neudává hodnoty části pro naformování okrajů pásky).



Obrázek 48 Profilovací schéma pro 4. pořadí

V kalibrační části je již profilovací schéma velice jednoduché. Přes vnitřní jádro se počítá s nepatrným zvětšením průměru z rozměru v profilaci 14,58 mm na výsledných 14,60 mm. Celá kalibrace je navržena pouze na jedno profilovací pořadí.

Celé profilovací schéma bylo navrženo v programu AutoCAD od firmy Autodesk, určenému pro zpracování především 2D dokumentace.

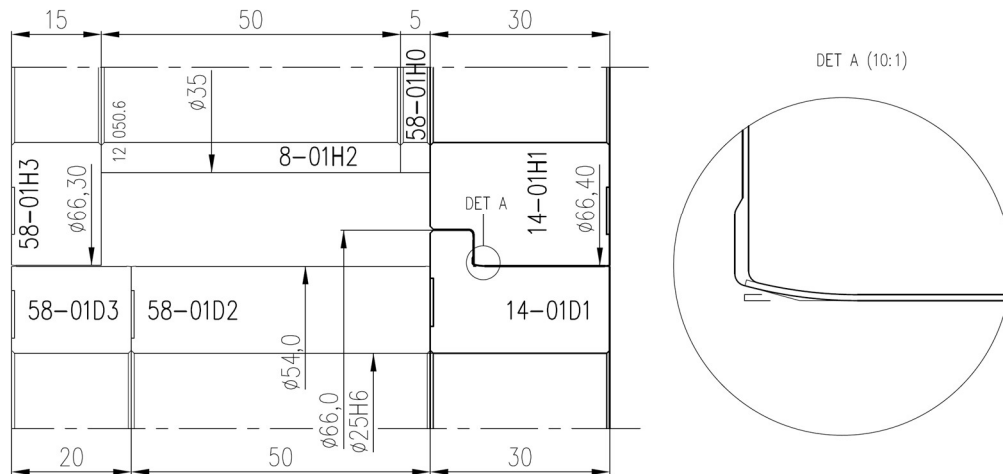
Tabulka 9 Velikost úhlů a poloměrů ohybu pro jednotlivé pořadí profilace TR14,6x0,1

Číslo pořadí	Vzdálenost od svařovacího průvlastku [mm]	Úhel ohybu středové části [°]	Vnější poloměr ohybu [mm]
1.	1540	20	97,96
2.	1400	60	32,69
3.	1260	90	21,81
4.	1120	110	17,85
5.	980	130	15,11
6.	840	160	12,29
7.	700	190	10,36
8.	560	220	8,95
9.	420	250	7,88
10.	280	260	7,58
11.	140	266	7,42
Svař. průvlastek	0	270	7,32

9.3.5 Upínací schéma

Z takto navrženého profilovací schématu bylo vytvořeno upínací schéma pro jednotlivé pořadí. Jak již bylo uvedeno, na první tři pořadí označené 01, 02 a 03, které slouží k naformování okrajů pásky, byly použity klasické tvarové válce. Při tvorbě upínacího schématu této části bylo využito symetrie profilu, z tohoto důvodu je zobrazena pouze polovina pořadí (obrázek 49). Druhá polovina prvků je s těmito totožná. Pro zlevnění výroby byly využity distanční kroužky z jiných profilací, které se pro tuto profilovací linku vyráběly.

01. POŘADÍ



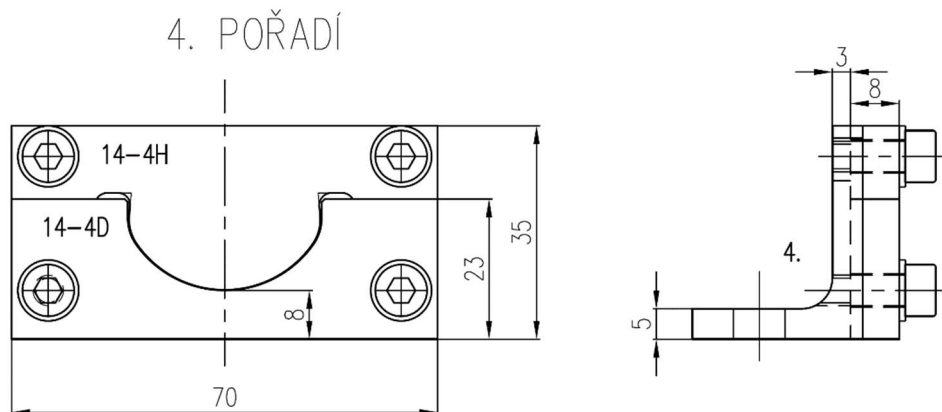
Obrázek 49 První pořadí sloužící k naformování krajů pásky s detailním tvarem krajního ohybu

Při návrhu tvarových válců pro naformování bylo dbáno na přesné vedení plechu mezi límci válců. Mezera mezi límci nesmí být menší než vstupní páska, případně plech naformovaný z předchozího pořadí. Při nedostatečné šířce štěrby mezi válci dochází k deformaci pásky na okrajích a vzniku zvlnění hrany pásky. Tato deformace se projevuje i vlivem odpružení materiálu. Páska zůstává zaklíněná mezi úzké límce válce, dočasně je vtažena válcem, na který se namotává. Následně je vytažena dalším pořadím, dojde k prudkému vytažení pásky z límců a v místě, kde se páska zaklínila ve válci, vznikne defekt na hraně pásky. Toto byl další důvod pro návrh dělených tvarových válců, mezi které je možné vložit tenký distanční kroužek a nevyhovující šíři štěrby pro daný rozvin materiálu montážně zvětšit.

Následně bylo navrženo upínací schéma pro zbytek profilace, která je řešena pomocí průvlaků. Příklad je uveden na obrázku 50, kde je vyobrazeno upínací schéma pro 4. pořadí. Průvlakky jsou statické tvářecí nástroje, proto nebylo potřeba tak důsledně dbát na odlehčení tvaru, protože nedochází ke styku ploch s různou obvodovou rychlostí s materiálem, jak tomu je u tvarových válců. Odlehčení horní části průvlakku bylo provedeno pro snížení tření a tím snížením zatížení tažné sekce profilu. Plech je tvářen pomocí spodní části průvlakku (označené písmenem D). Pokud by byla navržena pouze spodní část plechu, došlo by k odpružení plechu, který by nekopíroval tvar spodního průvlakku. V extrémním případě by došlo k vytažení plechu mimo průvlak. Ve fázi navrhování upínacího schématu bylo navrženo i upínání průvlaků pomocí úhelníků ke stolu.

