



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Úprava konstrukce vertikálního
akumulátoru plechové pásky**

**Adjustment of vertical steel strip
accumulator design**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

David STEHLÍK

Studijní program: N0716A270001 – Dopravní a transportní technika

Studijní obor: N071TTTE – Transportní technika

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

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stehlík** Jméno: **David** Osobní číslo: **474820**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Úprava konstrukce vertikálního akumulátoru plechové pásky

Název diplomové práce anglicky:

Adjustment of vertical steel strip accumulator design

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše existujících typů akumulátorů plechové pásky
2. Popis principu plastické deformace plechové pásky
3. Návrh úpravy konstrukce vertikálního akumulátoru pásky na základě výsledků MKP simulace
4. Konstrukční ověření funkčnosti upraveného modelu akumulátoru

Seznam doporučené literatury:

ČADA, Radek. Technologie I.: Plastická deformace kovů, objemové tváření za studena, tažení plechu, ohýbání. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2009. ISBN 9788024821085.
KLIBER, Jiří. Základy tváření kovů. 3. vydání. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2008. ISBN 9788024817941.
BOLJANOVIC, Vukota. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. 2. vydání. New York: Industrial Press, 2014. ISBN 0831131829.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

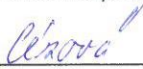
Ing. Eliška Cézová, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS

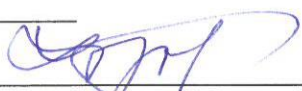
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

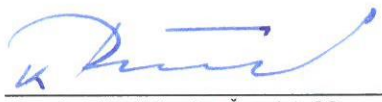
Datum zadání diplomové práce: **05.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____


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


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29. 4. 2022

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem „Úprava konstrukce vertikálního akumulátoru plechové pásky“ vypracoval samostatně s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Elišce Cézové, Ph.D. za vedení této práce, věnovaný čas a cenné připomínky.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	David Stehlík
Název:	Úprava konstrukce vertikálního akumulátoru plechové pásky
Název anglicky:	Adjustment of vertical steel strip accumulator design
Rok:	2022
Studijní program:	N0716A270001 - Dopravní a transportní technika
Studijní obor:	N071TTTE - Transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí práce:	Ing. Eliška Cézová, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 76 Počet obrázků: 49 Počet tabulek: 15
Klíčová slova:	Akumulátor pásky, profilovací linka, výroba trubek, plastická deformace
Keywords:	Strip accumulator, roll forming machine, tube manufacturing, plastic deformation
Abstrakt:	Diplomová práce se zabývá akumulátory plechové pásky jako jedním z prostředků zvyšujících produktivitu profilovacích linek určených k výrobě trubek a profilů. Popisuje a porovnává jednotlivé konstrukční typy akumulátorů s ohledem na parametry linky a zpracovávané pásky. Dále se zabývá problematikou plastické deformace, ke které může docházet při průchodu pásky akumulátorem. Poznatky řešeršní části práce jsou následně použity při výběru akumulátoru vhodného pro aplikaci v konkrétní profilovací lince a úpravě jeho konstrukce, která je obsahem praktické části práce.
Abstract:	The master thesis is focused on steel strip accumulators as one of the means of increasing productivity of roll forming machines used for the production of tubes and profiles. It describes and compares individual design types of accumulators with regard to parameters of machine and processed strip. It also deals with the phenomenon of plastic deformation, which may occur when the strip passes through the accumulator. The findings of the research part are then used for selection of an accumulator suitable for application in a specific roll forming machine and adjustment of its design, which is the content of the practical part of the thesis.

Obsah

1. Úvod	1
2. Součásti profilovací linky	2
2.1. Odvíjecí zařízení	2
2.2. Zařízení nastavení pásky.....	3
2.3. Formovací sekce	4
2.4. Svařovací sekce	5
2.5. Kalibrační sekce	7
2.6. Dělicí zařízení.....	7
2.7. Výběhová sekce.....	8
3. Akumulátor pásky.....	9
3.1. Fáze provozu akumulátoru.....	9
3.1.1. Fáze plnění	10
3.1.2. Fáze naplnění	10
3.1.3. Fáze vyprazdňování	10
3.1.4. Fáze synchronizace.....	11
3.2. Konstrukční typy akumulátorů.....	11
3.2.1. Věžový a jámový akumulátor	11
3.2.2. Horizontální smyčka	12
3.2.3. „Festoon“ akumulátor	12
3.2.4. Smyčkový vertikální akumulátor	13
3.2.5. Klasický horizontální akumulátor	14
3.2.6. Horizontální „free loop“ akumulátor	16
3.2.7. Vertikální „free loop“ akumulátor.....	17
3.2.8. Vertikální G-akumulátor.....	19
4. Plastická deformace	22
4.1. Tahová zkouška	22
4.2. Nahrazení skutečného tahového diagramu	24
4.3. Plasticita při ohybu profilu obdélníkového průřezu.....	25
4.3.1. Rozložení napětí při elastickém ohybu profilu	25
4.3.2. Rozložení napětí při plastickém ohybu profilu.....	26
4.3.3. Stanovení výšky elastického jádra z poloměru ohybu	27
4.4. Mikromechanismy plastické deformace	29
4.4.1. Skluz.....	29
4.4.2. Dvojčatění.....	30
5. Rozbor současného stavu.....	32
5.1. Srovnání konstrukčních typů akumulátorů	32
5.2. Zvýšení produktivity výroby zařazením akumulátoru pásky	34
5.3. Předpokládaná doba návratnosti investice do akumulátoru pásky.....	35
5.4. Výchozí konstrukce akumulátoru.....	38
5.4.1. Průchod pásky výchozí konstrukcí akumulátoru	39
5.4.2. Plastická deformace při průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru	40
6. Úprava konstrukce akumulátoru.....	41

6.1.	Návrh úprav konstrukce za účelem omezení plastické deformace pásky.....	41
6.2.	Návrh úprav konstrukce za účelem zvýšení přípustné šířky pásky na 200 mm	44
6.3.	Ostatní úpravy a vylepšení konstrukce	45
6.4.	Konkrétní úpravy konstrukce akumulátoru	45
6.4.1.	Úpravy v podsestavě rám	45
6.4.2.	Úpravy v podsestavě vnitřní zvon	46
6.4.3.	Úpravy v podsestavě vnější zvon.....	48
6.4.4.	Úpravy v podsestavě šnek.....	49
6.4.5.	Úpravy v podsestavě podávání levé.....	52
6.4.6.	Úpravy v podsestavě napínací kladka levá.....	53
6.4.7.	Úpravy v podsestavě napínací kladka pravá	54
6.4.8.	Úpravy v podsestavě podávání pravé	54
6.4.9.	Úpravy v podsestavě seřizování pásu.....	54
7.	Ověření funkčnosti upravené konstrukce akumulátoru.....	56
7.1.	Ověření použitelnosti upraveného akumulátoru pro pásku o šířce 200 mm	57
7.2.	Ověření konstrukce upraveného akumulátoru z hlediska plastické deformace pásky....	58
8.	Závěr	62
	Seznam použitých zkratk a symbolů	64
	Seznam obrázků	65
	Seznam tabulek	66
	Seznam grafů.....	66
	Bibliografie	67

1. Úvod

Intenzivní konkurenční boj nutí průmyslové firmy k hledání takových řešení, která jim zajistí výhodu v rámci daného trhu. V případě výroby vysoce standardizovaných výrobků je největší konkurenční výhodou pro firmu cena, za kterou je schopna svůj výrobek nabídnout. Touha po snížení výrobních nákladů vede firmy již od nepaměti ke snaze o zefektivnění výroby svých produktů a jedním z nástrojů sloužících ke zvýšení produktivity výroby trubek a profilů v profilovací lince je akumulátor pásky, který je hlavním tématem této práce.

Postupem času se na trhu objevila řada odlišných konstrukčních typů akumulátorů, a proto je prvním účelem práce rešerše v této oblasti. Cílem je zmapovat a popsat principy fungování jednotlivých provedení, jejich výhody a nevýhody a vhodnost jejich použití s ohledem na parametry dané linky a vyráběného produktu.

Všechny existující typy akumulátorů pracují na principu ohybu pásky do prostorově úsporného tvaru. Je známo, že při deformaci materiálů nad určitou mezní hodnotu dochází k nevratným plastickým deformacím. To je v případě akumulátoru nežádoucí jev, protože je třeba, aby si páska po průchodu akumulátorem zachovala co nejvyšší tvařitelnost. Dalším cílem práce je proto rešerše problematiky plastické deformace s důrazem na případ ohybu profilu obdélníkového průřezu. To je případ deformace, ke které dochází během průchodu pásky akumulátorem.

Dále se práce zabývá aplikací zvoleného konstrukčního provedení akumulátoru do konkrétní profilovací linky. Model akumulátoru již v zadávající firmě existuje, byl ale navržen pro linku o jiných parametrech a je proto zapotřebí upravit jeho konstrukci tak, aby byla použitelná pro nově vyvíjenou linku. Jedním z podkladů pro návrh nezbytných konstrukčních úprav je MKP simulace průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru.

Posledním cílem práce je pak konstrukční ověření navržených úprav modelu. To zahrnuje kontrolu kolizí mezi jednotlivými součástmi upraveného akumulátoru, ověření plynulosti trasy průchodu pásky akumulátorem a kontrolu, zda během průchodu pásky nedochází k nadměrné plastické deformaci, která by mohla mít negativní vliv na kvalitu výstupního produktu.

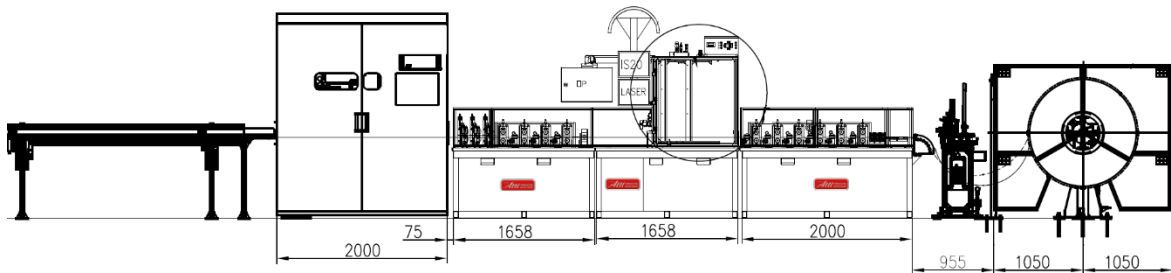
2. Součásti profilovací linky

Profilovací linka je zařízení, které slouží k výrobě trubek a otevřených profilů. Vstupním polotovarem je plechová páska, která je v profilovací lince během několika na sebe navazujících operací formována do požadovaného tvaru, v případě výroby trubek také kontinuálně podélně svařována. Výstupem z profilovací linky je pak otevřený profil nebo trubka požadovaného tvaru.

Profilovací linka může být složena z velkého množství komponentů v závislosti na složitosti výstupního produktu a dalších požadavků na jeho kvalitu. Příklad rozvržení profilovací linky na výrobu nerezových trubek s mezikruhovým průřezem je patrný z následujících obrázků 1 a 2.



Obrázek 1: Příklad rozvržení profilovací linky bez akumulátoru (foto)



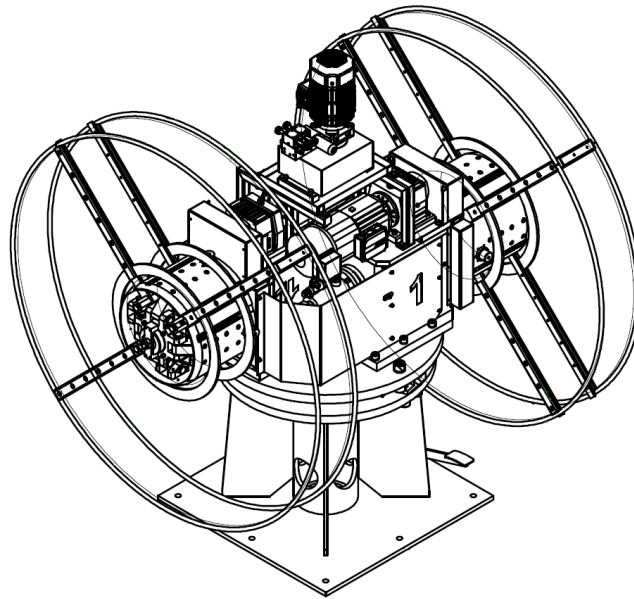
Obrázek 2: Příklad rozvržení profilovací linky bez akumulátoru (výkres) [1]

Pro popis funkce akumulátoru a potřeby jeho zařazení do profilovací linky je vhodné nejprve popsat funkci ostatních komponentů, které dohromady tvoří samotnou profilovací linku.

2.1. Odvíjecí zařízení

Na buben odvíjecího zařízení se umísťuje páska, která je vstupním polotovarem profilovací linky. Páska je na odvíjecím bubnu stočená do svitku, ze kterého se rotací bubnu odvíjí a následně vstupuje do dalších sekcí profilovací linky. [2]

Odvíjecí zařízení může být buď jednostranné, které má pouze jeden odvíjecí buben, nebo dvojitě. Dvojitý odvíjáč má dva samostatné bubny, z nichž jeden je umístěn v ose linky a druhý je posunutý mimo osu. Rotací celého odvíjáku kolem své svislé osy je možné vyměnit polohu prvního a druhého bubnu. To umožňuje obsluze linky nasazovat nový svitek materiálu na odvíjáč za chodu linky, zatímco se páska odvíjí do linky z druhého bubnu odvíjáku. Díky tomu se významně šetří čas na výměnu svitku, během kterého by při použití jednostranného odvíjáku linka nebyla v provozu. Konstrukce dvojitého odvíjecího zařízení je patrná z obrázku 3. [2]



Obrázek 3: Dvojité odvíjecí zařízení [3]

2.2. Zařízení nastavení pásky

Zařízení nastavení pásky slouží ke svaření konce pásky jednoho svitku a začátku pásky následujícího, plného svitku. Jelikož konec pásky může být zdeformovaný, je třeba nejprve konce pásky zastříhnout, následně oba konce pásky upnout a provést příčný svar.

Zařízení nastavení pásky existuje v několika variantách, lišících se zejména stupněm automatizace. V nejjednodušším, manuálním provedení provádí obsluha linky zástřih, upnutí i svaření konců pásky manuálně. V poloautomatickém provedení obsluha linky provádí zástřih a upnutí konců pod svařovací hořák, který je umístěn na pojezdu s motorickým pohonem, samotné svaření konců je automatizované. V plně automatickém provedení obsluha pouze zavede do zařízení začátek pásky nového svitku a zastřížení konců, upnutí i svaření probíhá automaticky. Příklad zařízení nastavení pásky v poloautomatickém provedení je patrný z obrázku 4. [4]

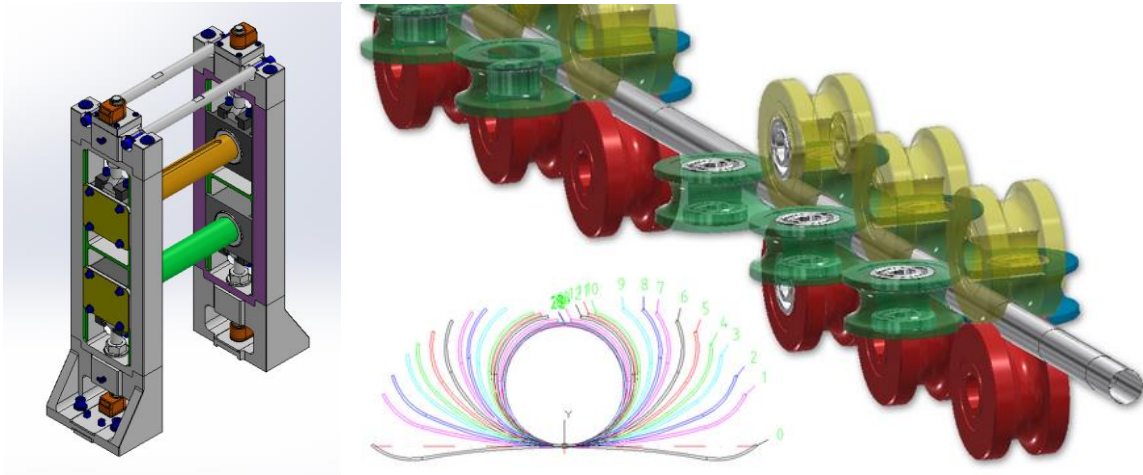


Obrázek 4: Zařízení nastavení pásky (poloautomatické provedení)

2.3. Formovací sekce

Ve formovací sekci se páska postupně formuje do požadovaného průřezu. K formování pásky slouží obvykle dvojice hnaných rolen, umístěných na horní a spodní hřídeli každého formovacího pořadí. Tyto rolny mají mezi sebou mezeru, jejíž tvar určuje deformaci pásky v tomto pořadí. Umístěním několika formovacích pořadí za sebe dochází k postupnému formování profilu z pásky o obdélníkovém průřezu až do požadovaného tvaru. [5] [6]

Kromě hlavních formovacích stojanů, ve kterých jsou osy rolen horizontální, se používají i přídavné vertikální stojany (nazývané mezistolice). Rolny na nich umístěné mají osu rotace vertikální, formují tvar trubky z bočních stran a na rozdíl od hlavních formovacích rolen bývají nehnané. Příklad konstrukce formovacího pořadí a proces návrhu jednotlivých formovacích průchodů při formování trubky s mezikruhovým průřezem je patrný z obrázku 5. [5] [6]



Obrázek 5: Konstrukce formovacího pořadí (vlevo) a návrh tvaru formovacích průchodů (vpravo) [7]

Potřebný počet formovacích pořadí závisí na složitosti požadovaného profilu, tloušťce a šířce pásy a také na zadaných tolerancích výstupního produktu. Tvar běžné trubky mezikruhového průřezu se formuje v 7-8 hlavních pořadích. Navržení jednotlivých formovacích průchodů je pro správné zformování profilu zcela zásadní. Pro návrh tvaru jednotlivých roln se proto často využívají specializované programy, například COPRA RF Software. [7]

Páska se formuje od hran směrem ke středu. V prvních několika pořadích se obvykle formují hrany pásy, při průchodu dalšími pořadími se páska postupně zavírá a vytváří se tak profil požadovaného tvaru. [5]

2.4. Svařovací sekce

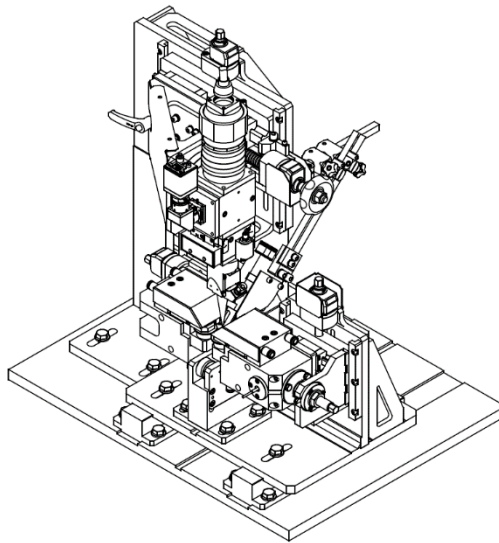
Svařovací sekce se v profilovacích linkách používá, pokud je potřeba vyrábět uzavřený profil (trubku). Svařují se zde kontinuálně hrany pásy k sobě, čímž se profil uzavírá. Metod svařování, které se používají pro kontinuální svařování profilu v linkách, je několik. Mezi nejběžnější patří: [8]

- Vysokofrekvenční (HF) svařování
- Svařování metodou TIG (WIG)
- Laserové svařování

Vysokofrekvenční (HF) svařování se používá zejména pro svařování trubek z běžných uhlíkových ocelí, jeho výhodou je vysoká svařovací rychlost. Laserové a TIG svařování se používá zejména pro svařování nerezových ocelí. Svařování metodou TIG je proti laserovému svařování jednodušší a levnější, nedosahuje ale příliš vysokých rychlostí. S laserovým svařováním se dosahuje obecně vyšších rychlostí a menší tepelně ovlivněné

zóny, laserový generátor ale bývá velmi drahý. Laserové svařování také vyžaduje velmi precizní vedení hran pásky a přesné nastavení jednotlivých svařovacích parametrů. [8]

Konstrukce svařovací sekce závisí na použité metodě svařování, příklad konstrukce pro svařování laserem je na obrázku 6. Pro zabránění oxidace svaru je třeba používat asistenční inertní plyn, nejčastěji argon, který musí být přiváděn do místa svařování vně i uvnitř trubky. Z toho důvodu, a také kvůli ochraně operátora linky proti laserovému záření, musí být celá svařovací sekce uzavřena do svařovacího boxu s odsáváním. [9]



Obrázek 6: Svařovací sekce pro laserové svařování [10]

Na kvalitu svaru bývají často kladeny velmi vysoké nároky, zejména pokud jde o výrobu trubek pro tlakové účely dle normy EN 10217. Z mechanického hlediska je pro dobrou kvalitu svaru zásadní přesné vedení hran pásky tak, aby byla jejich pozice v čase konstantní. V opačném případě může docházet k různým vadám svaru, které mají negativní vliv na jeho pevnost. Kvalita svaru se proto musí důsledně kontrolovat. Rozlišují se zkušební metody destruktivní a nedestruktivní. Destruktivními metodami se zkouší jedna trubka z výrobní dávky, principem zkoušek je normou definované mechanické zatěžování trubky, po kterém nesmí trubka včetně svaru vykazovat žádné trhliny nebo praskliny. Mezi destruktivní zkoušky patří například zkouška tahem prstence, smáčknutím nebo rozšiřováním. Nedestruktivními metodami se obvykle zkouší každá trubka, patří sem například zkouška vířivými proudy, kterými se kontroluje, zda v průřezu trubky, zejména ve svaru, nejsou netěsnosti. Jednotka zkoušení vířivými proudy bývá zapojena přímo do profilovací linky a všechny vyráběné trubky se tak zkouší kontinuálně. [11]

2.5. Kalibrační sekce

Kalibrační sekce se skládá z několika dalších profilovacích pořadí, obvykle shodné konstrukce jako ve formovací sekci, osazených rolnami. V případě výroby trubek s mezikruhovým průřezem dochází v kalibrační sekci ke kalibraci (doladění) tvaru profilu po svaření. Dochází zde již pouze k malým deformacím, k vyrovnání, sjednocení, zpřesnění tvaru profilu. [6]

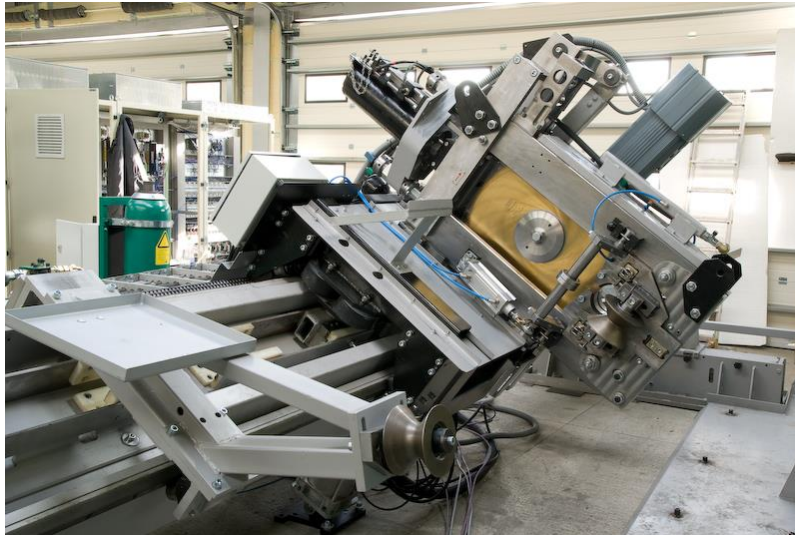
Další možností využití kalibrační sekce je úplná změna průřezu vyráběné trubky. Standardně se tohoto principu využívá při výrobě trubek s obdélníkovým průřezem, tzv. jechlů. Při výrobě těchto profilů se obvykle nejdříve ve formovací sekci zformuje trubka s kruhovým průřezem, která je po svaření v kalibrační sekci upravena na obdélníkový průřez. Díky tomuto principu je možné vyrábět kruhové i obdélníkové trubky s různým poměrem stran pomocí stejné sady rolen ve formovací sekci, čímž se šetří náklady na nástroje i čas na přestavbu linky. [6]

Další součástí kalibrační sekce jsou rovnací hlavy, které slouží k úpravě přímosti vyráběného profilu. Jde obvykle o trojici pořadí, jejichž poloha je nastavitelná ve směru kolmém na osu vyráběného profilu. Úpravou vzájemné polohy 1. a 3. rovnací hlavy proti 2. hlavě vzniká ohybový moment, kterým je možné vyrovnat přímost vyráběného profilu, pokud v předchozích částech linky došlo k jeho zakřivení. [6]

2.6. Dělicí zařízení

Na konci profilovací linky je třeba vyrobenou trubku nadělit na požadovanou délku. Aby se linka nemusela na každý dělicí cyklus zastavovat, používá se princip tzv. letmého dělení. Dělicí jednotka je umístěna na vozíku s pojezdem, jehož rychlost je nezávislá na výrobní rychlosti linky. Při každém dělicím cyklu je nejdříve rychlost vozíku synchronizována s rychlostí vyráběné trubky, aby se zajistila konstantní vzájemná poloha. Následuje samotný dělicí proces, po kterém se vozík vrací zpět do výchozí polohy. Tam čeká, než se vyrobí požadovaná délka trubky a zahájí se další dělicí cyklus. [5]

Metod dělení trubek v profilovacích linkách je několik, používají se jak třískové, tak i beztřískové metody. Mezi obvykle používané konvenční metody patří například dělení kotoučovou nebo pásovou pilou, dvousý odpadový stříh, moderní metodou je pak například orbitální řezání laserem. Příklad jednotky letmého dělení kotoučovou pilou je patrný z obrázku 7. [12]



Obrázek 7: Jednotka letmého dělení kotoučovou pilou [13]

2.7. Výběhová sekce

Po nadělení na požadovanou délku pokračuje profil do tzv. výběhové sekce. V nejjednodušším provedení jde o stůl, ze kterého obsluha linky manuálně odebírá vyrobené profily. Velmi často bývá tento stůl doplněn o třídění zmetkových kusů, například na základě informací z jednotky vířivých proudů, případně dalších kontrolních zařízení, které jsou v lince instalovány. Jde o jednoduchý sklopný mechanismus, který provádí shoz vyhovujících profilů na jednu stranu stolu a shoz zmetkových profilů na stranu opačnou. [13]

Výběhová sekce pak může být doplněna o zařízení pro automatické skládání, balení profilů a manipulaci s nimi, dle požadavku uživatele konkrétní profilovací linky. [13]

3. Akumulátor pásky

Na rozdíl od výše zmíněných částí profilovacích linek, bez kterých by linka nemohla správně fungovat, není akumulátor její nezbytnou součástí. Jeho zařazení do linky ale umožňuje nepřetržitý provoz, což významně zvyšuje produktivitu (výrobnost) linky.

Pokud není v lince instalován akumulátor, musí obsluha ve chvíli, kdy se spotřebuje veškerý materiál z jednoho svitku pásky, linku zastavit. Následně musí provést výměnu svitku na odvíjecím zařízení (případně odvíják otočit, pokud je v lince instalován dvojitý), svitek odpáskovat, zavést novou pásku do zařízení nastavení pásky, zastříhnout konce nové a staré pásky, svařit je k sobě a linku znovu spustit. Tyto operace obsluhy zaberou přibližně 10-20 minut, během kterých linka nemůže být v provozu.

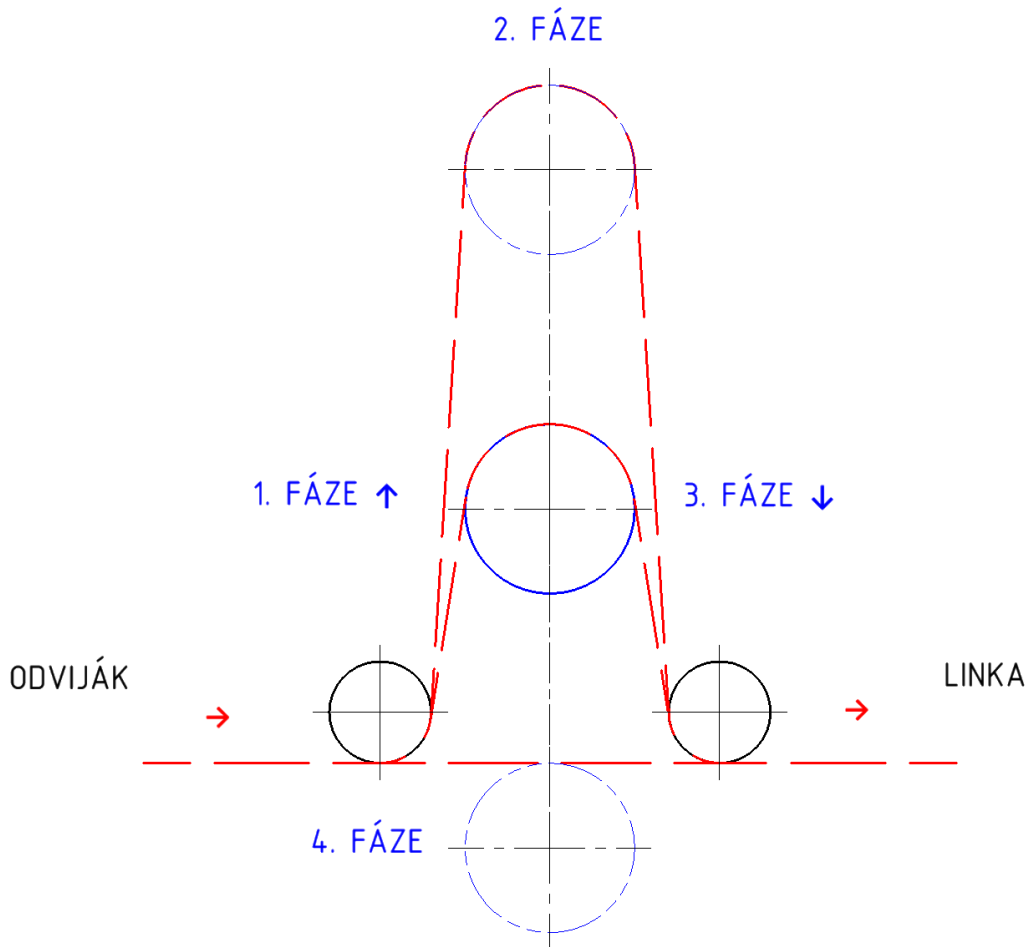
Akumulátor se v rámci profilovací linky umísťuje za zařízení nastavení pásky. Principem je, že akumulátor v tomto místě vytvoří dostatečnou zásobu pásky tak, aby se pokryl čas, který obsluha potřebuje k výměně svitku a svaření konců pásky.

Přestože jde o zařízení s jednoduchým účelem, bývá konstrukce poměrně komplexní a drahá. Je proto nutné zvážit, zda je jeho použití pro každou jednotlivou linku vhodné. Kromě velké počáteční investice totiž akumulátor vyžaduje i precizní a důslednou organizaci práce operátora linky, bez které jeho zapojení do profilovací linky ztrácí smysl.

V průběhu let vzniklo několik variant akumulátorů, které se od sebe konstrukčně poměrně výrazně liší. V dalších kapitolách této práce proto budou představeny principy jednotlivých konstrukčních variant a vhodnost jejich použití s ohledem na parametry pásky a linky, pro kterou jsou určeny.

3.1. Fáze provozu akumulátoru

Provoz každého akumulátoru, bez ohledu na jeho konkrétní konstrukční provedení, se skládá z několika na sebe navazujících a neustále se opakujících fází. Tyto fáze lze nejlépe popsat na nejjednodušší, věžové konstrukci akumulátoru. Jde o jednoduchou kladku, která svým vertikálním pohybem pásku navíjí a tím ji akumuluje. Princip je patrný z obrázku 8.



Obrázek 8: Znárodnění fází provozu akumulátoru (1. fáze – plnění, 2. fáze – naplnění, 3. fáze – vyprazdňování, 4. fáze – synchronizace)

3.1.1. Fáze plnění

Na odvíjáku je nasazený nový svitek a páska se z něj odvíjí přímo do linky. Kladka se v tuto chvíli začne pohybovat směrem vzhůru a akumulátor se začíná plnit. Páska přitom z odvíjáku prochází přes kladku a plynule pokračuje do profilovací linky. V tuto chvíli se páska z odvíjáku odvíjí vyšší rychlostí (obvykle dvoj až trojnásobnou), než je rychlost linky a tím se vytváří zásoba pásky.

3.1.2. Fáze naplnění

Kladka dosáhla své nejvyšší pozice, akumulátor je naplněný. Páska prochází akumulátorem do linky a odvíjí se z odvíjáku rychlostí odpovídající výrobní rychlosti linky.

3.1.3. Fáze vyprazdňování

Ze svitku se odvinul veškerý materiál, odvíják se zastavil. Kladka začíná klesat směrem dolů rychlostí odpovídající výrobní rychlosti linky. Akumulátor se vyprazdňuje, a dokud

kladka neklesne zpátky do své výchozí pozice, má obsluha čas na výměnu svitku a svaření konce původní a začátku nové pásky.

3.1.4. Fáze synchronizace

Kladka klesla do své výchozí pozice, akumulátor je vyprázdněný. Obsluha zatím provedla navaření nové pásky a linka tak začíná plynule odebírat materiál z nového svitku. Rychlost odvíjení pásky z odvíjáku odpovídá rychlosti linky. V tuto chvíli může znovu začít fáze plnění akumulátoru a celý cyklus se tak neustále opakuje.

3.2. Konstrukční typy akumulátorů

Konstrukčních provedení akumulátorů pásky existuje velké množství. Každé z nich má své výhody a nevýhody a je vhodné pro jiné parametry pásky. Základní rozdělení druhů akumulátorů je podle roviny akumulace, a to na vertikální a horizontální. Vertikální akumulátory akumulují pásku v nárysné rovině, která je rovnoběžná se směrem průchodu pásky linkou. Pokud akumulují pásku do spirály (svitku), je osa tohoto svitku vodorovná. Horizontální akumulátory akumulují pásku v půdorysné rovině, ve směru pohledu na linku shora. Všechna existující konstrukční provedení horizontálních akumulátorů akumulují pásku do svitku, jeho osa je vertikální. [14]

Existující konstrukční typy akumulátorů pásky a jejich rozdělení na vertikální a horizontální jsou shrnuty v následujícím seznamu: [14]

- Vertikální akumulátory
 - Věžový akumulátor
 - Jámový akumulátor
 - Horizontální smyčka
 - „Festoon“ akumulátor
 - Smyčkový vertikální akumulátor
 - „Free loop“ vertikální akumulátor
 - G-akumulátor
- Horizontální akumulátory
 - Klasický horizontální akumulátor
 - „Free loop“ horizontální akumulátor

3.2.1. Věžový a jámový akumulátor

Obě tato provedení akumulátoru principem odpovídají popsanému základnímu principu. V případě věžového akumulátoru jde o kladku umístěnou na vertikálním pojezdu.