Posledním navrženým prvkem jsou kalibrační válce. Tyto válce tvarují již svařenou trubku do kruhovitěho tvaru. Pro správné vytvarování a zahlazení

přebytečného svaru bylo navrženo kalibrování i z vnitřní strany trubky. Pro kalibraci vnitřního rozměru je využito jádro, přes které je trubka tažena.



Obrázek 50 Upínací schéma 4. pořadí se znázorněním upínání ke stolu (vpravo)

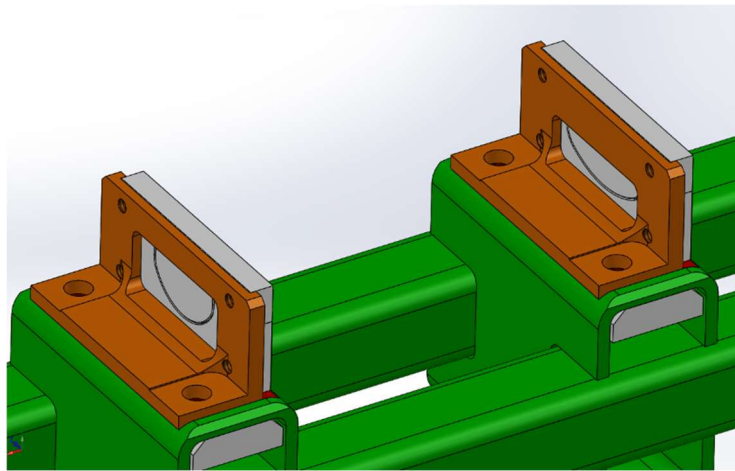
9.3.6 Výrobní dokumentace

V dalším kroku byla z upínacího schématu vytvořena výrobní dokumentace. Pro první části profilace vznikly výkresy tvarových válců a distančních kroužků. Tvarové válce byly opět kótovány pomocí průsečíků tečen radiusových částí. Oproti návrhu předchozí profilace se liší především v přesnosti. Vrtání válce bylo navrženo v tolerančním poli H6, pro tvarové části válce byla navržena přesnost $\pm 0,01$ mm, obvodové i čelní házení vnějšího tvaru maximálně 0,01 mm. Tyto zvýšené nároky na výrobu byly stanoveny s ohledem na zpracovávanou tloušťku plechu. Tvarové válce byly navrženy z nástrojové oceli X153CrMoV12. Tato ocel byla kalena a popuštěna na tvrdost 60 HRC. Vyšší tvrdost válců byla zvolena s ohledem na vyšší pevnost vstupního materiálu na zpracování krajů plechu, které vlivem ostrých hran z řezání pásky mají větší tendenci poškozovat povrch válců. Po tepelném zpracování je nezbytné tvrdé obrábění pro dodržení předepsaných tolerancí.

Dále byla vypracována výrobní dokumentace k průvlakům. Nejprve byly zpracovány 3D modely průvlaků v programu SolidWorks. Následně byla vypracována výkresová dokumentace odkazující se na tyto modely, dle kterých bylo provedeno obrábění tvarové části průvlaku. Hlavním požadavkem na materiál průvlaku byl nízký koeficient tření (dobrá kluznost). Z tohoto důvodu byl vybrán polymerní materiál. Dalšími požadavky byly vysoká odolnost proti opotřebení, tuhost, rozměrová stabilita a s tím související nízká nasákavost. Těmto požadavkům nejlépe vyhověl polyoxymethylen, označovaný zkratkou POM.

V rámci návrhu byl vypracován i systém upínání průvleků pomocí úhelníků ke konstrukci umístěné na stole (znázorněno na obrázku 51).

Následně byla vytvořena dokumentace pro kalibrační válce. Válce mají předepsané obdobné parametry, které byly navrženy pro válce na vstupu profilace. Vnitřní jádro bylo vyhotoveno ze speciálního hliníkového bronzu s obchodním označením AMPCO 25. Tento materiál je tvrdý, otěruvzdorný a zároveň má nízký koeficient tření. Díky těmto vlastnostem je velmi vhodným materiálem pro jádro, na kterém dochází k značnému namáhání kvůli otěru vlivem tažení trubky přes toto jádro.



Obrázek 51 Uchycení průvleků ke svařované konstrukci, která je umístěna na stole linky

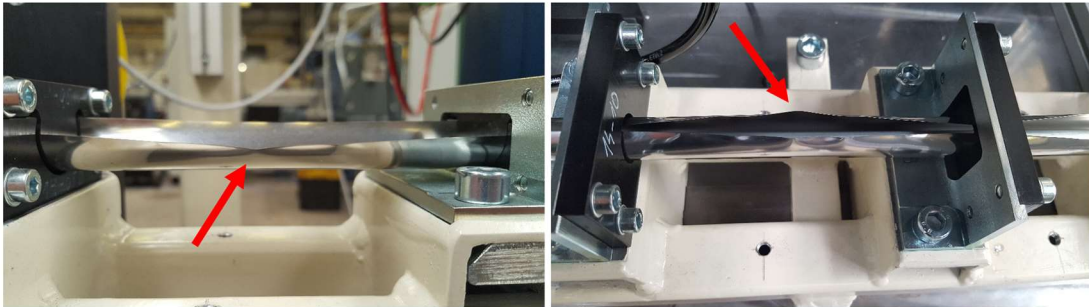
9.4 Výroba a testování

Jednotlivé komponenty profilace byly na základě tohoto návrhu vyrobeny ve firmě Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje. Výrobní postup tvarových válců byl již popsán v předchozí části experimentu. V tomto případě pouze nedošlo k výrobě závitových děr z boků závitu. Průvleků byly vyráběny na CNC frézce pomocí speciálních nástrojů pro obrábění polymerů.

Po samotné výrobě došlo k sestavení profilace dle upínacího schématu. Takto sestavená profilace na svařené konstrukci, která slouží jako rychle výměnná sekce, byla připravena na montáž na výrobní linku. Spolu s montáží došlo k výměně kotoučových nožů ořezu, které definují šířku ořezu. Následně byly vyměněny kalibrační válce za svařovací uzlem, komponenty v tažné sekci a sekci dělení profilu.

Po zavedení svitku plechu do sekce převíjení pásky byl ověřen rozvin plechu, který odpovídal navrženému rozvinu plechu 45,65 mm. První část pásky byla navedena dále do profilovací linky. Druhá část plechu, která zůstala po oříznutí pásky, byla zpětně namotávána na navíjecí buben.

Nejprve byla páska navedena pomocí speciálních pravítek, které zamezují vyboulení plechu, do první části profilace, která slouží k naformování okrajů. Při zavádění vznikly již v prvních pořadích zlomy na hranách pásky. Po navedení pásky do průvlaků musela být odmontována jejich horní polovina, aby byl dočasně snížen odpor proti pohybu pásky, která je při zavádění tažena pouze obsluhou linky. Mezi průvlakly byl pozorován další nárůst zlomů v hranách pásky. Tyto zlomy jsou patrné na obrázku níže.



Obrázek 52 Vznik zlomů na hranách pásky mezi průvlakly

I přes zvlnění hran plechu byla páska protažena svařovacím průvlakem až do tažné sekce. Následně byly nastaveny svařovací parametry – výkon laseru 70 W, přívod vnitřního ochranného plynu 2 l/min, přívod vnějšího ochranného plynu 6 l/min. Při těchto parametrech svařování docházelo k propalům ve svaru. Celý proces svařování se jevil jako velice nestabilní. Docházelo k stáčení pásky ve svařovacím průvlaklu. Byly otestovány vzorky trubky zkouškou rozšiřováním dle normy EN ISO 8493. Tato zkouška se provádí do porušení materiálu. Z pohledu kvality svaru bylo následně vyhodnocováno, zda došlo k vzniku trhliny ve svaru, případně tepelně ovlivněné oblasti, či nikoliv. U čtyřech z pěti vzorků k vzniku trhliny ve svaru došlo, čímž tyto vzorky byly označeny jako nevyhovující.

9.5 Optimalizace procesu

Vlivem negativní vizuální zkoušky svaru i zkoušky rozšiřováním muselo dojít k optimalizaci celého procesu. Byly označeny místa, kde vznikají zlomy v hranách pásky, aby bylo možné sledovat, zda tyto deformace mají za následek defekty ve svaru. Shoda označených míst s místy defektů byla úplná. V následujících odstavcích jsou popsány změny, které byly navrženy pro úpravu profilace.

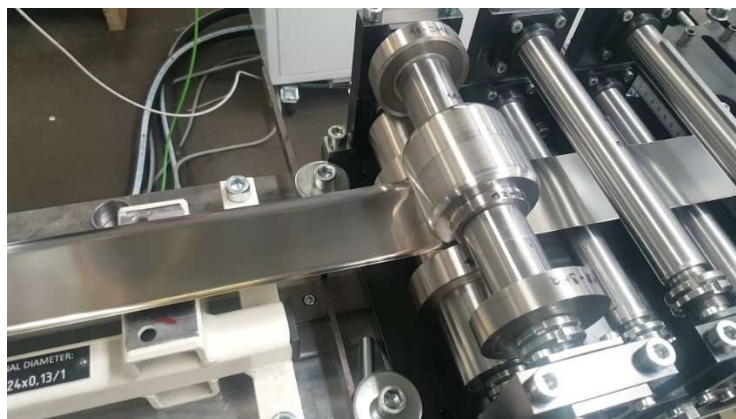
Nejprve byly pozorovány zlomy na hranách pásky vznikající na prvních třech profilovacích pořadích za účelem určení příčiny výskytu těchto defektů. Na druhém a třetím pořadí, kde je větší úhel přihnutí krajní části (30° a 45°), docházelo k zachycení pásky za límce dolních válců. Toto zachycení způsobilo dočasné vtažení pásky pod

válcovací rovinu. Při dalším pohybu došlo k většímu napětí v pásce, která se následně uvolnila. V místě, kde byla páska zaklíněna mezi límci, došlo k poškození hrany plechu a vzniku zlomu.

Možných příčin této vady je několik, mezi jednu z nich může patřit nekonstantní šířka pásky. Opětovně byl změřen vstupní rozvin na několika místech. Ani jedno měření neukázalo na nevhodný rozměr vstupního pásu plechu. Dále byly opticky zkontrolovány hrany plechu, zda při ořezávání nedochází ke vzniku nesymetrického otřepu, který by měl za následek zachycování pásky v límčích tvarových válců. Na pásce se vyskytoval drobný otřep, jehož výskyt byl ale rovnoměrný v celé délce hrany plechu.

Po vyloučení vad na vstupním pásu plechu byla příčina vzniku zlomů v hranách pásky hledána přímo v pořadích určených pro formování hran. Byla změřena páska, která vystupuje z těchto pořadí. Poloměry krajních ohybů místo 7,2 mm dosahovaly hodnoty 8,75 mm. Toto měření ukázalo na mnohem větší odpružení pásky, než které se předpokládalo při návrhu profilace. Vlivem většího odpružení materiálu vystupuje páska z pořadí širší, než se počítalo pro vstup do pořadí dalšího. V následujícím pořadí dojde k zachycení pásky mezi límce, mezi kterými není dostatečná šířka pro pásku. Vlivem odpružení dochází i k výraznému zařezávání hran pásky do průvlaků, které dále profilují trubku.

Z těchto důvodů bylo přistoupeno k optimalizaci tvarových válců. Původní návrh se skládal ze tří pořadí, které postupně vytvářely na pásce krajní ohyb. Páska ovšem vykazovala mnohem větší odpružení, zároveň vlivem nízké tloušťky materiálu nevyžaduje vysoké tvářecí síly. Z těchto důvodů bylo navržena úprava tvaru posledních válců. V těchto válcích byl vytvořen krajní ohyb o poloměru 5,8 mm. Zároveň v novém konceptu se předpokládalo využití pouze tohoto posledního páru tvarových válců. Vlivem této změny by došlo k úspoře nákladů na ostatní válce a zároveň by se zkrátil čas přestavby a seřízení těchto válců.



Obrázek 53 Část profilace pro vytvoření krajních ohybů po optimalizaci

S těmito úpravami proběhlo další vzorkování trubky o průměru 14,6 mm. Osazeno bylo pouze poslední pořadí s upravenými tvarovými válci (obrázek 53). Takto upravená první část profilace určená pro naformování hran pásky fungovala výrazně lépe. Nedochovalo ke vzniku zlomů v hranách pásky. Po měření byla zjištěna hodnota poloměru krajního ohybu, která činila 7,1 mm.