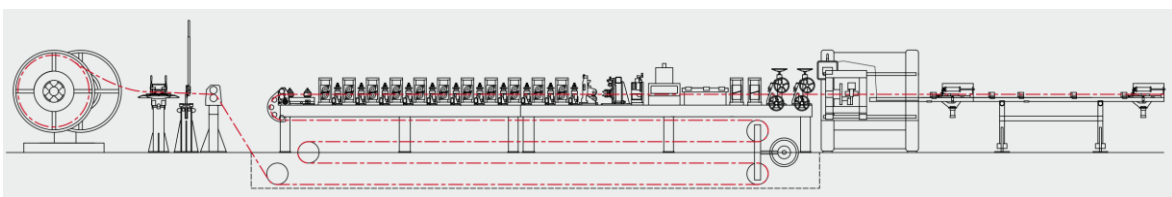
Páska se akumuluje pohybem kladky směrem vzhůru, z výchozí pozice ve výrobní ose linky, až dokud kladka nedosáhne své horní koncové pozice. [14]

V jámovém akumulátoru páska naopak volně visí směrem dolů, jinak je ale princip stejný. Ve výchozí pozici se páska nachází v ose linky a odvíjí se přímo do profilovací linky. Pokud se páska z odvíjáku odvíjí vyšší rychlostí, než ji odebírá profilovací linka, začne se působením gravitační síly prověšovat do jámy. Ve chvíli, kdy tento průvěs dosáhne na dno, je akumulátor naplněný. [14]

Problémem obou těchto konstrukčních provedení je malá kapacita, která je daná výškou věže, případně hloubkou jámy. Pokud by například linka odebírala pásku rychlostí 30 m/min a operace spojené s výměnou pásy by obsluze zabraly 5 minut, byl by potřeba akumulátor o kapacitě 150 m pásy. V tomto případě by tedy bylo zapotřebí vybudovat přibližně 75 m vysokou věž, případně stejně hlubokou jámu. Z tohoto důvodu jsou věžové a jámové akumulátory v praxi použitelné pouze pro nejpomalejší linky s rychlostí jednotek metrů za minutu. [14]

3.2.2. Horizontální smyčka

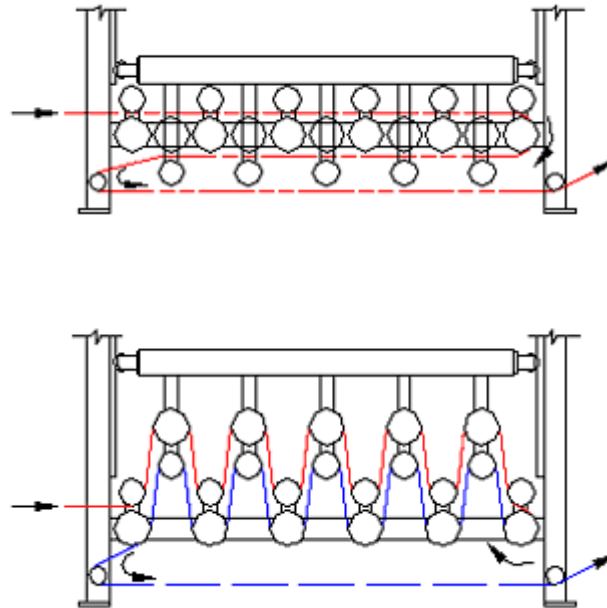
Tento akumulátor pracuje na stejném principu jako věžový akumulátor, pouze místo akumulace ve vertikálním směru akumuluje ve směru horizontálním. Díky tomu lze akumulátor umístit například pod profilovací linku. Díky tomuto řešení odpadá nutnost výstavby nereálně vysoké věže, kapacita akumulátoru je ale stále poměrně nízká, takže tato konstrukce také není vhodná pro rychlejší linky. Příklad linky s horizontální smyčkou je patrný z obrázku 9. [5]



Obrázek 9: Profilovací linka s akumulátorem typu horizontální smyčka [13]

3.2.3. „Festoon“ akumulátor

„Festoon“ akumulátor je svým principem také podobný věžovému akumulátoru. Místo jedné kladky ale používá systém mnoha kladek za sebou. Spodní kladky bývají stacionární, horní kladky bývají uchyceny ke společnému nosníku, který svým pohybem vzhůru pásku navíjí do sítě. Počet kladek a konstrukční provedení závisí na požadované kapacitě, používá se například systém s dvojitými kladkami, který pohybem nosníku pásku akumuluje jedním pohybem ve dvou rovinách zároveň. Tím se šetří zástavbová plocha akumulátoru. Příklad principu takového akumulátoru je patrný z obrázku 10. [15]



Obrázek 10: Princip „festoon“ akumulátoru [15]

Výhodou „festoon“ akumulátoru je jeho relativní konstrukční jednoduchost, a tedy i nižší pořizovací cena v porovnání s akumulátory popsány dále. Problémem jsou ale malé průměry kladek, a tedy i malé poloměry ohybu pásky, pokud chceme zachovat rozumnou zástavbovou plochu akumulátoru. To může v případě větší tloušťky pásky vést k problémům s plastickou deformací pásky při jejím průchodu akumulátorem. Princip „festoon“ akumulátoru se standardně používá například pro tkaniny, kterým malé poloměry ohybu nevadí. V profilovacích linkách je jeho použití vhodné pouze pro pásku s velmi nízkou tloušťkou stěny (maximálně cca 0,5 mm). [14] [15]

3.2.4. Smyčkový vertikální akumulátor

Smyčkový vertikální akumulátor se skládá ze dvou širokých válců se zářezy pro vedení pásky. Páska z odvíjáku je do akumulátoru přivedena na jedné straně válce, následuje několik smyček přes horní a spodní válec a z druhé strany je páska vedena do linky. Pohybem horního válce směrem vzhůru se podobně jako u věžového akumulátoru vytváří zásoba pásky. [14]

Smyčkový vertikální akumulátor je vhodný pro pásku s nízkou tloušťkou i šířkou stěny. Poskytuje sice vyšší zásobu pásky než věžový či jámový akumulátor, ale v porovnání s akumulátory popsány dále je jeho kapacita stále poměrně nízká. [16]



Obrázek 11: Smyčkový vertikální akumulátor [16]

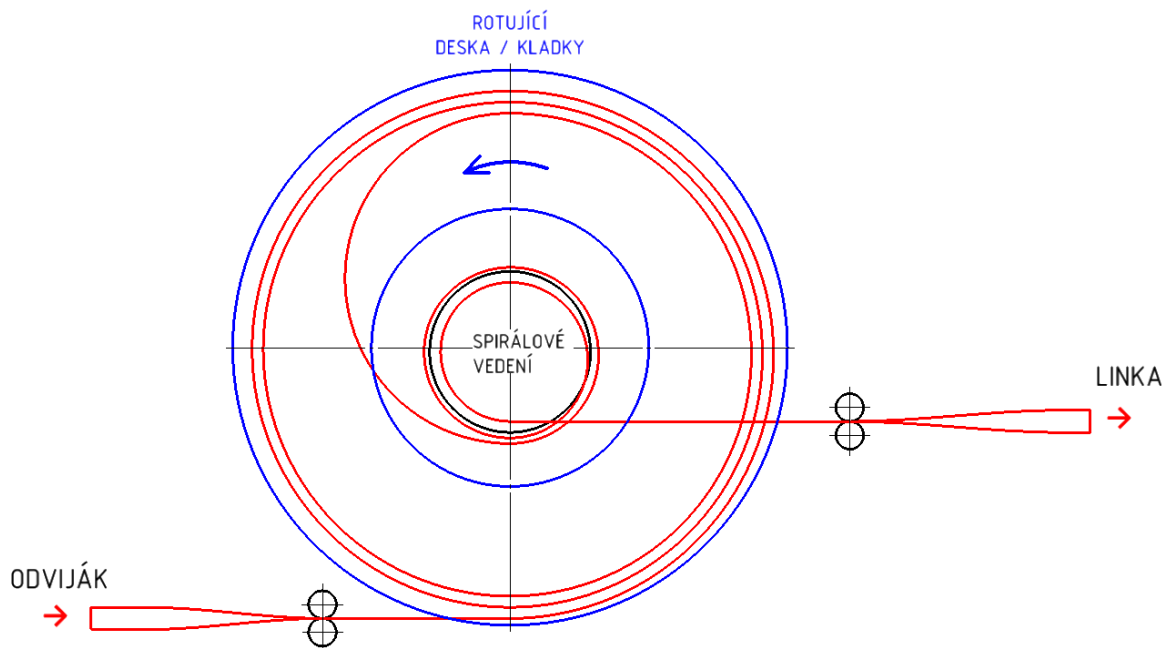
3.2.5. Klasický horizontální akumulátor

Pro akumulaci pásky v horizontálním akumulátoru je nejprve třeba provést její příčnou rotaci o 90 stupňů. Následně je páska do akumulátoru vedena pomocí hnacích rolen, umístěných na vstupu do akumulátoru. [14]

Svitok pásky je umístěn na rotující desce, na kterou je páska doplňována z vnější strany poháněnými kladkami. Rotující deska může být nahrazena rolnami, které pásku podepírají a pohánějí. Z vnitřní strany svitku se páska průběžně odebírá a přesouvá se směrem ke středu akumulátoru, kde je spirálovitě vedena směrem vzhůru a opouští akumulátor. Následně je páska znovu otočena o 90 stupňů do horizontální roviny a pokračuje do profilovací linky. Příklad konstrukce horizontálního akumulátoru je patrný z obrázku 12. Pro lepší představu o jeho principu je na obrázku 13 znázorněn průchod pásky tímto akumulátorem. [14]



Obrázek 12: Klasický horizontální akumulátor [17]



Obrázek 13: Princip horizontálního akumulátoru (pohled shora)

Pokud je horizontální akumulátor ve fázi plnění, otáčí se deska se svitkem větší obvodovou rychlostí, než je páska ze stolu z vnitřní strany odebírána a akumulátor se tak plní. Ve fázi naplnění se deska otáčí rychlostí, která odpovídá rychlosti odebírání páska linkou. Páska tak prochází akumulátorem od odvíjáku do linky, ale zásoba páska v akumulátoru se nemění. Ve fázi vyprazdňování se deska zastaví, páska není doplňována a je pouze z vnitřní strany odebírána. Ve fázi synchronizace se deska otáčí rychlostí odpovídající rychlosti linky. Pokud je rychlost zvýšena, akumulátor se začíná opět plnit. [14]

Horizontální akumulátory klasické konstrukce jsou vhodné zejména pro pásy o velké tloušťce stěny, nedochází zde k ohybu pásy v příliš malých rádiusech. Jeho konstrukce je v porovnání s dále popisovanými akumulátory jednodušší, a tedy i levnější. Jsou s ním ale spojeny i nezanedbatelné nevýhody. První z nich je poměrně významná zástavbová plocha samotného zařízení, ke které je navíc nutné připočíst místo potřebné k rotaci pásy o 90° na vstupu i výstupu do a z akumulátoru. To může být pro potenciální uživatele linky zásadní problém, protože se linky obvykle instalují do existujících výrobních hal a maximální délka linky bývá omezená. Někdy se tento problém řeší zahnutím linky do tvaru „L“, právě v místě, kde se horizontální akumulátor nachází. Díky tomu, že je zde páska otočena do vertikální roviny, je možné vstup a výstup akumulátoru proti sobě otočit do libovolného úhlu. [16]

Dalším problémem je, že je zde páska vedena po své hraně, což může vést k její deformaci. Hrana pásy navíc bývá ostrá, působí proto abrazivně na součásti akumulátoru, které jsou s ní ve styku. Prvotním problémem je zvýšené opotřebování těchto součástí, druhotným problémem je to, že oddělené částice ulpívají na hraně pásy. Kvalita a čistota hran pásy je přitom zásadní pro správný svařovací proces. [14]

Posledním problémem je pak to, že zde může docházet ke tření ploch mezi jednotlivými vrstvami navinuté pásy. Pokud páska není dokonale čistá, může zde dojít k jejímu poškrábání. [14]

3.2.6. Horizontální „free loop“ akumulátor

Poslední zmíněný problém klasického horizontálního akumulátoru řeší takzvaná „free loop“ varianta. Páska je zde akumulována do dvou samostatných svitků – vnějšího, který se otáčí jedním směrem, a vnitřního, který se otáčí opačným směrem. Z vnitřní strany vnějšího svitku na vnější stranu vnitřního svitku je páska převedena smyčkou, která se volně pohybuje po akumulátoru v závislosti na poměru vzájemné rychlosti mezi vnějším a vnitřním svitkem. Konstrukce „free loop“ horizontálního akumulátoru je patrná z obrázku 14, na obrázku 15 je znázorněn princip tohoto akumulátoru. [18]

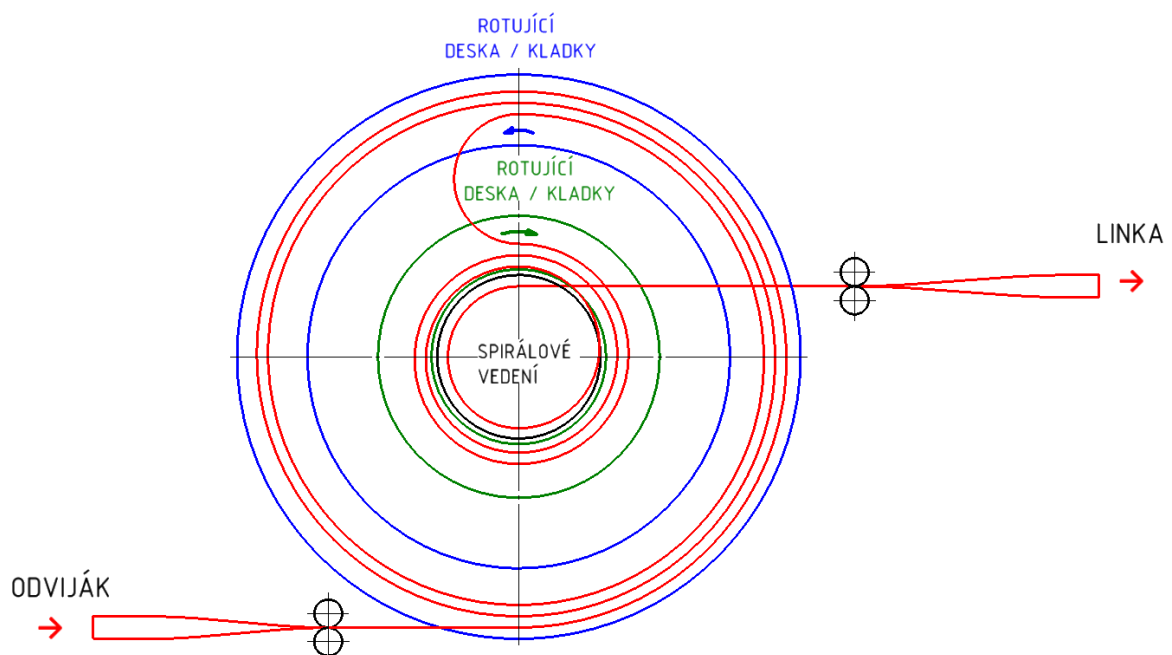
Vnitřní svitek rotuje konstantní rychlostí odpovídající rychlosti, kterou linka odebírá pásku. Rychlost vnějšího svitku pak závisí na fázi, ve které se akumulátor nachází. Ve fázi plnění se otáčí přibližně 2-3x větší obvodovou rychlostí než vnitřní svitek, ve fázi synchronizace a naplnění se otáčí stejnou obvodovou rychlostí, ve fázi vyprazdňování má rychlost nulovou. [18]

Tato konstrukce omezuje problém klasické konstrukce s třením mezi jednotlivými vrstvami pásy ve svitku, ostatní nevýhody ale zůstávají stejné (vedení pásy po její hraně,

relativně velká zástavbová plocha). Navíc ve smyčce mezi vnějším a vnitřním svitkem dochází k poměrně malému rádiusu ohybu pásky, proto je tato konstrukce vhodná pouze pro pásku s menší tloušťkou stěny. [16]



Obrázek 14: Horizontální „free loop“ akumulátor [17]



Obrázek 15: Princip horizontálního „free loop“ akumulátoru (pohled shora)

3.2.7. Vertikální „free loop“ akumulátor

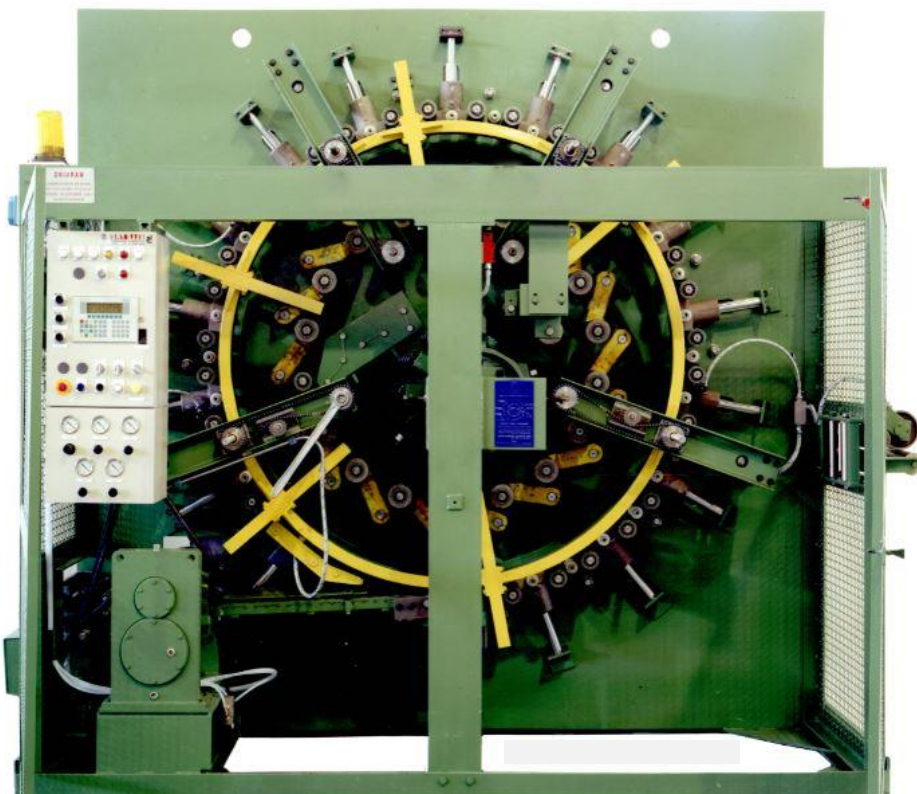
Vertikální „free loop“ akumulátor pracuje na stejném principu jako horizontální, ale akumuluje pásku ve vertikální rovině. Díky tomu se ušetří místo v lince potřebné na rotaci pásky o 90° na vstupu a výstupu akumulátoru. Stejně jako u horizontálního akumulátoru je

páska na vstupu do akumulátoru poháněna dvojicí hnacích roln. Následně je vedena na vnější stranu vnějšího svitku, který se tvoří na vnitřní straně kladkové dráhy (na obrázku 17 označena modře). [19]

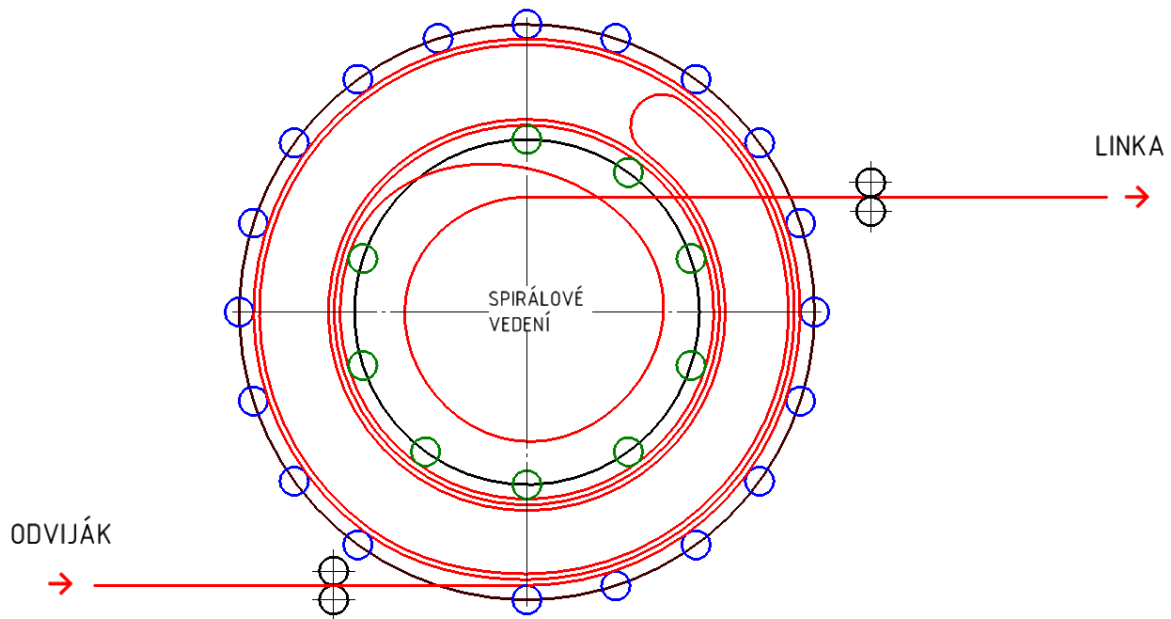
Jelikož se páska akumuluje ve vertikální rovině, působí na svitek gravitační síla. Pro zamezení zborcení vnějšího svitku je třeba používat ještě stranové rolny, umístěné po celém obvodu svitku z levé i pravé strany svitku. Tyto rolny mezi sebou svitek přidržují a zamezují tak jeho zborcení. [19]