I po úpravě vstupní části profilace docházelo stále ke zlomům na hranách pásky mezi průvlakem. Již z obrázku 52 je zřejmé, že docházelo za každým průvlakem k výraznému odpružení pásky. Vlivem dlouhé vzdálenosti, kdy páska nebyla formována průvlakem, došlo k rozevření aktuálně formované části a v tomto rozevření došlo ke vzniku zlomů.

Po zjištění této skutečnosti bylo nezbytné navrhnout úpravu i zbylé části. Podobně jako u vstupních pořadí i zde problematika spočívala ve velkém odpružení plechu. Při změně jednotlivých tvarů v průvlacích by stále zůstávalo odpružení v místech, kde páska není ničím vedena. Z tohoto důvodu byl přepočítán vztah stanovující délku profilace tak, aby došlo k rychlejšímu ohybu na kratší vzdálenosti. Z tohoto důvodu byl úhel α zvolen 2° .

$$c = \frac{p}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{22,93}{\operatorname{tg} 2^\circ} = 656,63 \text{ mm}$$

Z výše uvedeného výpočtu pro rychlejší profilování byla určena délka profilace na 656 mm. Z důvodů nižších nákladů na úpravu svařovaného nosiče došlo k úpravě této vzdálenosti na 700 mm, kdy je možné využít i původní pozice průvlaků.

Takto upravená profilace je zobrazena na obrázku 54. Po těchto úpravách došlo k opětovnému vzorkování na profilaci. Při testování se již nevyskytovaly zlomy v hranách pásky a podařilo se vyprofilovat trubku s úzkou spárou bez defektů až do svařovacího průvlaku (obrázek 54).



Obrázek 54 Trubka o průměru 14,6 mm před svařovacím průvlakem bez defektů na hranách pásky

9.5.1 Výsledky návrhu a testování trubky \varnothing 14,6 mm

Po úpravách došlo ke svaření trubky za stejných podmínek jako při prvním testování. Při nájezdové rychlosti 1,5 m/min byly vytvořeny vzorky, které byly podrobeny opět vizuální zkoušce a zkoušce rozšiřováním. Obě zkoušky vzorky splnily. Byl změřen vnější průměr trubky, který činil 14,55 mm s odchylkou $\pm 0,05$ mm v kruhovitosti trubky.

Následně proběhlo zvýšení rychlosti na 5 m/min, což je standardní výrobní rychlost. Při této rychlosti bylo profilování stabilní, aniž by docházelo ke vzniku zlomů či stáčení spáry ve svařovacím průvlakem. Vzorky z výroby rychlosti 5 m/min byly opět prověřeny pomocí zkoušek, kterým vyhověly. Následně bylo vyrobeno 50 kusů vzorků o délce 770 mm, které byly ověřeny v reálném výrobním procesu. Vzorky vyhověly, na základě čehož byla profilace uznána za provozu schopnou.

10 Simulace profilování

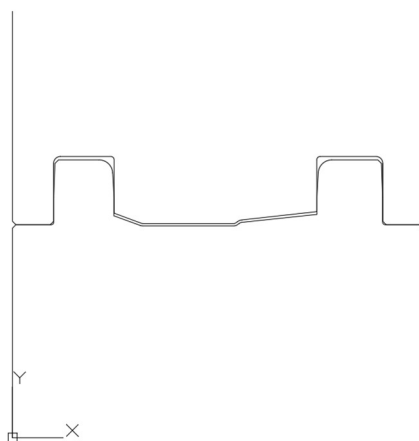
Cílem této části experimentu bylo seznámení se simulacemi procesu profilování, porovnání výsledků s reálnými daty a navržení využití simulace v moderním procesu návrhu profilování. V rámci toho proběhla volba simulačního programu, příprava vstupních dat, nastavení simulace.

Pro simulaci profilování byl zvolen software Simufact Forming. Tento program má velice široké pole uplatnění, dokáže simulovat, jak plošné, tak objemové tváření za tepla i studena. Mimo jiné umožňuje právě simulování procesu profilování díky speciálnímu pluginu, který je k tomu určen.

Práce na simulacích profilování proběhly na Fakultě strojní, ČVUT v Praze.

10.1 Vstupní data

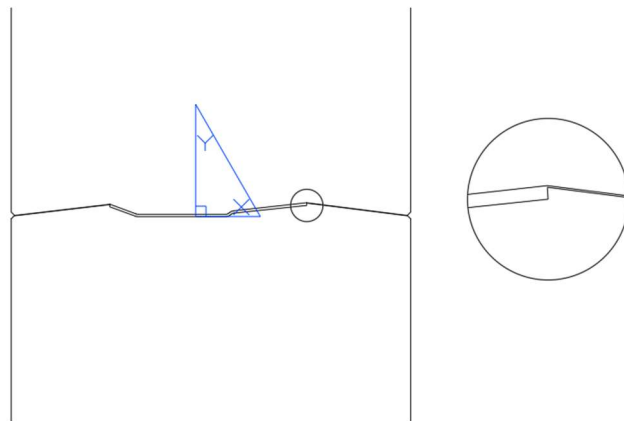
Pro simulační program Simufact Forming bylo potřeba připravit vstupní data, pomocí kterých jsou definovány tvary jednotlivých válců. Vstupním formátem pro načtení je 2D formát souborů .dxf. Program vyžaduje jednotlivé soubory pro každé pořadí, sám již rozpoznává tvary jednotlivých válců. Do souborů se nevyznačují osy válců, pouze polovina jejich kontury. Příklad připravených vstupních dat je zřejmý na obrázku 55. Tato vstupní data byla vytvořena pomocí programu AutoCAD. Kontura byla převzata z upínacího schématu „U“ profilu vytvořeného v předchozí části experimentu.



Obrázek 55 Kontura prvního profilovacího pořadí uložená ve formátu dxf

Takto vytvořená kontura byla importována do programu Simufact Forming. Při importu však došlo k problémům, jednotlivé tvarové válce nebyly rozpoznány a vzniklá rotační tělesa vůbec neodpovídala vstupním datům ze souboru dxf. Z tohoto

důvodu muselo dojít k úpravě vstupních dat. Nejprve došlo k odstranění osazených průměrů válců, které slouží v praxi k vycentrování horního válce. Při simulaci tyto osazené průměry nemají žádnou funkci. Ani po této úpravě se nepodařilo úspěšně importovat vstupní data. V dalším kroku byla porovnána data ze vstupní vzorové profilace vytvořené tvůrci programu Simufact. U těchto válců vždy došlo k jednoznačnému vymezení spáry mezi válci, kterou má páska plechu procházet. V dalším kroku byly drobně upraveny kontury válců tak, aby došlo k uzavření této spáry. Při tomto kroku byly změněny nefunkční části válců, ale byl zachován funkční tvar a průměr válců. Počátek souřadného systému souboru .dxf byl umístěn do průniku vertikální roviny profilování se spodním válcem. Takto vytvořená vstupní data (obrázek 56) byla již úspěšně importována do programu, který vytvořil 3D tělesa těchto válců pro jednotlivé pořadí.



Obrázek 56 Upravená kontura válců pro import do simulačního programu Simufact Forming, vpravo detail uzavření spáry pro plech

10.2 Průběh nastavení simulace

Po úspěšném importu tvarů profilovacích válců do programu proběhlo nastavení dalších parametrů simulace. Další vstupní data do simulace byla nastavena dle příručky určené pro nastavení profilování k programu Simufact Forming.

Prvním z nastavovaných parametrů je symetrie profilu. Program umožňuje využít symetrie profilu, díky čemuž je možné ušetřit polovinu elementů, pro které by jinak probíhal výpočet víceméně zbytečně. V tomto případě symetrii profilu nebylo možné využít.

Dalším parametrem je nastavení tepelně fyzikálních vlastností tvarových válců. Možnosti nastavení jsou tři. První variantou jsou dokonale tuhé nástroje bez zohlednění tepelné vodivosti nástrojů, druhou dokonale tuhé nástroje se zohledněním tepelné vodivosti, třetí možností jsou elastické nástroje se zohledněním tepelné vodivosti. Tvarové válce vyrobené z nástrojové oceli jsou

dokonale tuhé nástroje. Tím, že celý proces profilování probíhá za studena, nemá vliv na simulaci zohlednění tepelné vodivosti tvarových válců.

Při profilaci dochází k tečnému styku tvarových válců s pásem plechu. Díky tomuto styku dochází k výrazně nižšímu tření než při jiných procesech tváření a z tohoto důvodu program Simufact Forming zanedbává vliv tření na všech tvarových válcích. Díky tomu je možné výrazně zjednodušit kinematiku nástrojů. Válce nemusí být poháněny, při výpočtu se chovají jako nerotační nástroje, skrz které je protahován plech určitou rychlostí.

Dalším parametrem je kontaktní úhel, který bude brán v úvahu při výpočtu. Pro tuto profilaci byl zvolen úhel o velikosti 30 °. Tento úhel byl rozdělen pro účel výpočtu rozdělen na 36 dalších elementů. Pro tvarové válce byla dále nastavena teplota nástrojů 20 °C.

Dále byl vytvořen v programu polotovaru. Mezi základní vlastnosti polotovaru patří délka, šířka, výška a tloušťka. Délka pro potřeby simulace byla nastavena na 1200 mm tak, aby v době výpočtu byl plech vedený přes 4 pořadí. Šířka a tloušťka odpovídala rozměrům vstupního pásu plechu v praxi využitém pro tuto profilaci, tj. 59,2 x 0,7 mm. Na materiálu byla upravena hustota sítě dle předpokládaných míst ohybu. V těchto místech byla nastavena hustota sítě 0,2 mm s počtem tří vrstev na tloušťku materiálu. V ostatních místech byla hustota sítě 0,5 mm s jednou vrstvou elementů na tloušťku plechu. V pozdější fázi byl nastaven typ materiálu DC04.

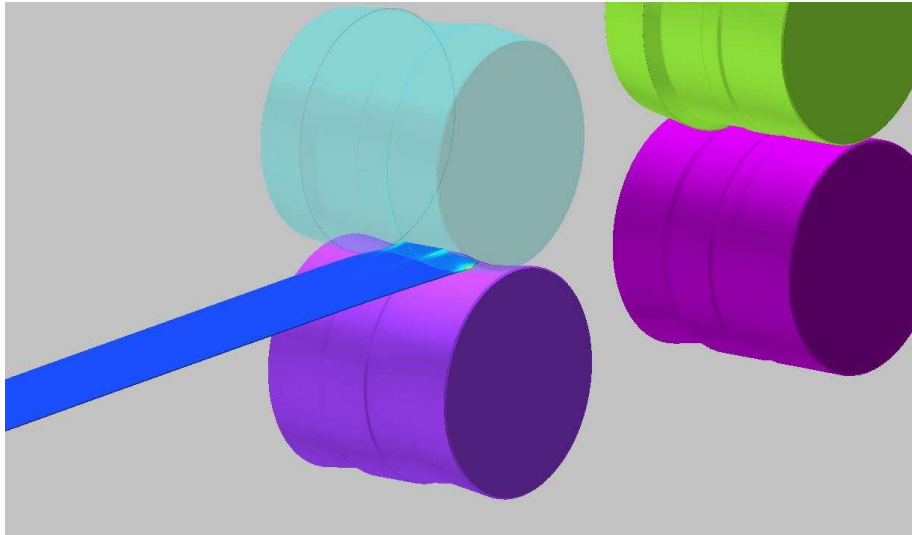
V poslední fázi byla nastavena rychlost profilování udávaná v milimetrech za sekundu. Pro simulace byla využita maximální rychlost profilování 25 m/min, což odpovídá rychlosti 416 mm/s. V dalším kroku byl určen reálný čas profilování, kterým je ohraničena výpočet profilování. Pro tuto simulaci byl čas stanoven na 12 s, což odpovídá úplnému projetí polotovaru o délce 1200 mm skrz celou profilaci.

Postupně byly navoleny do aktuálního projektu jednotlivé nástroje i podmínky, za kterých simulace probíhá. Po nastavení těchto vstupních parametrů byla simulace spuštěna. Požadovanými výstupy ze simulace byly deformace materiálu, dosažené napětí v materiálu a tloušťka materiálu. Odhadovaný čas proběhnutí simulace byl 16 hodin.

10.3 Výsledky simulace, začlenění do procesu návrhu

Po výše popsaném postupu importu geometrie tvarových válců a nastavení podmínek byla simulace spuštěna. V průběhu simulace došlo k neočekávané chybě, která proces výpočtu zastavila. Stav simulace před zastavením je na obrázku 57. I po opakovaném kontrole vstupních dat a podmínek, které byly nastaveny dle návodu k tomuto programu, nedošlo k průběhu simulace s kladným výsledkem. Kvůli

omezením, které byly způsobeny výskytem nemoci Covid-19 a následných ochranných opatření, se již nepodařilo dosáhnout alternativní možnosti, která by vedla k úspěšnému dokončení pokusu. Touto možností by bylo absolvování školení či případná změna softwaru, který by se k procesu simulování použil.