S tím, jak je postupně páska na vnější svitek doplňována, narůstá průměr vnějšího svitku. Zároveň je ale žádoucí, aby si každá navinutá vrstva zachovávala svou polohu v rámci svitku. V opačném případě by docházelo mezi jednotlivými vrstvami ke tření a hrozilo by riziko poškrábání pásky. Z toho důvodu je ještě vhodné zajistit, aby se vnější kladková dráha postupně rozvírala s tím, jak se zvětšuje průměr vnějšího svitku. Stejně tak je vhodné, aby se vnitřní kladková dráha (na obrázku 17 zeleně) rozvírala s tím, jak je z ní páska postupně odebírána do linky. [18]

Z popsaného principu vyplývá, že konstrukce vertikálního „free loop“ akumulátoru (obrázek 16) je velmi komplexní. Zařazení tohoto typu akumulátoru do profilovací linky je tak spojeno nejen s vysokými náklady na pořízení, ale i na údržbu. [14]



Obrázek 16: Konstrukce vertikálního „free loop“ akumulátoru [20]



Obrázek 17: Princip vertikálního „free loop“ akumulátoru (pohled zepředu)

3.2.8. Vertikální G-akumulátor

Vertikální G-akumulátor je jednodušší variantou vertikálního „free loop“ akumulátoru. Také akumuluje pásku do vnitřního a vnějšího svitku, vnější svitek se ale navíjí z vnější strany kladkové dráhy, která je umístěna na obvodovém kole s pohonem. Páska není do akumulátoru doplňována primárně hnacími rolnami na vstupu, ale rotací celého obvodového kola. [14]

Mezi vnějším a vnitřním svitekem je páska převedena smyčkou, která na rozdíl od „free loop“ akumulátoru není volná, ale je vedená přídatným válcem pevně uchyceným k vnějšímu obvodovému kolu. Konstrukce G-akumulátoru je patrná z obrázku 18. [14]

Vnitřní svitek se pak navíjí na nepoháněnou kladkovou dráhu. Páska po ní prokluzuje a zároveň je na ni navíjena nebo z ní odvíjena smyčkovým válcem. Následně páska podobně jako u „free loop“ akumulátoru pokračuje přes spirálovou dráhu ven z akumulátoru a dál do linky. Princip je patrný z obrázku 19. [14]

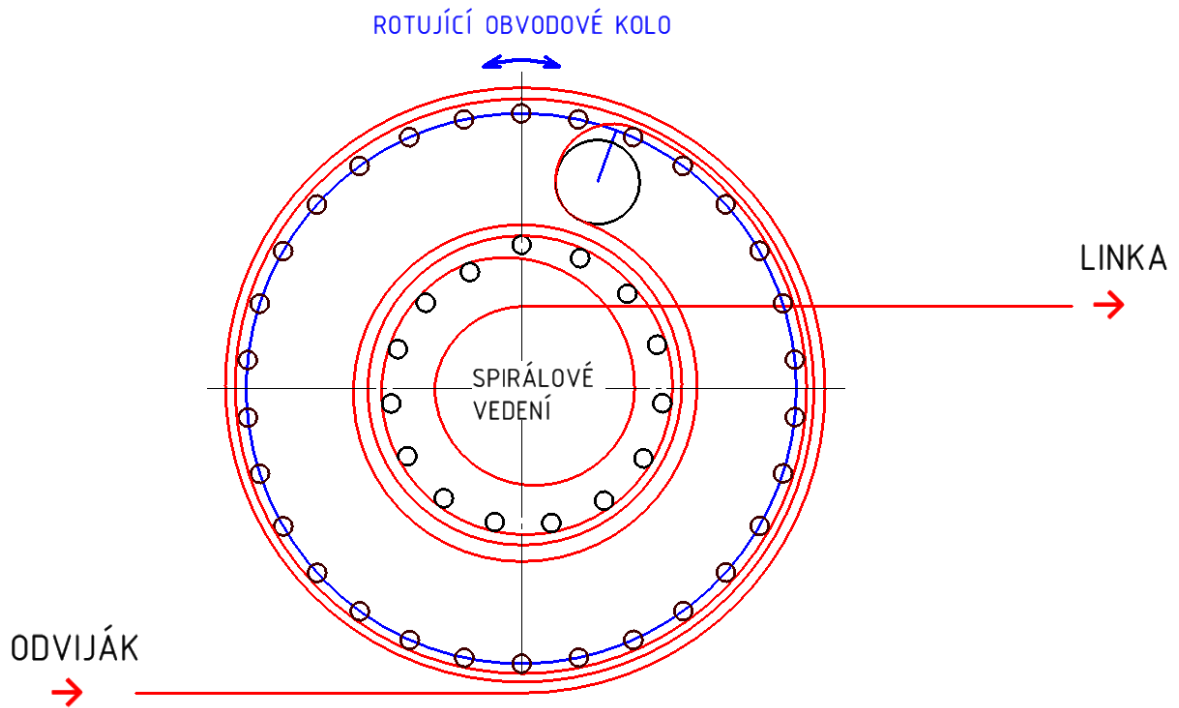
Ve fázi plnění se obvodové kolo otáčí proti směru hodinových ručiček, tím se páska navíjí na vnitřní i vnější svitek zároveň. Ve fázi naplnění a synchronizace obvodové kolo stojí, páska přes něj pouze prokluzuje. Ve fázi vyprazdňování se obvodové kolo otáčí po směru hodinových ručiček, a tak pásku odvíjí zároveň z vnějšího i vnitřního svitku.

Jelikož navíjení pásky do vnějšího svitku probíhá rotací obvodového kola, nejsou u této konstrukce nezbytné poháněné rolly, které by pásku do akumulátoru doplňovaly. To je výhodné zejména pro pásky s nízkou tloušťkou stěny, které nemají dostatečnou tuhost na to, aby se daly do akumulátoru tlačit. [21]

Stejně jako „free loop“ akumulátor potřebuje G-akumulátor poměrně malou zástavbovou plochu a má vysokou kapacitu. Navíc není potřeba provádět dvojitou rotaci pásky o 90°, což dále omezuje délku, kterou je potřeba pro akumulátor vyhradit. Navíc je zde páska vedena po ploše, na rozdíl od horizontálních akumulátorů, ve kterých je páska vedena po hraně. Tím je omezeno riziko poškození hrany pásky, což je zásadní pro správný svařovací proces, zejména u laserového svařování. [21]



Obrázek 18: Konstrukce vertikálního G-akumulátoru [22]



Obrázek 19: Princip vertikálního G-akumulátoru (pohled zepředu)

4. Plastická deformace

Plastická deformace je jev, který se může vyskytnout při působení na těleso vnějším zatížením (silou, momentem, spojitým zatížením). Pro znázornění okamžiku, kdy v zatěžovaném tělese dojde k plastické deformaci, dobře slouží diagram klasické tahové zkoušky.

4.1. Tahová zkouška

Tahová zkouška spočívá v zatěžování zkušebního tělesa, nejčastěji kruhového průřezu, osovou silou. Těleso se zatěžuje předepsanou rychlostí, obvykle až do okamžiku, kdy dojde k lomu vzorku. [23]

Během zkoušky se měří závislost deformace tělesa na zatěžovací síle. Jelikož dochází k zatěžování tělesa pouze osovou silou, jedná se o jednoosou napjatost a napětí σ ve vzorku lze vypočítat dle jednoduchého vztahu (4. 1). [23] [24]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4. 1)$$

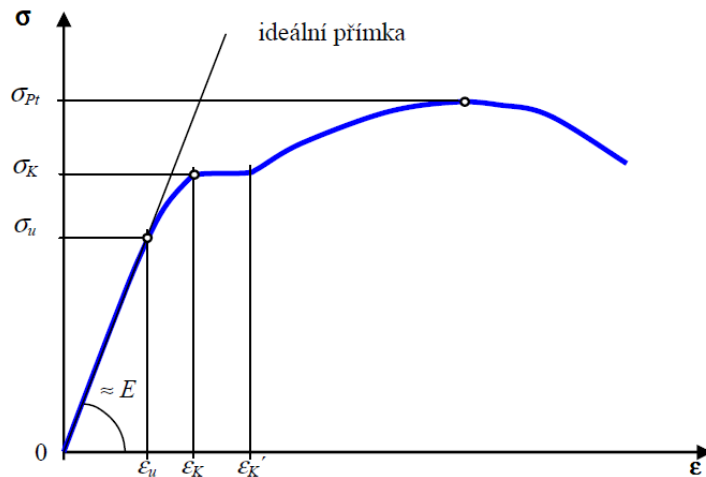
F je aktuální zatěžovací síla a S je plocha průřezu vzorku. Zde je nutné vzít v potaz, že průřez vzorku se s narůstající zatěžovací silou mění. Z toho důvodu se rozlišuje napětí skutečné, které uvažuje skutečný průřez vzorku v dané chvíli, a napětí smluvní, které uvažuje po celou dobu zatěžování původní průřez vzorku S_0 . Dokud zatěžovaný materiál nedosáhne meze pevnosti, nejsou rozdíly mezi skutečným a smluvním napětím velké. [23]

Dále lze spočítat poměrnou deformaci ε zatěžovaného vzorku dle vztahu (4. 2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4. 2)$$

ΔL je absolutní prodloužení zkoušeného vzorku z původní délky L_0 na aktuální délku L . [23]

Vynesením vztahu poměrné deformace ε a napětí σ (při uvažování původního průřezu vzorku S_0) lze vyjádřit tzv. smluvní tahový diagram. Příklad tahového diagramu běžné uhlíkové oceli je patrný z obrázku 20. [23] [25]



Obrázek 20: Tahový diagram běžné uhlíkové oceli [25]

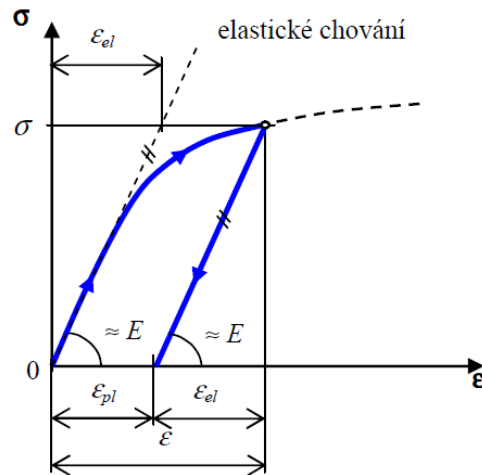
Dokud je napětí v zatěžovaném vzorku menší než napětí na mezi úměrnosti σ_u , je vztah napětí a deformace lineární. Platí zde známý Hookův zákon, který vyjadřuje rovnice (4. 3), kde E je Youngův modul pružnosti. [24]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4. 3)$$

Pokud je těleso zatěžováno do této meze, jde o deformaci vratnou, těleso se po odlehčení vrací do své původní délky. Tato deformace se nazývá elastická. Při zvyšování napětí nad mez úměrnosti σ_u , a ještě významněji při překročení meze kluzu σ_K , přestává být vztah napětí a deformace lineární – křivka vztahu napětí a deformace se odchyluje od původní přímky. Již se nejedná o deformaci vratnou, těleso se po odlehčení nevrátí do původního tvaru. V tuto chvíli již dochází k plastické (nevratné, trvalé) deformaci zkoušeného tělesa. [25]

Těleso si ale zachovává částečné elastické vlastnosti i v plastické oblasti diagramu. Je zde proto nutné odlišit deformaci elastickou (vratnou) a deformaci plastickou (trvalou). Toto rozlišení je patrné z obrázku 21. Odlehčení vzorku v plastické oblasti probíhá po přímce, která má stejnou směrnici jako přímka elastického chování tohoto vzorku. Díky tomu lze vyjádřit plastickou deformaci vzorku jako rozdíl skutečné deformace vzorku ε při daném napětí σ a elastické deformace ε_{el} , která by teoreticky tomuto napětí odpovídala, pokud by chování materiálu až do této hodnoty napětí bylo elastické (vztah (4. 4)). [25]

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \varepsilon_{el} \quad (4. 4)$$



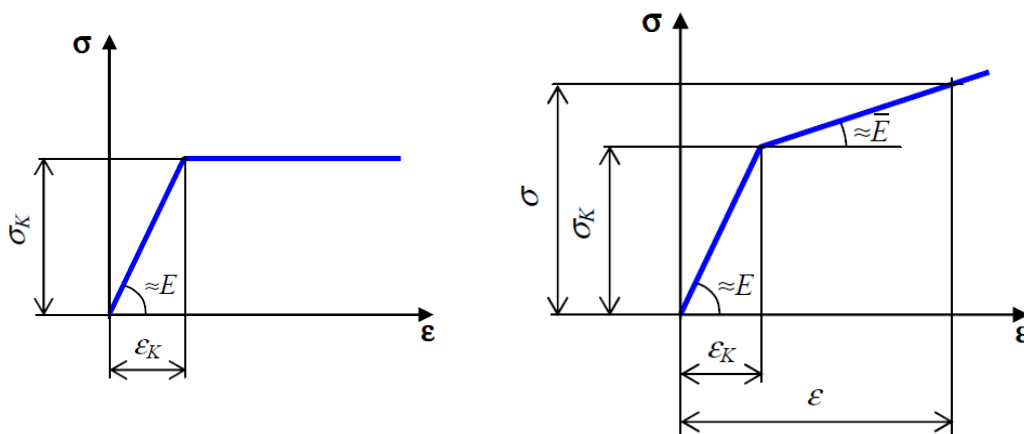
Obrázek 21: Plastická a elastická složka deformace [25]

Analogický princip je možné aplikovat i na případ namáhání tělesa krutem a ohybem.

4.2. Nahrazení skutečného tahového diagramu

Popsat celý tahový diagram funkcí je velmi složité. V praxi ale velmi často není nutné popsat celý diagram, protože se předpokládají pouze malé deformace, v oblasti blízko meze kluzu zkoušeného materiálu. V takovém případě je možné nahradit tahový diagram lomenou čarou. Rozlišují se dva základní elasto-plastické modely – ideální (bez zpevnění) a s lineárním zpevněním. [25]

Ideální model předpokládá, že po dosažení meze kluzu již materiál není schopen přenášet další zatížení, napětí se proto dále nemění, zůstává rovné mezi kluzu. Model se zpevněním bere v potaz, že po překonání meze kluzu dochází v souvislosti s plastickou deformací ke zpevnění materiálu. Předpokladem je, že zpevnění je lineární, ale s méně strmou směrnicí \bar{E} , než je modul pružnosti E v elastické oblasti. Náhrada tahových diagramů pro oba modely je patrná z obrázku 22. [25]



Obrázek 22: Tahový diagram pro ideální model (vlevo) a model s lineárním zpevněním (vpravo) [25]

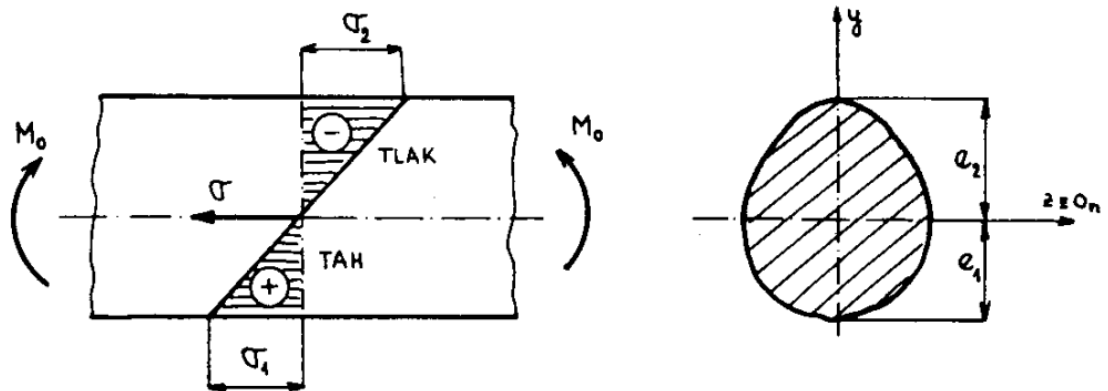
4.3. Plasticita při ohybu profilu obdélníkového průřezu

Při řešení plasticity při ohybu profilu je vhodné vyjít z rozložení ohybových napětí v průřezu profilu v elastickém stavu.

4.3.1. Rozložení napětí při elastickém ohybu profilu

Uvažuje se takzvaný prostý ohyb, tedy případ, kdy je profil zatížen pouze ohybovým momentem M_0 , bez uvažování vlivu posouvající síly T . Pokud jsou ohýbaným profilem vedena pomyslná podélná vlákna, tak je zřejmé, že část vláken se vlivem ohybu zkrátí (vlákna umístěna od neutrální osy směrem ke středu ohybu) a část se prodlouží (vlákna umístěna od neutrální osy směrem od středu ohybu). Vlákno umístěné v neutrální ose si zachová svou původní délku. [24]

Protože je uvažován pouze vliv ohybového momentu, jedná se o jednoosou napjatost, a platí zde Hookův zákon. V místě, kde došlo ke zkrácení vláken, bude docházet k tlakovému napětí a v místě, kde došlo k prodloužení vláken, bude docházet k tahovému napětí. Absolutní velikost napětí přitom bude přímo úměrná vzdálenosti od neutrální osy. Rozložení napětí v profilu namáhaném ohybovým momentem M_0 je patrné z obrázku 23. [24]



Obrázek 23: Rozložení ohybového napětí v profilu namáhaném ohybovým momentem [24]

Je patrné, že absolutní hodnota největšího ohybového napětí bude v místě nejvzdálenějším od polohy neutrální osy. Velikost takového napětí σ_{max} lze zapsat dle rovnice (4.5). [24]

$$|\sigma_{max}| = \frac{M_0}{\frac{J_z}{|e|}} = \frac{M_0}{W_0} \quad (4.5)$$

J_z je kvadratický moment průřezu k ose z , a e je maximální vzdálenost od neutrální osy. W_o se pak nazývá průřezový modul v ohybu. [24]

Dále se vychází ze skutečnosti, že profil namáhaný na ohyb nepřenáší žádnou osovou sílu. V takovém případě bude neutrální osa profilu procházet těžištěm průřezu. Pro profil o obdélníkovém průřezu bude tedy platit vztah (4. 6). [24]

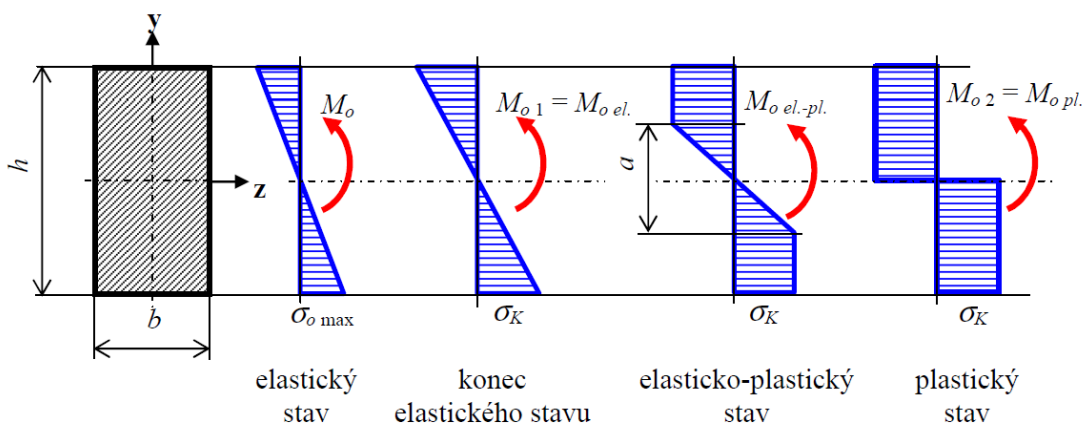
$$e = \frac{h}{2} \quad (4. 6)$$

A po dosazení bude pro průřezový modul v ohybu platit vztah (4. 7). [24]

$$W_o = \frac{J_z}{e} = \frac{J_z}{\frac{h}{2}} = \frac{\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3}{\frac{h}{2}} = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \quad (4. 7)$$