Obrázek 57 Stav simulace před jejím selháním

Přestože nedošlo k úspěšnému dokončení simulace, byl v této kapitole zmapován postup nastavení, potřebná vstupní data a určitý přehled o této problematice. Na základě těchto zkušeností je stanoveno možné využití procesu simulování a obecně softwarová podpora procesu navrhování profilování.

Využití simulací má své místo v procesu navrhování, kde největší přínos může být u aplikací a materiálů, se kterými má technolog méně zkušeností. V těchto limitních případech je ovšem nutno ověřovat i platnost simulací. Nemálo prostoru je potřeba věnovat samotnému nastavení simulace a zadání správných dat. Hlavní výhodou simulace je možnost úpravy základních parametrů profilace ještě ve fázi navrhování. Zohlednění těchto výsledků při optimalizaci profilace ještě před samotnou výrobou může ušetřit nemalé náklady jak finanční, tak časové. Přes veškerý pokrok v této oblasti, budou výsledky simulace vždy závislé na vstupních tvarech válců a dalších parametrech, které musí zkonstruovat a určit zkušený technolog.

11 Závěr

V rámci diplomové práce jsem se zabýval moderním postupem navrhování procesu profilování. V úvodní části této práce jsem popsal motivaci k jejímu vzniku a k výzkumu v této oblasti. Hlavním cílem práce se stalo vytvoření moderního postupu navrhování tvarových válců, který bude schopen úspěšně vyhovět stále zpřísňujícím se požadavkům moderní doby.

V teoretické části této práce jsem popsal problematiku tváření, především technologie ohýbání, na které je profilování založeno. V další kapitole jsem se věnoval konstrukci tvářecích strojů s důrazem na stroje, které jsou přímou konkurencí pro profilovací linky. Pro ucelené zpracování problematiky profilování jsem v následující části popsal konstrukci profilovacích linek. Profilovací stroje jsem rozdělil do dvou základních skupin – linky určené pro výrobu otevřených profilů a dále linky určené pro výrobu uzavřených profilů. Pro tyto dvě skupiny jsem popsal komponenty, ze kterých se skládají.

V další části práce jsem stanovil postup navrhování profilací. Postup jsem rozdělil do několika částí, které na sebe logicky navazují při procesu návrhu. Mezi tyto části patří například stanovení počtu pořadí, výpočet rozvinu, tvorba profilovacího a upínacího schématu pro profilační a kalibrační část. Jednotlivé části návrhu jsem popsal a stanovil určitý návod, podle kterého může postupovat technolog při návrhu profilace. V další kapitole jsem se zabýval simulacemi procesu profilování, principu jejich funkce a moderním softwarům, které slouží pro jejich tvorbu.

V experimentální části jsem tento navržený postup využil pro konstrukci dvou profilovacích sekcí, které jsem otestoval ve spolupráci s firmou Attl a spol s.r.o. Továrna na stroje. Za účelem co možná nejširšího otestování, jsem zvolil dvě odlišné profilace. První profilace byla určena k výrobě nesymetrického „U“ profilu z oceli DC04 využívaného v konstrukci užitkového automobilu. V rámci praktické části jsem tuto profilaci navrhl a otestoval na existující výrobní lince. Návrh této profilace jsem vytvořil především za účelem ověření navrženého postupu. Výsledkem byla úspěšná výroba vzorků, díky kterým lze tuto profilaci označit za plně funkční.

V druhé části experimentu jsem navrhl profilaci na uzavřený profil – trubku o průměru 14,6 mm a tloušťce jen 0,1 mm. Výroba takovéto trubky měla probíhat z perspektivní niklové slitiny označované názvem Inconel 625. Výše zmíněný náročný příklad měl především ověřit kvalitu navrženého postupu v extrémních podmínkách. Tato profilace byla v rámci práce navržena, následně v partnerské firmě došlo k výrobě a testování. Po prvních testech jsem optimalizoval 2 parametry. V rámci

optimalizace jsem snížil množství profilovacích pořadí, díky čemuž došlo k úspoře nákladů i času při přestavbě výměnných částí linky. Po této optimalizaci byla profilace schopna vyrobit kvalitní vzorky, které splnily veškeré testy.

V závěru experimentální části jsem vytvořil vstupní data pro simulaci a popsal jsem proces nastavení simulace. Přes precizní nastavení vstupních dat došlo při samotné simulaci opakovaně k neočekávaným chybám. Přestože jsem nemohl zhodnotit samotné výsledky simulace, stanovil jsem postup začlenění do návrhu profilování. V následující činnosti předpokládám větší zaměření na problematiku simulování procesu profilování, při které by byly porovnány výsledky softwarů od různých výrobců.

V rámci diplomové práce byl splněn cíl – návrh moderního postupu procesu profilování. Tento postup jsem ověřil na dvou různých profilacích. Obě tyto profilace jsou v současné době úspěšně dokončeny a určeny pro sériovou výrobu. Na základě zkušeností provedených v experimentu je možné tento postup označit za plně funkční a schopný čelit současným nárokům na proces profilování.

Seznam použité literatury

- [1] HALMOS, George. *Roll Forming Handbook: Manufacturing Engineering and Materials Processing*. Boca Raton: Taylor&Francis Group, 2006. ISBN 9780824795634.
- [2] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [3] Technologie tváření kovů. *Katedra tváření kovů a plastů TUL* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [4] JURČIŠIN, Miroslav. Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM spektrum* [online]. 10.9.2015, 2015(10) [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>
- [5] DVOŘÁK, Milan, Karel NOVOTNÝ a František GAJDOŠ. *Technologie II: plošné a objemové tváření*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
- [6] DVOŘÁK, Milan, Karel NOVOTNÝ a František GAJDOŠ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2340-4.
- [7] NOVOTNÝ, Karel. Výrobní stroje a zařízení: Tvářecí stroje. *Ústav strojírenské technologie VUT v Brně* [online]. 9/2002 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/hvs_vyrobní_stroje_a_zarizeni_novotny.pdf
- [8] ČECHURA, Milan, Jan HLAVÁČ a Jiří STANĚK. Konstrukce tvářecích strojů. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. 2014 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://old.zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Konstrukce-tvarecich-stroju.pdf>
- [9] PEJČOCH, Osvald, Milan ŽÍDEK a Boris SOMMER. *Tváření kovů I: pro 3. roč. SPŠ hutnických*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978

- [10] Výkovky 20 - 900 kg. In: *Žďas* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.zdas.com/cs/produkce/vykovky-20-9-000-kg/>
- [11] *EVRAZ Vítkovice, 3,5 quarto stand* [online]. In: . [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.viktormacha.com/nejnovejsi/evraz-vitkovice-35-quarto-stand-308.html>
- [12] Výroba lisovacího nářadí: Jak se dělá raznice. In: *Škoda* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://skoda-naradovna.cz/cs/lisovaci-naradi/>
- [13] DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. *Technologie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
- [14] In: *Trumpf* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/_processed_/7/a/_csm_Technology-Picture-Bending-machines_0bb59e8f4c.jpg
- [15] Qiu, L., Zhang, S., Wang, Z. et al. *A robust optimization design method for sheet metal roll forming and its application in roll forming circular cross-section pipe*. Int J Adv Manuf Technol 103, 2903–2916 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03773-4>
- [16] *Katalog produktů: Válcovací linky a jejich komponenty* [online]. 2012 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://www.attl.cz/dokumenty/kompletni_katalog-cz.pdf
- [17] *SWAH: Odvíjecí bubny a odvíjecí zařízení* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.swah.cz/profilovaci-linky/odvijeci-bubny-a-odvijeci-zarizeni/>
- [18] *Camu: Laser quality levelling* [online]. 2020 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://camu.it/en/levelling/>
- [19] ALTAN, Taylan a Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming*. USA: ASM International, 2012. ISBN 978-1-615003-844-2.
- [20] Turks head for straightening. In: *WRD* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.wrdtubemill.com/hot-sale-for-tube-making-line-turks-head-for-straightening-next-to-sizing-stands-wan-run-da.html>
- [21] Tube mill components. In: *Olympia 80* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://www.olimpia80.com/?page_id=2262&lang=en

- [22] DREISTERN INC. Racking system manufacturer cuts changeover times, waste on roll forming lines. *The Fabricator: The Tube and Pipe Journal* [online]. 22. 8. 2018 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/rollforming/racking-system-manufacturer-cuts-changeover-times-waste-on-roll-forming-lines>
- [23] SHRIJIT, G. *Setup for High Frequency Induction Welding* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.yourarticlelibrary.com/welding/setup-for-high-frequency-induction-welding-with-diagram-metallurgy/96300>
- [24] *Sheet Metal Forming* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>
- [25] PARALIKAS, J., SALONITIS, K., CHRYSOLOURIS, G. *Investigation of the effect of roll forming pass design on main redundant deformations on profiles from AHSS*. *Int J Adv Manuf Technol* 56, 475 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3208-7>
- [26] KOLLEROVÁ, M. aj. *Valcovanie*. Bratislava: Alfa, 1991. [ISBN 80-05-00729-9](https://doi.org/10.1007/s00170-011-3208-7).
- [27] CHEN, Weiye, Jinamao JIANG a Dayong LI. *Flower pattern and roll positioning design for the cage roll forming process of ERW pipes* [online]. 30. 11 2017 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.007>
- [28] WANGA, Xianjin a D. LINDGREN. *Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.017>.
- [29] SHEN, Xiaohui, Jing LIU, Xianjin WANGA a Chin-Chuan HUANGB. *Development of an applied roll forming pass design expert system based on the shape element idea*. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00831-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00831-8).
- [30] ABEYRATHNA, B., ROLFE, B., HODGSON, P. *et al.* An extension of the flower pattern diagram for roll forming. *Int J Adv Manuf Technol* 83, 1683–1695 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7667-0>
- [31] GROCHE, Peter, Philip BEITER a Michael HENKELMANN. Prediction and inline compensation of springback in roll forming of high and ultra-

- high strength steels. *Production Engineering*. 2008, 2(4), 401-407. DOI: 10.1007/s11740-008-0131-3. ISSN 0944-6524. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11740-008-0131-3>
- [32] LIU, Xiaoli, Jianguo CAO a Xueting CHAI. *Investigation of forming parameters on springback for ultra highstrength steel considering Young's modulus variation in cold rollforming* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.08.001>
- [33] BUI, Q.V. a J.P. PONTHOT. *Numerical simulation of cold roll-forming processes*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2008, Dostupné z: <https://doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.08.073>
- [34] HEISLITZ, Frank, Haydar LIVATYALI, Mustafa A. AHMETOGLU, Gary L. KINZEL a Taylan ALTAN. *Simulation of roll forming process with the 3-D FEM code PAM-STAMP*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1996, Dostupné z: [https://doi:10.1016/0924-0136\(96\)02287-X](https://doi:10.1016/0924-0136(96)02287-X)
- [35] FRODLOVÁ, Barbora, Radek ČADA a Jakub MACHÁLEK. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru Dynaform* [online]. 2012 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2714-8.pdf>
- [36] FABÍK, Richard a Jakub MACHÁLEK. *Modelování tvářecích procesů* [online]. 2013 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_in_zenyrstvi/14_Modelovani_tvarecich_procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf
- [37] *Mesh Adaptation Optimized for Roll Forming by new Advanced Restart Function* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.copra.info/en/fea/advanced-restart>
- [38] *Copra: COPRA RF* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.copra.info/en/crf>
- [39] *Ubeco: Software for Sheet Metal Forming* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.ubeco.com/>
- [40] *Simufact Forming: Simulating Rolling* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/module-rolling.html>