4.3.2. Rozložení napětí při plastickém ohybu profilu

Dokud bude maximální ohybové napětí v profilu menší než mez kluzu σ_k daného materiálu, bude rozložení napětí v profilu odpovídat obrázku 23. Při překročení této meze začnou místa nejvzdálenější od neutrální osy plastizovat. Vznikne tak plastický obal, ve kterém bude přenášené napětí rovné mezi kluzu σ_k (pokud je uvažován ideální model bez plastického zpevnění), a elastické jádro o výšce a , ve kterém se bude velikost napětí řídit Hookovým zákonem. Přejchod z elastického do plasticko-elastického a plně plastického stavu je patrný z obrázku 24. [25]



Obrázek 24: Přejchod z elastického do plasticko-elastického a plně plastického stavu [25]

Kritický ohybový moment, který způsobí přechod ohýbaného průřezu z elastického do elasto-plastického stavu, lze vyjádřit vztahem (4. 8). [26]

$$M_{O\ kr} = \sigma_k \cdot W_O = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (4. 8)$$

Při překročení této meze je celkový moment přenášený průřezem $M_{O\ el-pl}$ dán jako součet momentu přenášeného elastickým jádrem $M_{O\ el}$ a momentu přenášeného plastickým obalem $M_{O\ pl}$, dle vztahu (4. 9). [25]

$$M_{O\ el-pl} = M_{O\ el} + M_{O\ pl} \quad (4. 9)$$

Přitom pro $M_{O\ el}$ platí vztah (4. 10), kde b je šířka profilu a a je výška elastického jádra. [25]

$$M_{O\ el} = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot a^2}{6} \quad (4. 10)$$

$M_{O\ pl}$ lze zjistit integrací přes zplastizovanou oblast, dle vztahu (4. 11). [25]

$$M_{O\ pl} = 2 \cdot \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{h}{2}} y \cdot \sigma_k \cdot b \, dy = \sigma_k \cdot \frac{b}{4} \cdot (h^2 - a^2) \quad (4. 11)$$

Celkový elastoplastický moment $M_{O\ el-pl}$ lze tedy vyjádřit vztahem (4. 12). [25]

$$M_{O\ el-pl} = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot a^2}{6} + \sigma_k \cdot \frac{b}{4} \cdot (h^2 - a^2) = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot h^2}{4} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right] \quad (4. 12)$$

Z toho vyplývá vztah (4. 13) pro elastoplastický modul průřezu v ohybu. [25]

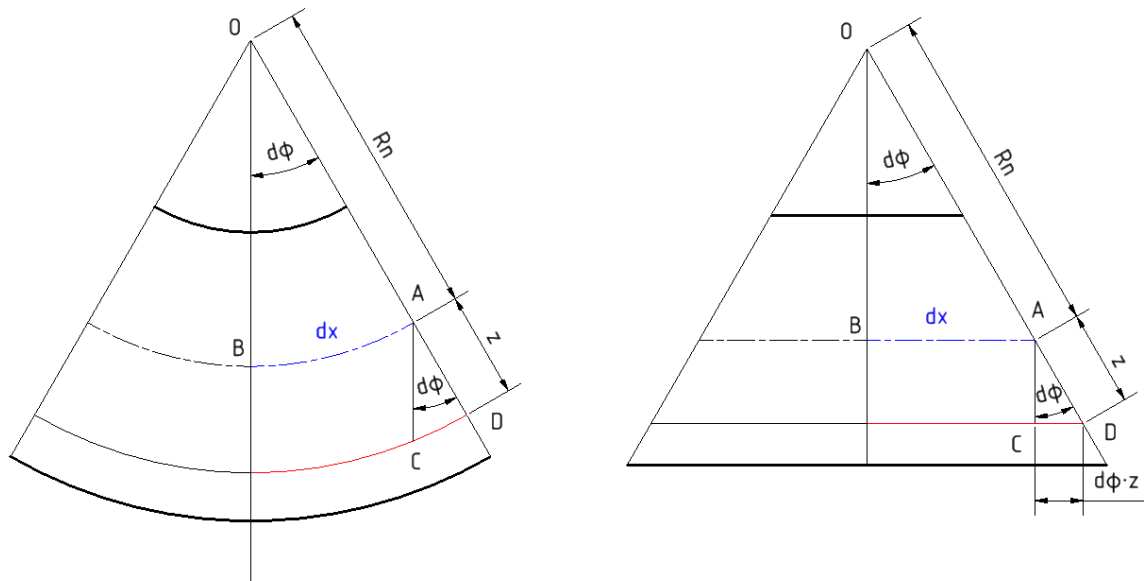
$$W_{O\ el-pl} = \frac{b \cdot h^2}{4} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right] \quad (4. 13)$$

Kde h je výška profilu, b je šířka profilu a a je výška elastického jádra. Pomocí tohoto vzorce je možné popsat kromě elastoplastického i čistě elastický stav ($a=h$) a i čistě plastický stav ($a=0$). [25]

4.3.3. Stanovení výšky elastického jádra z poloměru ohybu

Pro popis výšky elastického jádra je třeba nejdříve popsat, jaké je prodloužení (případně zkrácení) vlákna v libovolné vzdálenosti od neutrální osy. Z ohýbaného profilu se tedy vytkne inkrementální element s vrcholovým úhlem $d\phi$. Neutrální osa má poloměr ohybu R_n a její délka odpovídající úhlu $d\phi$ je dx (na obrázku 25 označeno modře). Cílem je

nyní vyjádřit prodloužení vlákna (na obrázku 25 označeno červeně) v libovolné vzdálenosti z od polohy neutrální osy. [26]



Obrázek 25: Prodloužení libovolného vlákna při ohybu profilu [26] (upraveno)

Jelikož jde o inkrementální element, tak se předpokládá, že velikost obloukové míry mezi dvěma body (např. C a D) se rovná přímkové vzdálenosti mezi těmito body. Je proto možné provést napřímení oblouků (obrázek 25 vpravo). Z tohoto obrázku už je zřejmá podobnost trojúhelníků OBA a ACD , se shodným vrcholovým úhlem $d\phi$. Díky zákonu podobnosti lze napsat rovnici (4. 14). [26]

$$\frac{z}{R_n} = \frac{|CD|}{dx} \quad (4. 14)$$

Vzdálenost bodů C a D je pak možné vyjádřit vztahem (4. 15). [26]

$$|CD| = z \cdot \sin(d\phi) \approx z \cdot d\phi \quad (4. 15)$$

Z obrázku 25 je patrné, že tato vzdálenost představuje délku, o kterou se vlivem ohybu červené vlákno prodloužilo. Podíl absolutní hodnoty prodloužení a původní délky přitom představuje poměrné prodloužení ε . Lze proto napsat rovnici (4. 16). [26]

$$\frac{z}{R_n} = \frac{z \cdot d\phi}{dx} = \varepsilon \quad (4. 16)$$

Dříve bylo popsáno, že v místě přechodu z elastického jádra do plastického obalu bude napětí rovné mezi kluzu σ_k a vzdálenost tohoto místa od neutrální osy je rovna

polovině výšky elastického jádra a . Lze tedy použít Hookův zákon, kde se za napětí dosadí mez kluzu σ_k , za poměrné prodloužení ε levá stranu vztahu (4. 16) odvozeného výše a za z se dosadí polovina výšky elastického jádra a . Dosazení vede na vztah (4. 17). [26]

$$\sigma_k = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{R_n} \quad (4. 17)$$

Po úpravě pak lze dostat vztah (4. 18) vyjadřující výšku elastického jádra a v závislosti na poloměru ohybu neutrální osy profilu R_n . [26]

$$a = \frac{2 \cdot \sigma_k \cdot R_n}{E} \quad (4. 18)$$

4.4. Mikromechanismy plastické deformace

Pro komplexní popis problematiky plastické deformace je vhodné popsat i to, co se při plasticitě děje ve zkoušeném vzorku na úrovni krystalů, které tvoří strukturu daného materiálu. Rozlišuje se pět základních mechanismů plastické deformace, a to konkrétně: [27]

- Skluz
- Dvojčatění
- Pokluz na hranicích zrn
- Difuzní tečení
- Dislokační tečení

Při tváření za studena, kdy je teplota tvářeného materiálu nižší než $0,3 \times T_T$ (kde T_T je teplota tání daného materiálu), jsou mechanismy plastické deformace pouze skluz a dvojčatění. Pokluz na hranicích zrn a difuzní a dislokační tečení se projeví jen při tváření materiálu za zvýšené teploty. [27]

4.4.1. Skluz

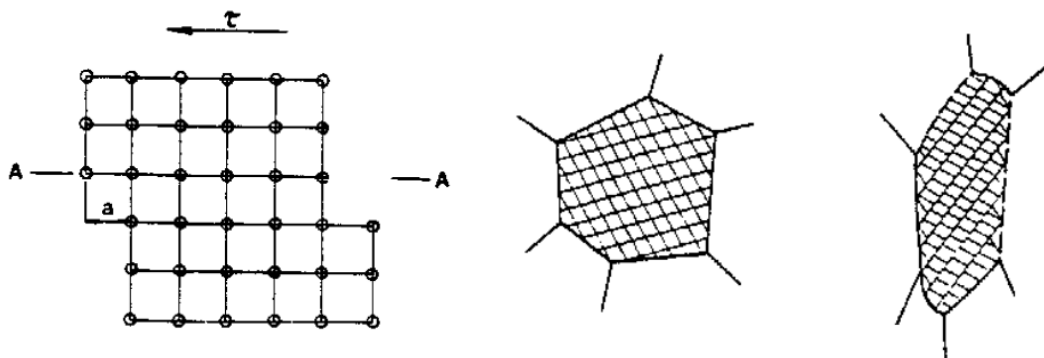
Skluz je mikromechanismus, který se na plastické deformaci materiálu podílí nejvíce. Deformaci skluzem si lze představit jako deformaci balíčku karet, kdy se karty vůči sobě vzájemně posunou. Ke skluzu dochází působením smykového napětí ve skluzové rovině (v představě balíčku karet by to byla rovina vložená mezi dvě karty). [27]

Skluzový mechanismus je také dobře představitelný na dokonalé krystalové mřížce (obrázek 26 vlevo). Rovina skluzu je označená A-A, působí v ní smykové napětí τ . Při překročení určité hodnoty napětí dojde k „poskočení“ atomů ve skluzové rovině o celý

násobek meziatomové vzdálenosti. Tato mezní hodnota napětí se nazývá kritické skluzové napětí (τ_{kr}) a jeho velikost je závislá na čistotě materiálu a jeho teplotě. Teplotně nezávislá složka kritické hodnoty napětí je přímo úměrná modulu pružnosti ve smyku G daného materiálu. [27]

Teoreticky vypočtené kritické napětí potřebné k překonání meziatomových sil je ale řádově vyšší, než je experimentálně zjištěné. To souvisí s přítomností nedokonalostí krystalové mřížky, tzv. dislokací. Tyto nedokonalosti usnadňují skluz v dané skluzové rovině. V reálné krystalové mřížce nikdy nedochází ke skluzu celých skluzových rovin, ale ke skluzu dislokací. [27]

V rámci jednoho krystalu tedy dojde ke skluzu dislokací ve směru působení smykového napětí τ a dochází k „protažení“ krystalu v tomto směru. [27]



Obrázek 26: Deformace skluzem na dokonalé krystalové mřížce (vlevo) a deformace (protažení) krystalu (vpravo) [27]

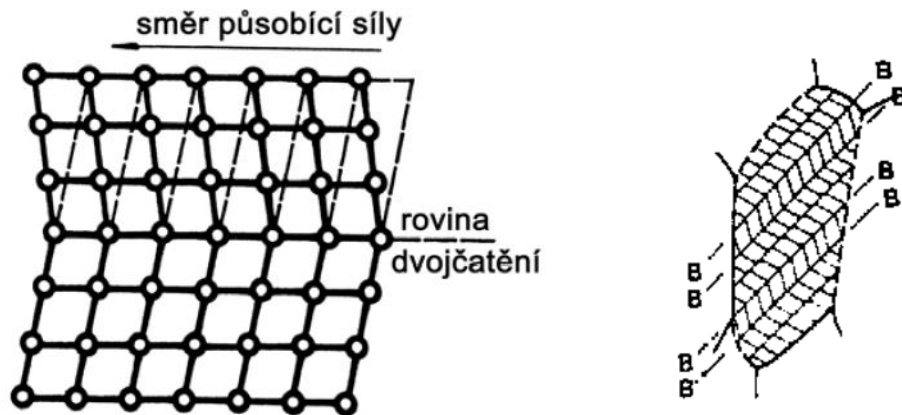
Z teorie napjatosti vyplývá, že k největšímu smykovému napětí dochází v rovině, která je otočená o úhel $\pi/4$ proti rovině, ve které působí osově napětí σ . To je ve shodě s pozorováním průběhu tahové zkoušky, kde je možné pozorovat největší plastickou deformaci (tvorbu krčku) a následný lom materiálu právě v rovině, která je skloněna o úhel 45° vůči ose zkoušené tyče (a tedy i vůči rovině, ve které působí osově napětí). [28]

4.4.2. Dvojčatění

Dvojčatění je sekundární mikromechanismus plastické deformace. Při dvojčatění se část krystalové mřížky posune tak, že vytvoří zrcadlový obraz neposunuté části. Tyto dvě části jsou pak symetrické podle roviny dvojčatění. Tento proces je patrný z obrázku 27 vlevo. Z obrázku je také patrné, že dvojčatění je speciálním případem skluzu, při kterém se atomy posouvají pouze o část meziatomové vzdálenosti. Hodnota kritického napětí pro dvojčatění je vyšší než pro deformaci skluzem, při plastické deformaci tedy dochází primárně k deformaci skluzem, dvojčatění je až sekundární mechanismus. Mechanismus

dvojčatění podporuje nízká teplota deformace a vysoká deformační rychlost (typická například pro tváření výbuchem). [27] [28]

Na obrázku 27 vpravo je pak znázorněný krystal po deformaci skluzem i dvojčatěním. Rovina dvojčatění je zde B-B. [27]



Obrázek 27: Deformace dvojčatěním na dokonalé krystalové mřížce (vlevo) a při deformaci krystalu (vpravo) [27] [28]

5. Rozbor současného stavu

Požadavek na zpracování problematiky akumulátorů plechové pásky vzešel z firmy Attl a spol., která se zabývá vývojem a stavbou profilovacích linek.

Ve firmě v současné době probíhá vývoj nové linky s názvem TA-2, jejíž dokončení je naplánované na druhou polovinu roku 2023. Linka je určena pro výrobu nerezových trubek a má obsahovat řadu inovativních řešení. Mezi nejvýznamnější inovace, které tuto linku odlišují od doposud postavených linek, patří:

- Aplikace vysokorychlostního laserového svařování pomocí oválného spotu laseru pro rychlost výroby až 25 m/min (standardní rychlost při svařování laserem je nyní přibližně 10 m/min)
- Aplikace orbitálního laserového dělení pro veškeré vyráběné profily (kromě kruhových trubek i pro trubky se čtvercovým průřezem a plocho-ovály)
- Aplikace kontinuálního žíhání vyráběných trubek v průběžné žíhací peci přímo v lince

Základní parametry vyvíjené linky shrnuje následující tabulka 1.

Tabulka 1: Základní parametry linky TA-2 [29]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální rychlost linky	25	m/min
Rozsah průměrů vyráběných trubek	6-62	mm
Rozsah šířky zpracovávané pásky	18-200	mm
Rozsah tloušťky stěny	0,3-1,2	mm
Materiál zpracovávané pásky	Austenitická i feritická nerezová ocel (např. W.Nr. 1.4301, 1.4404, 1.4509)	W.Nr.

Jelikož jde o linku s vysokými investičními náklady, je ve firmě Attl snaha o dosažení co nejvyšší možné produktivity výroby, aby se dosáhlo přijatelné doby návratnosti vložené investice. V rámci této snahy je také zvažováno zařazení akumulátoru pro zajištění nepřetržité výroby, bez nutnosti zastavení linky při výměně svitku.

5.1. Srovnání konstrukčních typů akumulátorů

Pro rozhodnutí o tom, jaký z popsaných typů akumulátorů je vhodné zvolit pro danou profilovací linku, je třeba porovnat základní parametry jednotlivých konstrukčních provedení.

Základními parametry jsou:

- Maximální přípustná tloušťka pásky [mm]
- Maximální přípustná šířka pásky [mm]
- Přípustná rychlost linky [m/min]
- Kapacita akumulátoru (zásoba pásky při naplněném akumulátoru) [m]
- Zástavbová plocha [m²]
- Investiční náklady [mil. Kč]

Ne všechny parametry jsou pro každý z typů akumulátorů dohledatelné z veřejných zdrojů, navíc se liší podle výrobce. Následující tabulka 2 proto umožňuje spíše orientační srovnání. Škála barevného podbarvení vyjadřuje výhodnost parametrů jednotlivých typů akumulátorů (zelená znamená výhodný, červená nevýhodný parametr).

Tabulka 2: Srovnání konstrukčních typů akumulátoru [16] [21] [29]

Typ akumulátoru	Tloušťka pásky [mm]	Šířka pásky [mm]	Rychlost linky [m/min]	Kapacita akumulátoru [m]	Zástavbová plocha [m ²]	Investiční náklady [mil. Kč]
Věžový / jámový akumulátor	2,5	1000	3	10	2	0,2
Horizontální smyčka	2,5	1000	10	30	4	0,3
„Festoon“ akumulátor	0,5	400	80	230	8	1,0
Smyčkový vertikální akumulátor	1	70	30	90	4	1,0
„Free loop“ vertikální akumulátor	7	500	150	900	8	6,0
G-akumulátor	2,5	200	80	230	6	4,2
Klasický horizontální akumulátor	20	1000	150	900	16	3,8
„Free loop“ horizontální akumulátor	2,5	400	80	450	12	4,0

Ze zmíněných konstrukčních variant akumulátorů pro linku TA-2 nepřichází v úvahu akumulátor věžový, jámový, ani horizontální smyčka, a to z důvodu nedostatečné rychlosti linky a kapacity. Rovněž není možné použít „festoon“ akumulátor (z důvodu nedostatečné přípustné tloušťky stěny), ani smyčkový vertikální akumulátor (zejména z důvodu nedostatečné přípustné šířky pásky). Připadají tedy v úvahu následující 4 varianty:

- „Free loop“ vertikální akumulátor
- G-akumulátor
- Klasický horizontální akumulátor
- „Free loop“ horizontální akumulátor

Z těchto variant byla jako nejvhodnější zvolena konstrukce typu G-akumulátor, a to s ohledem na nejvýhodnější kombinaci velikosti zástavbové plochy a výše investičních nákladů v porovnání s ostatními uvažovanými variantami. Parametry rychlosti linky i kapacity jsou sice v porovnání s ostatními variantami nižší, ale pro aplikaci do linky TA-2 dostačující.

5.2. Zvýšení produktivity výroby zařazením akumulátoru pásky

V první fázi bylo zapotřebí vypočítat, zda se investice do zvoleného G-akumulátoru pásky vyplatí. Vstupy použitými pro výpočet jsou rychlost linky, hmotnost jednoho svitku pásky, šířka a tloušťka pásky a čas potřebný pro nastavení pásky při výměně svitku.

Pro potřeby výpočtu byla zvolena výroba trubky, o které se předpokládá, že bude na lince vyráběna nejčastěji – trubka $\varnothing 30 \times 1,0$ mm. Této trubce odpovídá páska o šířce 94 mm. Předpokládaná rychlost výroby této trubky je 15 m/min a předpokládá se, že páska bude dodávána ve svitcích o hmotnosti 1000 kg. Výpočet zvýšení produktivity výroby zařazením akumulátoru pásky shrnuje tabulka 3.

Tabulka 3: Zvýšení produktivity výroby zařazením akumulátoru pásky

Parametr	Hodnota	Jednotka
Hmotnost svitku	1000	kg
Průměr trubky	30	mm
Šířka pásky	94	mm
Tloušťka pásky	1,0	mm
Hustota materiálu	7850	kg/m ³
Délka pásky v jednom svitku	1352	m
Výrobní rychlost	15	m/min
Čistá doba výroby z jednoho svitku	90	min
Doba potřebná k nastavení nového svitku	10	min
Zvýšení produktivity výroby zařazením akumulátoru	10 %	-

Z tabulky 3 vyplývá, že zařazením akumulátoru do výrobní linky se zvýší produktivita výroby přibližně o 10 %. Průměrná využitelnost linky (tedy procentuální podíl času směny, kdy je linka v provozu) bez akumulátoru je 80 %, zařazením akumulátoru se využitelnost linky zvýší na 90 %.

5.3. Předpokládaná doba návratnosti investice do akumulátoru pásky

Pro rozhodnutí o investici do akumulátoru bylo dále zapotřebí spočítat, jaký bude efekt investice, tedy jak se zvýšení využitelnosti linky projeví na ročním cash flow z prodeje produktů linky – nerezových trubek. Byl proto proveden výpočet předpokládaných ročních nákladů na výrobu a výnosů z prodeje těchto produktů.

Základní údaje o výrobě trubek s použitím a bez použití akumulátoru shrnuje následující tabulka 4. Pro jednoduchost se předpokládá 100% podíl výroby trubky 30x1,0 při výrobní rychlosti 15 m/min. Předpokládá se provoz linky 24 hodin denně, 240 dní v roce. Využitelnost linky bez akumulátoru je 80 %, s akumulátorem 90 %.

Tabulka 4: Základní údaje o výrobě trubek (s akumulátorem a bez akumulátoru)

Základní údaje	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Rozměry trubky	30x1,0	30x1,0	mm
Jakost materiálu trubky	1.4404	1.4404	W.Nr.
Měrná hmotnost trubky	0,72	0,72	kg/m
Rychlost linky	15	15	m/min
Podíl výroby	100 %	100 %	-
Denní provoz linky	24	24	h/den
Roční provoz linky	240	240	dní/rok
Využitelnost linky	80 %	90 %	-
Využitelnost vstupního materiálu	95 %	95 %	-
Kurz k 07.05.2022	25,00	25,00	CZK/EUR

V první fázi bylo třeba vypočítat předpokládané roční výnosy z prodeje tohoto produktu. Přibližná prodejní cena trubky 30x1,0 z materiálu W.Nr. 1.4404 je 2,5 EUR za metr (v roce 2022). Následující tabulka 5 shrnuje předpokládané roční výnosy z prodeje tohoto produktu při roční kapacitě vycházející z rychlosti linky a její využitelnosti vypočtené výše.

Tabulka 5: Předpokládané roční výnosy

Výnosy	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Kapacita výroby v metrech za rok	3 939 840	4 431 784	m/rok
Kapacita výroby v tunách za rok	2836,7	3190,9	t/rok
Prodejní cena trubek v EUR za metr	2,5	2,5	EUR/m
Prodejní cena trubek v EUR za tunu	3 472	3 472	EUR/t
Prodejní cena trubek v CZK za tunu	86 806	86 806	CZK/t
Celkové výnosy za rok	246 240 000	276 986 500	CZK/rok

Další tabulky shrnují roční náklady spojené s výrobou tohoto produktu. Nejvýznamnější jsou náklady na vstupní materiál – pásku. Cena za tunu tohoto vstupního

materiálu je v současné době 2 810 EUR. Výpočet předpokládaných ročních nákladů za materiál shrnuje následující tabulka 6.

Tabulka 6: Předpokládané roční náklady na materiál (páska W.Nr. 1.4404)

Náklady – materiál	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Cena za vstupní pásku v EUR	2 810	2 810	EUR/t
Cena za vstupní pásku v CZK	70 250	70 250	CZK/t
Náklady na materiál za rok	209 765 376	235 957 510	CZK/rok

Tabulka 7 pak shrnuje předpokládané roční náklady na elektrickou energii spotřebovanou na provoz linky. Cena za 1 kWh v roce 2022 je 9 Kč, příkon linky je přibližně 100 kW, příkon akumulátoru přibližně 15 kW.

Tabulka 7: Předpokládané roční náklady na energii

Náklady – energie	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Cena za 1 kWh	9	9	CZK/kWh
Příkon linky	100	115	kW
Cena za 1 h provozu linky	900	1 035	CZK/h
Náklady na energii za rok	5 184 000	5 961 600	CZK/rok

Další tabulka 8 zahrnuje předpokládané osobní náklady. Počítá se se dvěma operátory ve třísměnném provozu – jeden operátor na obsluhu linky, druhý na kontrolu, balení produktů a manipulaci. Hodinový náklad na jednoho operátora je předpokládán 450 Kč. Dále se počítá s jedním manažerem projektu, který by se měl projektu věnovat 6 hodin denně (tedy 25 % z denního času výroby). Hodinový náklad na manažera je předpokládán 650 Kč.

Tabulka 8: Předpokládané roční osobní náklady

Náklady – osobní	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Počet operátorů	2	2	-
Hodinový náklad na operátora	450	450	CZK/h
Počet manažerů	0,25	0,25	-
Hodinový náklad na manažera	650	650	CZK/h
Osobní náklady za rok	6 120 000	6 120 000	CZK/rok

Tabulka 9 shrnuje předpokládané roční náklady na technické plyny, tedy argon, který se používá jako asistenční plyn při laserovém svařování. Jeho spotřeba je 50 litrů, tedy 0,05 m³ za minutu. Cena za 1 m³ argonu v roce 2022 je 50 Kč.

Tabulka 9: Předpokládané roční náklady na technické plyny

Náklady – technické plyny	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Cena za 1 m ³ argonu	50	50	CZK/m ³
Spotřeba argonu za minutu	0,05	0,05	m ³ /min
Spotřeba argonu za rok	17 280	17 280	m ³ /rok
Náklady na technické plyny za rok	864 000	864 000	CZK/rok

V tabulce 10 jsou dále vyjádřeny ostatní předpokládané náklady spojené s provozem profilovací linky. Tyto náklady jsou již obtížně vypočitatelné, vycházejí ze zkušenosti firmy Attl s provozem podobných linek.

Tabulka 10: Předpokládané ostatní provozní náklady

Náklady – ostatní provozní	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Náklady na spotřební materiál za rok	50 000	55 000	CZK/rok
Náklady na nástroje za rok	450 000	450 000	CZK/rok
Náklady na údržbu linky za rok	500 000	550 000	CZK/rok
Náklady na balení za rok	100 000	100 000	CZK/rok
Režie za rok	1 850 000	1 850 000	CZK/rok
Ostatní provozní náklady za rok	2 950 000	3 005 000	CZK/rok

Předpokládané roční výnosy a náklady rozpočítané v tabulkách výše shrnuje následující tabulka 11. Rozdílem celkových předpokládaných ročních výnosů a nákladů (bez odpisů) je roční cash flow. Efekt investice do akumulátoru představuje zvýšení ročního cash flow z prodeje trubek.

Tabulka 11: Shrnutí předpokládaných ročních výnosů a nákladů

Shrnutí	Bez akumulátoru	S akumulátorem	Jednotka
Celkové výnosy za rok	246 240 000	276 986 500	CZK/rok
Náklady na materiál za rok	209 765 376	235 957 510	CZK/rok
Náklady na energie za rok	5 184 000	5 961 600	CZK/rok
Osobní náklady za rok	6 120 000	6 120 000	CZK/rok
Náklady na technické plyny za rok	864 000	864 000	CZK/rok
Ostatní provozní náklady za rok	2 950 000	3 005 000	CZK/rok
Celkové náklady za rok (bez odpisů)	224 883 376	251 908 110	CZK/rok
Předpokládané cash flow za rok	21 356 624	25 078 390	CZK/rok
Efekt investice (zvýšení ročního cash flow)	3 721 766		CZK/rok

Z tabulky 11 je patrné, že zařazením akumulátoru do profilovací linky vzroste roční cash flow přibližně o 3,7 mil. korun. Předpokládaná výše investice do vertikálního G-akumulátoru je 4,2 mil. korun. Doba návratnosti investice je vypočtena dle následujícího

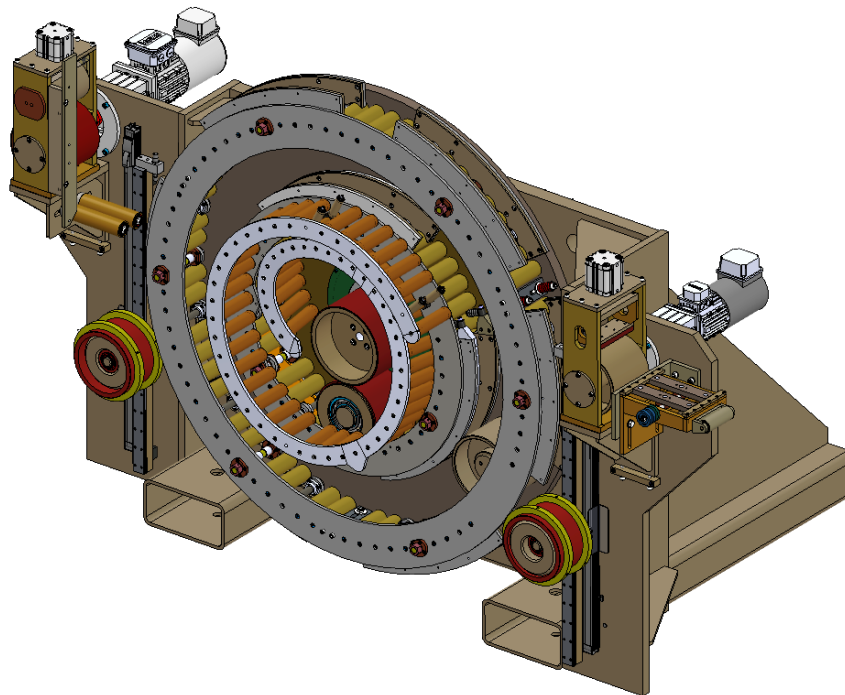
vzorce (5. 1), kde IN jsou předpokládané investiční náklady na G-akumulátor a EF je efekt investice (předpokládané zvýšení ročního cash flow díky zařazení akumulátoru do linky).

$$DN = \frac{IN}{EF} = \frac{4\,200\,000}{3\,721\,766} = 1,13 \cong 1,2 \text{ let} \quad (5. 1)$$

Vzhledem k tomu, že profilovací linky bývají v provozu desítky let, lze konstatovat, že investice do akumulátoru pro linku TA-2 je výhodná, s předpokládanou dobou návratnosti vynaložené investice přibližně do 1,2 let.

5.4. Výchozí konstrukce akumulátoru

Konstrukce vertikálního G-akumulátoru již ve firmě Attl existuje, ale je určena pouze pro pásku o maximální šířce 110 mm a tloušťce 0,6 mm. Tato konstrukce je patrná z obrázku 28. V první fázi bylo proto třeba zjistit, zda vůbec a případně s jakými úpravami je tato konstrukce použitelná pro linku TA-2, kde je uvažovaná maximální šířka pásky 200 mm a tloušťka stěny 1,2 mm.



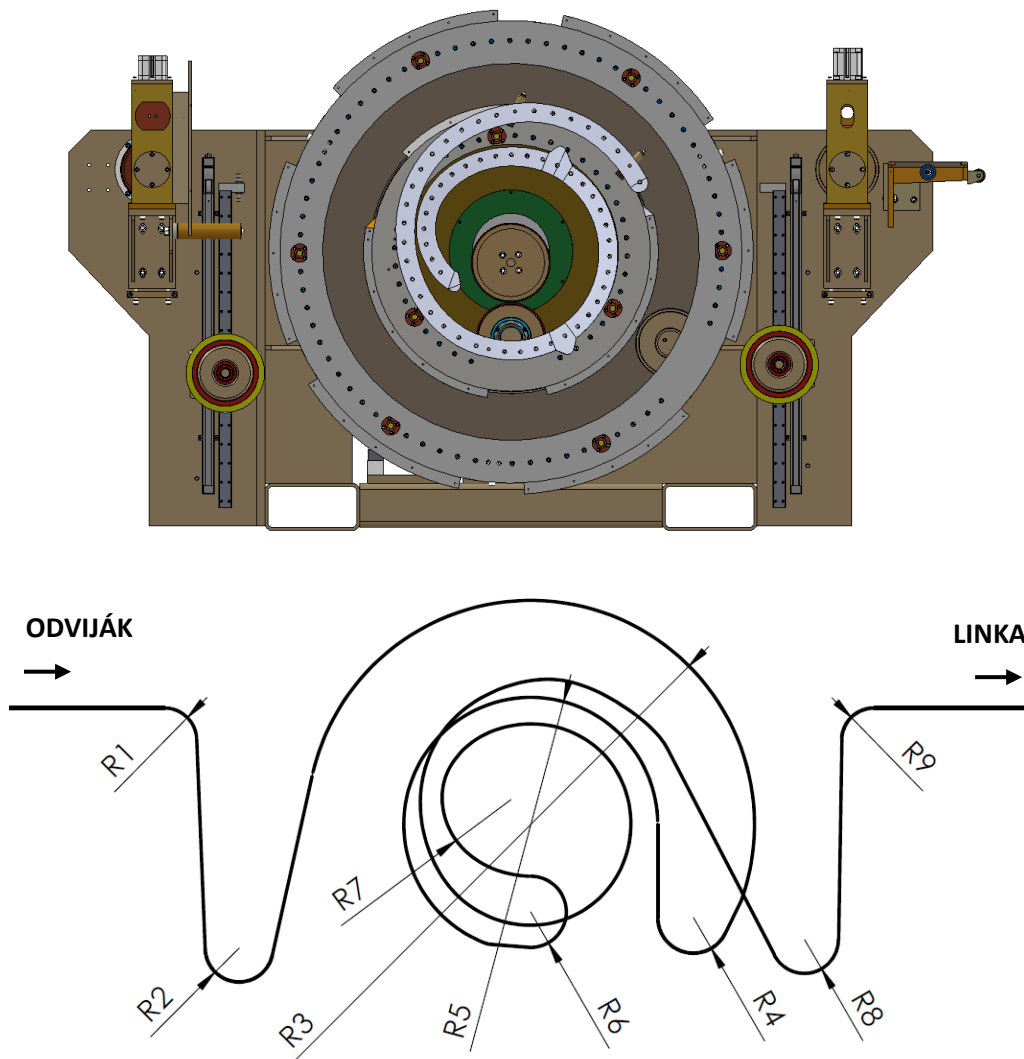
Obrázek 28: Výchozí konstrukce akumulátoru

Přitom je potřeba klást důraz zejména na to, zda při průchodu pásky akumulátorem nedochází k její významné plastické deformaci. Jak bylo popsáno v teoretické části práce, plastická deformace bývá spojena se zpevněním materiálu, což může být významný problém ve formovací sekci profilovací linky, kde potřebujeme, aby páska měla co největší

tvařitelnost. Pokud materiál vyčerpá svou tvařitelnost již při průchodu akumulátorem, může to mít negativní vliv na následný proces formování a na kvalitu výsledného produktu.

5.4.1. Průchod pásy výchozí konstrukcí akumulátoru

Pro analýzu plastické deformace při průchodu pásy akumulátorem byly v modelu naměřeny jednotlivé poloměry ohybu během průchodu pásy touto konstrukcí akumulátoru. Pro lepší představu je tato trasa znázorněna na následujícím obrázku 29.



Obrázek 29: Trasa průchodu pásy výchozí konstrukcí akumulátoru

Páska je do akumulátoru přivedena z levé strany. Nejprve je vedena přes levou hnací kladku (R1) a levou napínací kladku (R2). Následně je navíjena na vnější kladkovou dráhu (R3), odkud je přes vnější reverzní kladku (R4) převedena na vnitřní kladkovou dráhu (R5), na kterou se navíjí v opačném směru otáčení. Poté se přes vnitřní reverzní kladku (R6) opět otočí a je vedena na spirálové vedení (R7), které ji vyvede ven z roviny akumulátoru.

Následně je vedena přes pravou napínací kladku (R8) a pravou hnací kladku (R9) dále do linky. Jednotlivé poloměry ohybů R1-R9 shrnuje následující tabulka 12.

Označení rádiusu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Poloměr ohybu [mm]	100	105	692,5	110	392,5	110	220	105	100

Tabulka 12: Rádusy ohybu pásy při průchodu výchozí konstrukcí akumulátoru

5.4.2. Plastická deformace při průchodu pásy výchozí konstrukcí akumulátoru

Pomocí vzorce (4. 18) je možné vypočítat výšku elastického jádra při průchodu pásy přes jednotlivé výše zmíněné rádusy. Z tohoto vzorce je patrné, že výška elastického jádra závisí kromě poloměru ohybu neutrální osy R_n ještě na modulu pružnosti E a mezi kluzu $\sigma_K (R_p)$ daného materiálu. Hodnoty těchto konstant pro uvažované jakosti materiálu shrnuje následující tabulka 13.

Jakost materiálu (dle W.Nr.)	Mez kluzu σ_K, R_p [MPa]	Modul pružnosti E [N/mm ²]
1.4301	190	200 000
1.4404	200	200 000
1.4509	200	220 000

Tabulka 13: Hodnoty meze kluzu a modulu pružnosti pro uvažované jakosti materiálu [30] [31] [32]

Pro výpočet výšky elastického jádra uvažujeme nejnepříznivější případ, který nastane pro materiál W.Nr. 1.4509, který má z uvažovaných materiálu nejvyšší hodnotu modulu pružnosti E . Výška elastického jádra pro jednotlivé rádusy ohybu pásy z tohoto materiálu při průchodu akumulátorem je patrná z následující tabulky 14. Je zřejmé, že výška elastického jádra je v případě všech rádiů kromě R3 nižší, než je maximální uvažovaná tloušťka pásy (1,2 mm). Lze tedy konstatovat, že při průchodu pásy akumulátorem bude docházet k plastické deformaci.