- [41] *ASM Aerospace Specification Materials* [online]. [cit. 2020-07-22].
Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=NINC33>
- [42] *Stainless Steel 316Ti 1.4571* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316ti-14571.html>
- [43] *Spiroflex: Design and manufacturing of metal bellows* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.spiroflex.hr/metal-expansion-joints-bellows>
- [44] *User Guide: Rollforming*. Simufact Forming.
- [45] Cold rolled steel according DIN EN 10130, 10209 and DIN 1623. *ESB* [online]. [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.esb-group.com/en/products-din-en/cold-rolled-steel/>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Průběh deformace v krystalové mřížce materiálu: 1 – nedeformovaný krystal, 2 – vyvolání pružné deformace, 3 – vznik plastické deformace, 4 – trvalá (plastická) deformace po ukončení zatěžování [3].....	12
Obrázek 2 Posun neutrální osy [3]	14
Obrázek 3 Diagram velikosti odpružení K pro jednotlivé materiály [6].....	15
Obrázek 4 Schéma tváření pomocí rotačního pohybu – podélného válcování se znázorněnou napjatostí [9].....	17
Obrázek 5 Stroje pro objemové tváření – hydraulický lis Žďas CKV 1250/1600 (vlevo) a válcovací trať EVRAZ Vítkovice (vpravo) [10, 11].....	18
Obrázek 6 Raznice pro lisování dílu karoserie automobilu [12]	19
Obrázek 7: Postup ohýbání na ohraňovacím lisu (vlevo) a ohraňovací lišta (vpravo) [13, 14]	20
Obrázek 8 Zakružování na tří a čtyř válečkových zakružovačkách [13]	21
Obrázek 9 Funkce rovnicích válců [18].....	24
Obrázek 10 Řez profilovacím stojanem (bez tvarových válců a distančních kroužků)	25
Obrázek 11 Rozložení charakteristické pro výrobu profilů s kruhovým průřezem. A – hlavní profilovací stojan, B – mezistolice (vertikální profilovací stojan).....	26
Obrázek 12 Rovná hlava [20]	27
Obrázek 13 Letmé stříhadlo [22].....	28
Obrázek 14 Horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo) akumulátor.....	29
Obrázek 15 Princip indukčního (High Frequency) svařování [23].....	30
Obrázek 16 Profilování – postupné tvarování pomocí rotačních válců [24]	32
Obrázek 17 Rozdělení profilu na segmenty.....	33
Obrázek 18 Vliv počtu profilovacích pořadí: A) nedostatečný – zvlnění profilu, B) správný, C) zbytečně velký [1].....	34
Obrázek 19 Potřebné veličiny pro výpočet dle úhlu přihýbání [1].....	36
Obrázek 20 Profilovací schéma pro otevřený profil [26].....	37
Obrázek 21 Pozice vertikální roviny a její vliv na pohyb hran [1].....	38
Obrázek 22 Pohyb vybraného elementu v horizontální rovině při profilování – a) bez horizontálního pohybu, b) element v průběhu profilování stoupá [1].....	38
Obrázek 23 Odpružení a přehýbání profilu [1].....	40
Obrázek 24 Rozdělený profil na čtvercovou síť elementů při výpočtu MKP (vpravo adaptovaná síť v průběhu výpočtu) [37].....	43
Obrázek 25 Simulace tuhosti profilovacího pořadí v programu Copra FEA RF [38].....	44
Obrázek 26 Profilovací schéma vytvořené v programu Ubeco [39]	45
Obrázek 27 Simulace profilace v programu Simufact Forming [40]	46
Obrázek 28 Nesymetrický "U" profil	48
Obrázek 29 Tvar jednoho z finálních dílů	49
Obrázek 30 Schéma s vyznačenými hodnotami z tabulky s parametry profilace	50
Obrázek 31 Orientace profilu při válcování.....	50
Obrázek 32 Rozdělený bok profilu na jednotlivé segmenty	51
Obrázek 33 Volba vertikální roviny profilace	53
Obrázek 34 Označení rádiusů při v profilovacím schématu	54
Obrázek 35 Profilovací schéma U-profilu pro 1. a 6. pořadí	55
Obrázek 36 Provedené odlehčení válců v místech s různými průměry v prvním pořadí.....	55
Obrázek 37 Upínací schéma prvního pořadí s vyznačenými úpravami vůči běžnému schématu.....	56
Obrázek 38 Navržené vrtání spodních válců.....	57

Obrázek 39 Upínací schéma 14. pořadí, které obsahuje boční tvarové válce umístěné na vestavbě ...	58
Obrázek 40 Kótování tvarové části válce	59
Obrázek 41 Sestavená profilace přímo na lince (vlevo) a postup sesazení profilovacích válců "na barvu"	61
Obrázek 42 6. pořadí s naformovaným plechem	62
Obrázek 43 Měření profilu pomocí digitálního profil projektoru	63
Obrázek 44 Vlnovec – finální výrobek z tenkostěnných trubek [43].....	66
Obrázek 45 Převíjecí sekce (odvíjecí buben s jednotkou ořezu)	67
Obrázek 46 Možnosti pohybu elementu ve vertikální rovině [19].....	70
Obrázek 47 Schéma profilování krajních ohybů v prvních třech pořadích	72
Obrázek 48 Profilovací schéma pro 4. pořadí	72
Obrázek 49 První pořadí sloužící k naformování krajů pásky s detailním tvarem krajního ohybu.....	74
Obrázek 50 Upínací schéma 4. pořadí se znázorněním upínání ke stolu (vpravo).....	75
Obrázek 51 Uchycení průvlaků ke svařované konstrukci, která je umístěna na stole linky	76
Obrázek 52 Vznik zlomů na hranách pásky mezi průvlakem.....	77
Obrázek 53 Část profilace pro vytvoření krajních ohybů po optimalizaci.....	78
Obrázek 54 Trubka o průměru 14,6 mm před svařovacím průvlakem bez defektů na hranách pásky. 80	
Obrázek 55 Kontura prvního profilovacího pořadí uložená ve formátu dxf.....	81
Obrázek 56 Upravená kontura válců pro import do simulačního programu Simufact Forming, vpravo detail uzavření spáry pro plech	82
Obrázek 57 Stav simulace před jejím selháním.....	84

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1</i> Hodnoty součinitele polohy neutrální osy v závislosti na poměru ohybového rádiusu k tloušťce [3]	14
<i>Tabulka 2</i> Mechanické vlastnosti materiálu DC04 [45]	48
<i>Tabulka 3</i> Tolerance „U“ profilu.....	49
<i>Tabulka 4</i> Základní rozměry profilace	50
<i>Tabulka 5</i> Velikost úhlů ohybových částí pro jednotlivé pořadí "U" profilu	54
<i>Tabulka 6</i> Naměřené rozměry "U" profilu.....	64
<i>Tabulka 7</i> Mechanické vlastnosti vstupního materiálu pro výrobu TR14,6x0,1 [41, 42]	65
<i>Tabulka 8</i> Základní parametry linky pro výrobu TR 14,6x0,1.....	67
<i>Tabulka 9</i> Velikost úhlů a poloměrů ohybu pro jednotlivé pořadí profilace TR14,6x0,1.....	73