Označení rádiusu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Poloměr ohybu R_n [mm]	100	105	692,5	110	392,5	110	220	105	100
Výška elastického jádra a [mm]	0,18	0,19	1,26	0,20	0,71	0,20	0,40	0,19	0,18

Tabulka 14: Výška elastického jádra pro jednotlivé rádusy ohybu pásy při průchodu akumulátorem

6. Úprava konstrukce akumulátoru

Ze závěrů předchozích kapitol vyplývá, že aby byl akumulátor použitelný v lince TA-2, bude potřeba jeho výchozí konstrukci upravit. Tyto úpravy lze rozdělit do 3 hlavních kategorií, kterými jsou:

- Úpravy za účelem omezení plastické deformace pásky
- Úpravy za účelem zvýšení přípustné šířky pásky na 200 mm
- Ostatní úpravy a vylepšení konstrukce

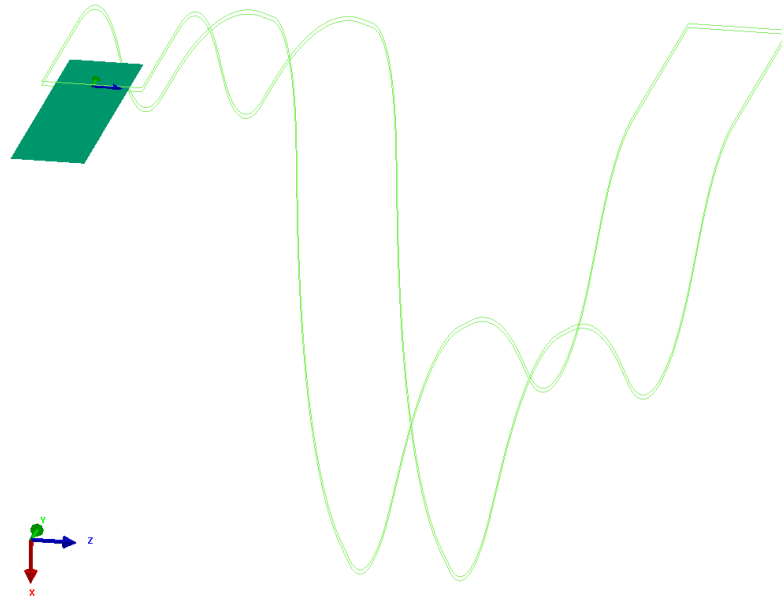
6.1. Návrh úprav konstrukce za účelem omezení plastické deformace pásky

Jak již bylo zmíněno, rovnice (4. 18) vyjadřuje vztah poloměru neutrální osy R_n při ohybu pásky a výšky elastického jádra a odpovídající tomuto ohybu. V ideálním případě by výška elastického jádra měla být větší, než je tloušťka pásky b , aby v celém průřezu pásky docházelo pouze k elastické deformaci a nedošlo vůbec k vytvoření plastického obalu. Vyjádřením veličiny R_n z této rovnice a dosazením maximální tloušťky pásky $b=1,2 \text{ mm}$ za a dostáváme minimální poloměr ohybu neutrální osy, při kterém by v pásce nemělo dojít k plastické deformaci. To vyjadřuje následující vzorec (6. 1).

$$R_{n \min} = \frac{a \cdot E}{2 \cdot \sigma_k} = \frac{1,2 \cdot 200\,000}{2 \cdot 190} = 632 \text{ mm} \quad (6. 1)$$

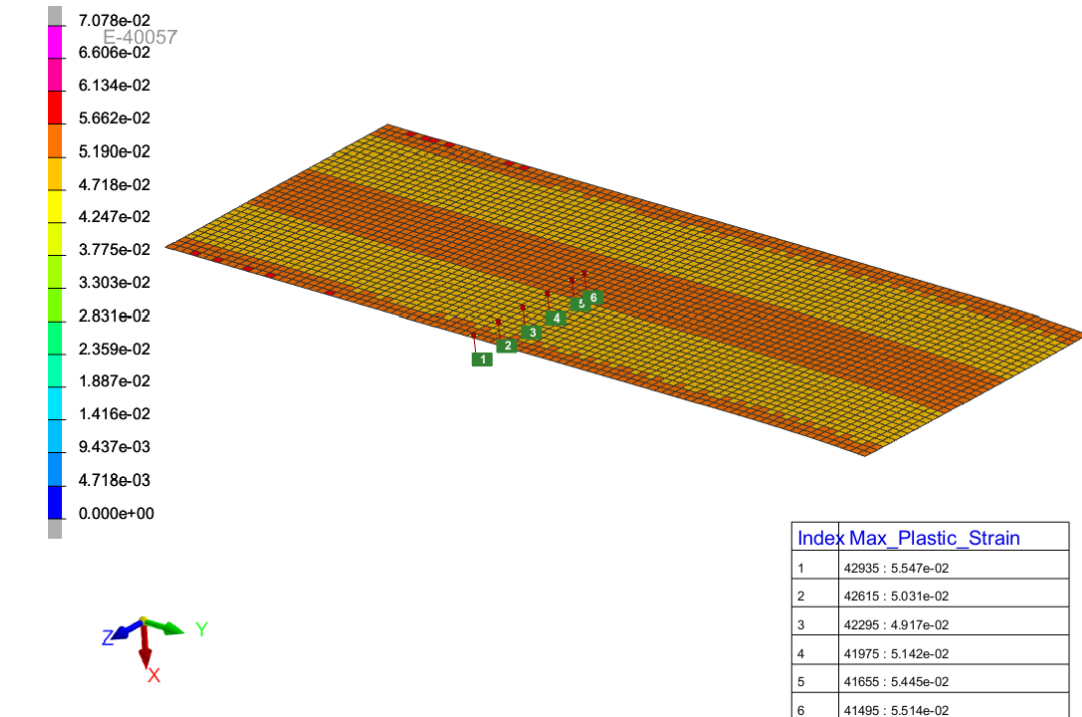
Je však zřejmé, že úprava konstrukce akumulátoru tak, aby minimální poloměr ohybu pásky byl větší než tato vypočtená hodnota, není proveditelná, protože by bylo potřeba všechny rádiusy ohybu několikanásobně zvětšit, a celá konstrukce akumulátoru by tak narostla na nepříjemnou velikost. Bylo proto zadáno zpracování analýzy průchodu pásky akumulátorem metodou MKP. Tato analýza má za cíl ověřit, k jak velkým plastickým deformacím při průchodu akumulátorem dochází a jak významné jsou plastické deformace způsobené průchodem akumulátorem v porovnání s následným procesem formování trubky.

Trasa pásky použitá pro MKP simulaci vychází z reálného průchodu pásky akumulátorem, popsaného v předchozí kapitole. Pro zjednodušení simulace je však dráha zkrácena. Vychází se z předpokladu, že při ohnutí plechu na konstantním poloměru ohybu se jeho tvar, a tedy i deformace, nadále nemění. Z jednotlivých rádiusů při průchodu pásky akumulátorem je proto v simulaci vždy využita jen kratší část. Trasa pásky použitá pro MKP simulaci je patrná z následujícího obrázku 30.

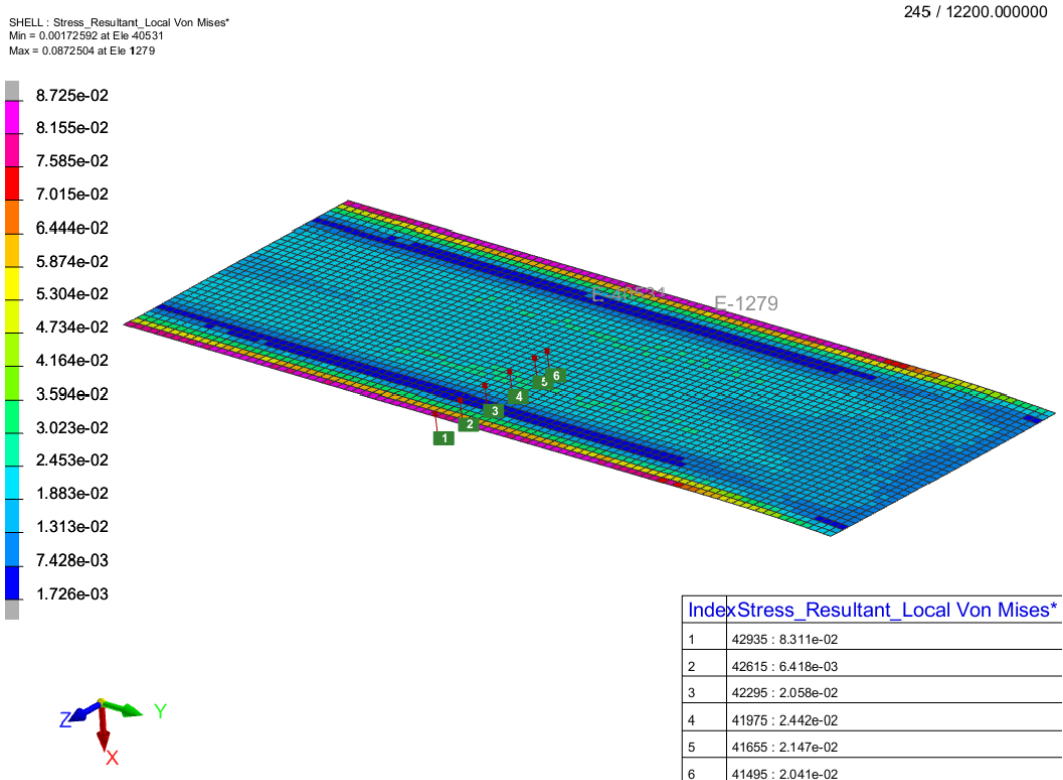


Obrázek 30: Zjednodušená trasa pásky použitá pro MKP simulaci [33]

Pro MKP simulaci byla použita nejnepříznivější kombinace materiálu (W.Nr. 1.4509) a tloušťky pásky (1,2 mm). Základními materiálovými konstantami použitými pro simulaci jsou modul pružnosti $E=220\,000$ MPa, Poissonovo číslo $\mu=0,28$ a hustota materiálu $\rho=7\,850$ kg/m³. Plastické chování je definováno po částech lineární funkcí, zadanou prostřednictvím skutečných napětí a skutečných deformací stanovených na základě tahových zkoušek materiálu. Následující obrázek 31 vyjadřuje plastickou deformaci pásky po průchodu akumulátorem, obrázek 32 pak vyjadřuje výsledky mechanického napětí podle Von Mises. [33]



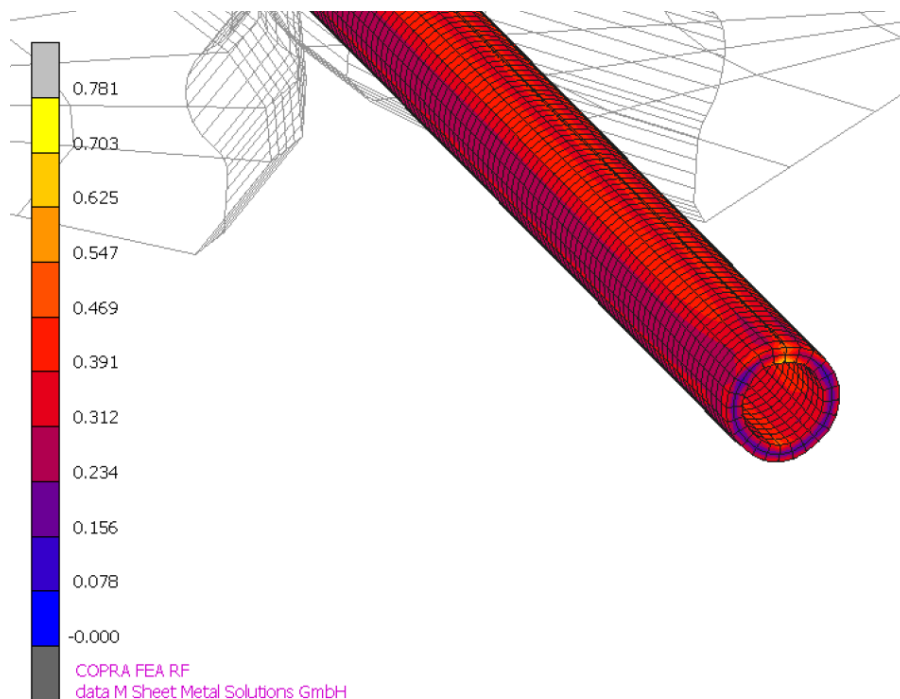
Obrázek 31: Výsledky plastické deformace pásky po průchodu výchozí konstrukcí akumulátoru [33]



Obrázek 32: Výsledky zbytkového mechanického napětí pásky podle Von Mises po průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru [33]

Z obrázku 31 je patrné, že maximální hodnota plastické deformace po průchodu pásky akumulátorem je $\epsilon=0,055$. Pro porovnání je na obrázku 33 znázorněna plastická

deformace trubky v posledním kroku procesu formování v profilovací lince. Tato simulace je výstupem z programu Copra RF Software, který se používá pro návrh jednotlivých formovacích průchodů. Zde je opět uvažováno s nejnepříznivější kombinací materiálu (W.Nr. 1.4509), tloušťky stěny (1,2 mm) a průměru trubky (8 mm). Z této simulace vyplývá, že procesem formování dochází k plastickým deformacím ve velikosti až $\varepsilon=0,39$ (globálně). Velikost plastické deformace způsobené průchodem pásky akumulátorem se tak pohybuje v řádu přibližně 10 %, maximálně pak 14 % plastické deformace vnesené do pásky samotným formovacím procesem. Lze proto usuzovat, že riziko vyčerpání tažnosti pásky průchodem akumulátorem není velké. Na základě tohoto závěru byla pro úpravu konstrukce akumulátoru přijata zásada, že dojde pouze k takovému zvětšení poloměrů ohybu, které nebude mít za následek zvětšení celkové zástavbové plochy akumulátoru.



Obrázek 33: Plastická deformace trubky při posledním kroku formování [33]

6.2. Návrh úprav konstrukce za účelem zvýšení přípustné šířky pásky na 200 mm

Aby byl akumulátor použitelný pro pásku až do šířky 200 mm, je zapotřebí upravit celou řadu komponentů ve všech jeho podsestavách. Jde zejména o prodloužení komponentů, které jsou s páskou přímo ve styku a které dohromady tvoří dráhu, po které páska akumulátorem prochází – vstupní, výstupní i reverzní kladky, vnitřní i vnější kladková dráha, stranové vedení pásky a podobně. Detailněji budou konkrétní konstrukční úpravy v jednotlivých podsestavách popsány v další kapitole.

6.3. Ostatní úpravy a vylepšení konstrukce

Mezi tyto konstrukční úpravy patří další změny konstrukce, které byly v modelu výchozího akumulátoru provedeny, ale které přímo nesouvisí s žádným z výše popsaných cílů. Jde například o výměnu vyráběného dílu za nakupovaný za účelem snížení ceny a podobně.

6.4. Konkrétní úpravy konstrukce akumulátoru

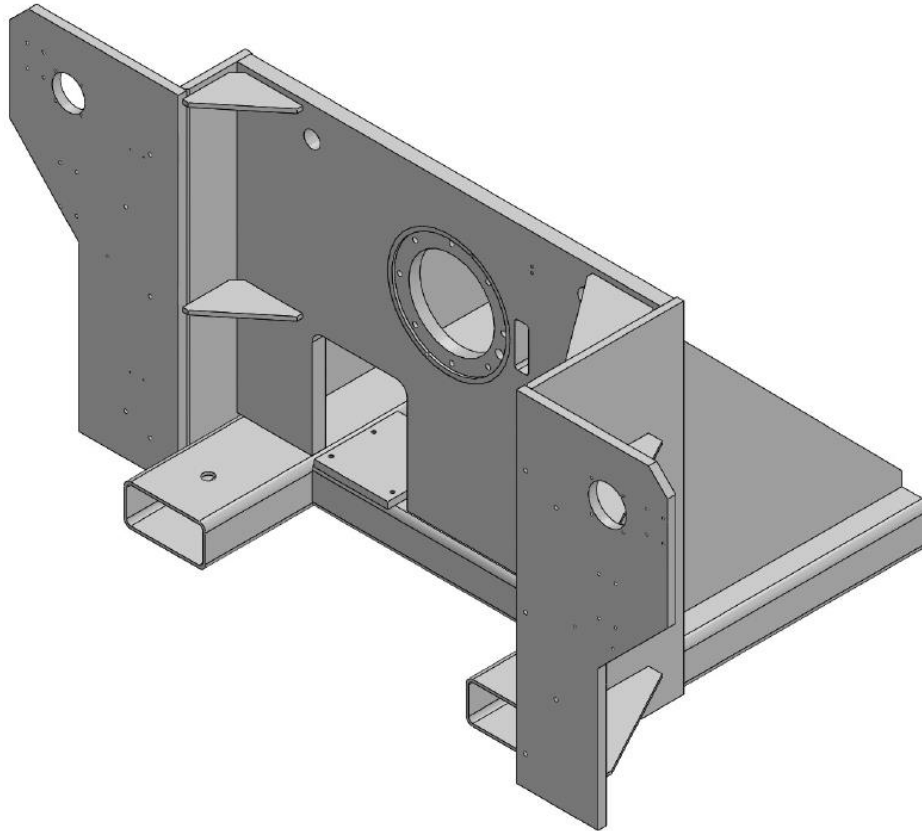
Konstrukce akumulátoru se skládá z 9 hlavních podsestav. Těmi jsou:

- Rám – nosná konstrukce akumulátoru
- Vnitřní zvon – vnitřní kladková dráha, včetně stranového vedení pásy, hnací a vnitřní reverzní kladky
- Vnější zvon – vnější kladková dráha, včetně stranového vedení pásy a vnější reverzní kladky
- Šnek – kladková dráha ve tvaru připomínající šroubovici, vyvádějící pásku mimo rovinu akumulátoru, včetně stranového vedení
- Podávání levé – sestava s hnací rolnou na vstupu do akumulátoru
- Podávání pravé – sestava s hnací rolnou na výstupu z akumulátoru
- Napínací kladka levá – kladka zajišťující napínání pásy na vstupu, umístěná na lineárním vedení
- Napínací kladka pravá – kladka zajišťující napínání pásy na výstupu, umístěná na lineárním vedení
- Seřizování pásu – stranové vedení pásy na výstupu

Větší či menší konstrukční úpravy bylo nutné provést ve všech těchto podsestavách.

6.4.1. Úpravy v podsestavě rám

Podsestava rám je nosnou konstrukcí akumulátoru. Jde o svařenec čtyřhranných uzavřených profilů (jeklů) a plechů různých tlouštěk, ke kterému jsou uchyceny všechny ostatní podsestavy akumulátoru. Vzhledem k rozhodnutí, že zástavbová plocha akumulátoru má po úpravě zůstat zachována, nedošlo v konstrukci rámu k zásadním změnám. Jedinou úpravou je prodloužení pravého bočnicového plechu, a to z důvodu rozšíření kladkové dráhy na 200 mm. Toto prodloužení činí 110 mm. Upravená konstrukce rámu je patrná z obrázku 34.



Obrázek 34: Upravená konstrukce rámu akumulátoru

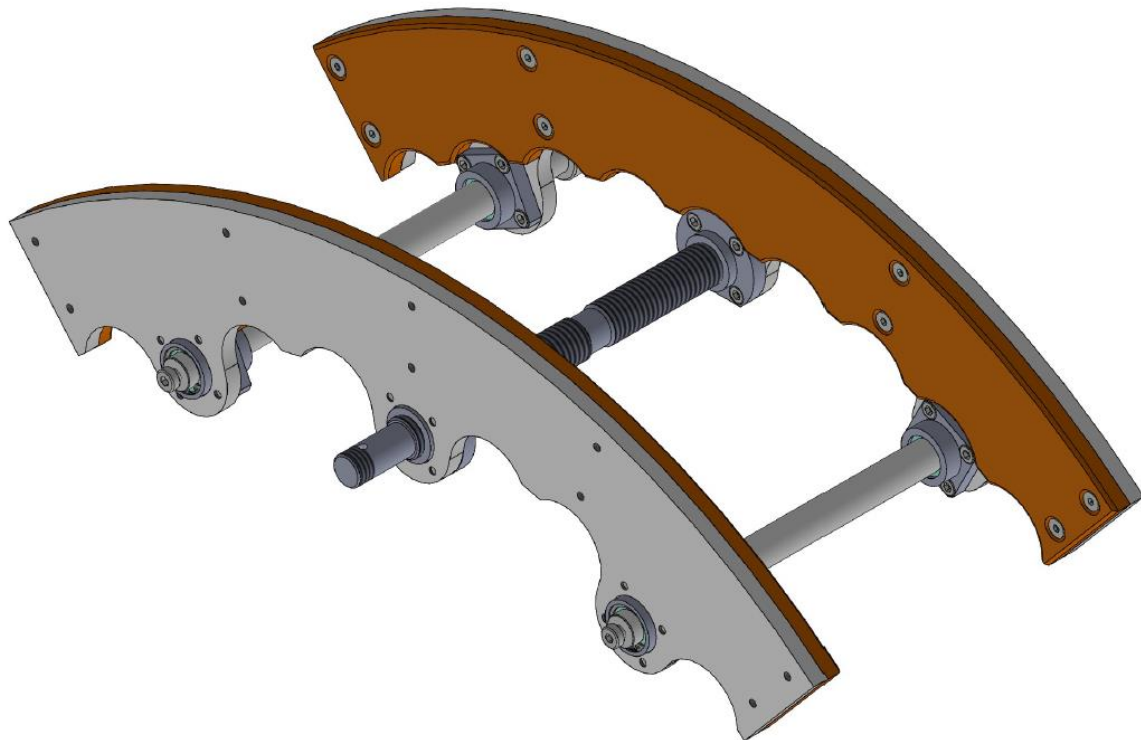
6.4.2. Úpravy v podsestavě vnitřní zvon

Hlavním dílem podsestavě vnitřní zvon je rotační součást o maximálním průměru 880 mm, ke které jsou uchyceny jednotlivé kladky vnitřní kladkové dráhy, na kterou se při akumulaci navijí vnitřní svitek pásky. Vnitřní zvon je pomocí šroubů pevně uchycen k rámu (během provozu nerotuje).

Úpravy v této podsestavě spočívaly zejména v prodloužení všech komponentů kladkové dráhy tak, aby byla uzpůsobena pro šířku pásky 200 mm. Sestava kladky je tvořena nosnou hřídelí (osou), která je pomocí šroubů pevně uchycena z jedné strany k vnitřnímu zvonu, z druhé strany k plechu mezikruhového průřezu. Osa je osazena jedním radiálním a jedním radiálně-axiálním kuličkovým ložiskem. Na tato ložiska je nasazena trubka, která se díky ložiskům může volně otáčet při průchodu pásky. Osa i trubka byly oproti výchozí konstrukci prodlouženy o 100 mm.

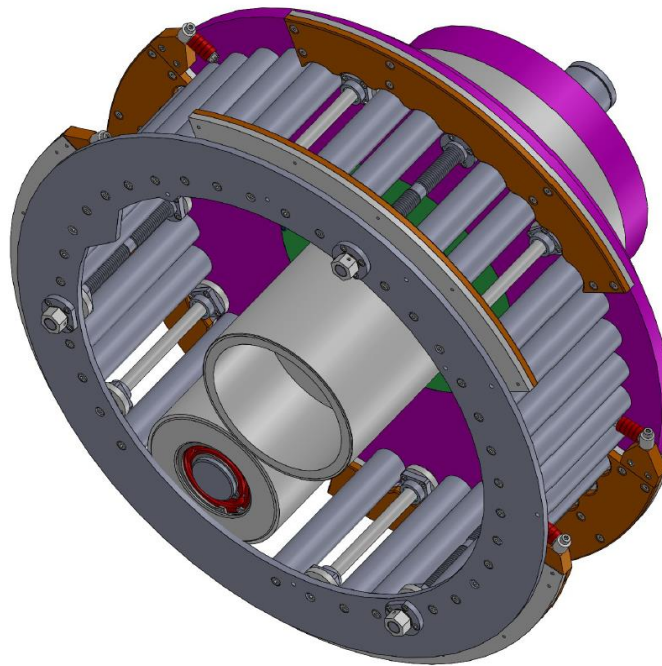
Dále je kladková dráha vybavena stranovým vedením. To je tvořeno plechy, z vnitřní strany obloženými silonem pro zamezení poškrábání hrany pásky. Plechy stranového vedení jsou osazeny na třech osách. Na bočních osách pomocí lineárního kluzného ložiska (tyto osy zajišťují vedení plechů a zamezují rotaci), na prostřední ose je spojení realizováno trapézovým šroubem, který má na straně levé desky levé stoupání, na straně pravé desky

pravé stoupání. Rotací této tyče je pak možné realizovat současné rozevírání nebo svírání vodících desek, přičemž páska vedená mezi deskami zůstává vycentrována na střed kladkové dráhy. Podsestava upraveného stranového vedení je patrná z následujícího obrázku 35. Úpravy v tomto případě spočívaly v prodloužení všech tyčí o 100 mm, aby bylo umožněno vedení pásky o šířce 200 mm. Vnitřní zvon je opatřen třemi různými sestavami stranového vedení, které se mezi sebou mírně liší tvarem desek. Princip i provedené úpravy jsou ale ve všech těchto podsestavách shodné.



Obrázek 35: Podsestava stranového vedení

Součástí podsestavy vnitřní zvon je dále vnitřní reverzní a hnací kladka. Rotaci hnací kladky zajišťuje elektromotor s převodem pomocí ozubeného řemene, umístěný na zadní straně akumulátoru. Reverzní kladka je nehnaná, podobně jako v případě kladek kladkové dráhy je tvořena osou osazenou ložisky a na nich nasazenou trubkou, což umožňuje volnou rotaci této kladky při průchodu pásky. Průměr těchto kladek nemohl být zvětšen z důvodu velice omezeného prostoru v tomto místě. Došlo tedy pouze k prodloužení těchto kladek tak, aby umožnily průchod pásky o šířce 200 mm. Upravená konstrukce podsestavy vnitřní zvon je patrná z následujícího obrázku 36.



Obrázek 36: Upravená konstrukce podsestavy vnitřní zvon

6.4.3. Úpravy v podsestavě vnější zvon

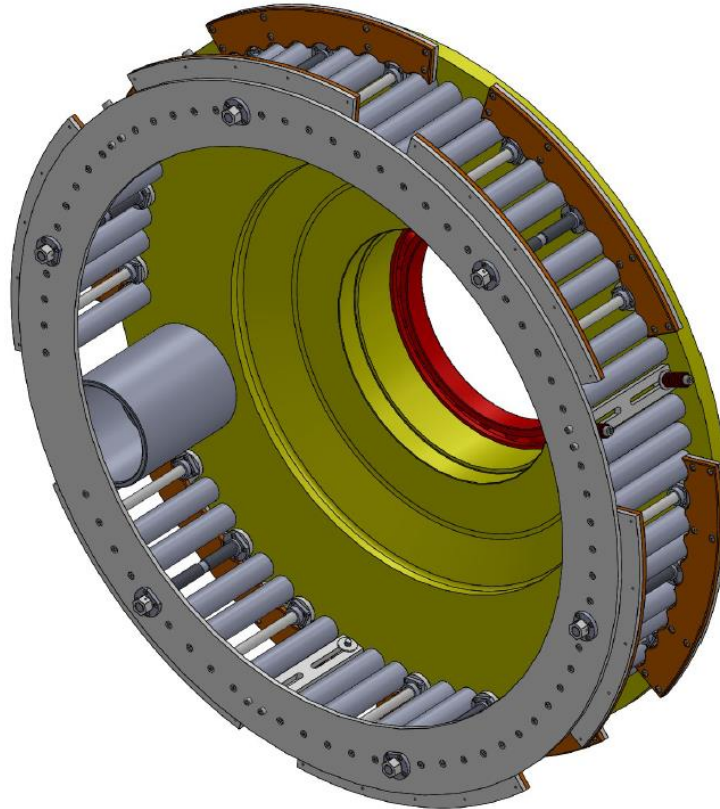
Podsestava vnější zvon je principiálně podobná podsestavě vnitřní zvon. Základem je také rotační součást, která má v tomto případě maximální průměr 1460 mm. K němu jsou pomocí šroubů uchyceny jednotlivé kladky vnější kladkové dráhy, které mají shodnou konstrukci s kladkami vnitřní dráhy. Kladková dráha vnějšího zvonu je také vybavena stranovým vedením, přizpůsobeným většímu průměru dráhy, ale na stejném principu jako vedení vnitřní.

Na rozdíl od podsestavy vnitřní zvon ale není vnější zvon stacionární, je třeba zajistit jeho rotaci. K tomu slouží dva motory, jeden s převodem pomocí ozubeného řemene, druhý pomocí ozubeného kola. Velká řemenice i velké ozubené kolo je umístěno přímo na obvodu vnějšího zvonu ze zadní strany akumulátoru. Uložení mezi vnějším a vnitřním zvonem je realizováno dvěma kuličkovými ložisky o vnějším průměru 520 mm.

Velké ozubené kolo je pomocí dalšího ozubeného kola spojené s vnější reverzní kladkou. Díky tomu je mechanicky zajištěna synchronizace rychlosti rotace zvonu a reverzní kladky, což je pro správný chod akumulátoru nezbytné.

Úpravy v této podsestavě spočívaly ve velmi podobných změnách jako v případě podsestavy vnitřní zvon. Došlo k prodloužení kladek kladkové dráhy, všech os stranového vedení a vnější reverzní kladky. Její průměr také vzhledem k velmi omezenému prostoru nebylo možné zvětšit. Vnější zvon je vybaven ještě jednoduchým, přídavným stranovým

vedením v podobě několika ložisek stažených k sobě šroubem a maticí, uchycených k příčné desce s oválnými dírami. Tato deska a oválné díry byly také prodlouženy. Upravená konstrukce vnějšího zvonu je na obrázku 37.



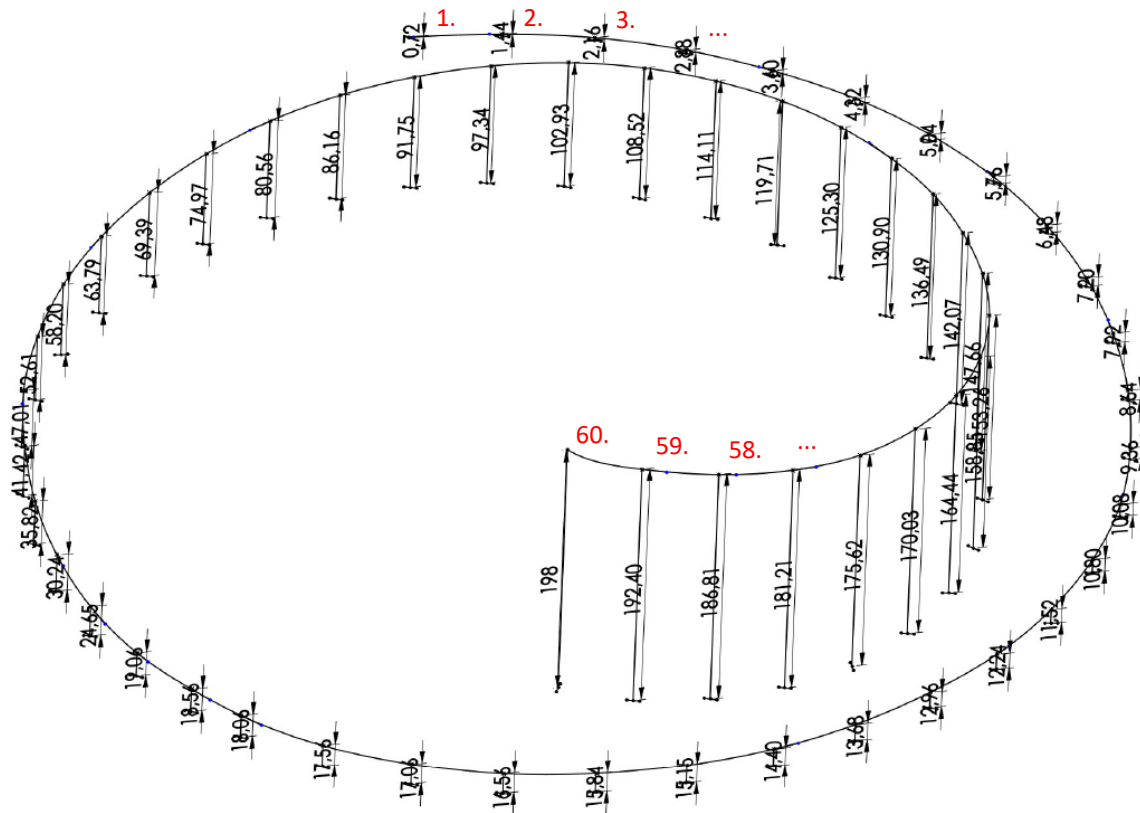
Obrázek 37: Upravená konstrukce vnějšího zvonu

6.4.4. Úpravy v podstavě šnek

Úprava konstrukce podstavě šnek se ukázala být nejvíce problematická. Tato podstava slouží k vyvedení pásy ze středu akumulátoru ven, aby mohla páska pokračovat dále do linky. Jde o jediné místo v celé lince, ve kterém se páska nepohybuje v konstantní nárysné rovině (při pohledu na linku zepředu), ale je třeba zajistit její 3D pohyb v prostoru (mezi rovinou, ve které se páska pohybuje od odvíjáku k akumulátoru a rovinou, ve které pokračuje dále do linky). Tento pohyb je potřeba zajistit co nejplynuleji, aby v pásce nedocházelo k nadměrnému ohybu a krutu, zároveň je ale potřeba dráhu „vměstnat“ do velmi omezeného prostoru, který je uprostřed akumulátoru k dispozici.

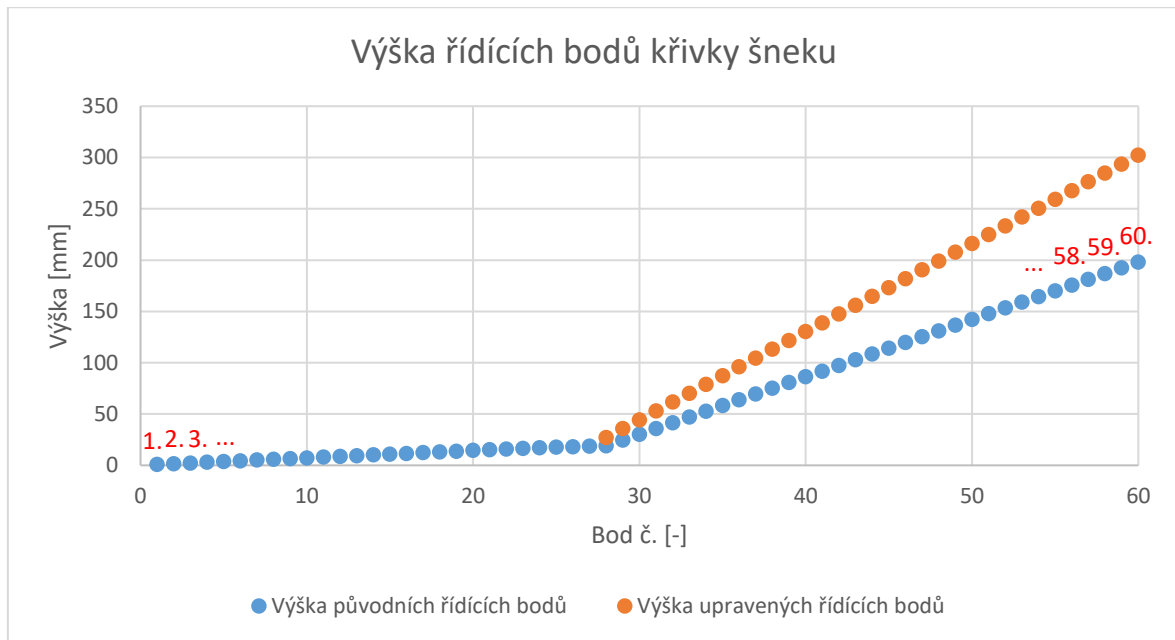
Tyto protichůdné požadavky způsobují, že páska se v tomto místě pohybuje po poměrně komplexní, obtížně popsatelné trajektorii. Při pohledu na akumulátor zepředu tento tvar nejvíce připomíná spirálu, která je však deformována tak, aby co nejlépe využívala místo, které je uvnitř akumulátoru k dispozici. Tento 2D tvar je následně vysunut do třetího rozměru, ale stoupání mezi jednotlivými body, které definují tuto křivku, není

konstantní. Vzniká tak křivka, kterou bychom mohli popsat jako „nedokonalá kuželová šroubovice s proměnným stoupáním“.



Obrázek 38: Řídící křivka výchozí konstrukce šneku

Vzhledem k tomu, že kladky dráhy musely být prodlouženy o 100 mm, bylo třeba také zvýšit celkové stoupání šneku o 100 mm. Šnek je definován 60 body, výšky těchto bodů od nulové roviny jsou v následujícím grafu 1 vyjádřeny modře. U počátečních bodů, mezi kterými je stoupání mírnější, nemohla být poloha bodů zvýšena, protože v cestě stojí reverzní kladka vnitřního zvonu. Navýšení tedy bylo provedeno pouze u následujících bodů, mezi kterými je stoupání strmější. Nové výšky bodů jsou v grafu označeny oranžovou barvou. Body byly následně proloženy křivkou (spline). Plech, do kterého jsou posléze osazeny jednotlivé kladky kladkové dráhy, je vytvořen tažením obdélníkového průřezu 60x10 mm po této křivce.

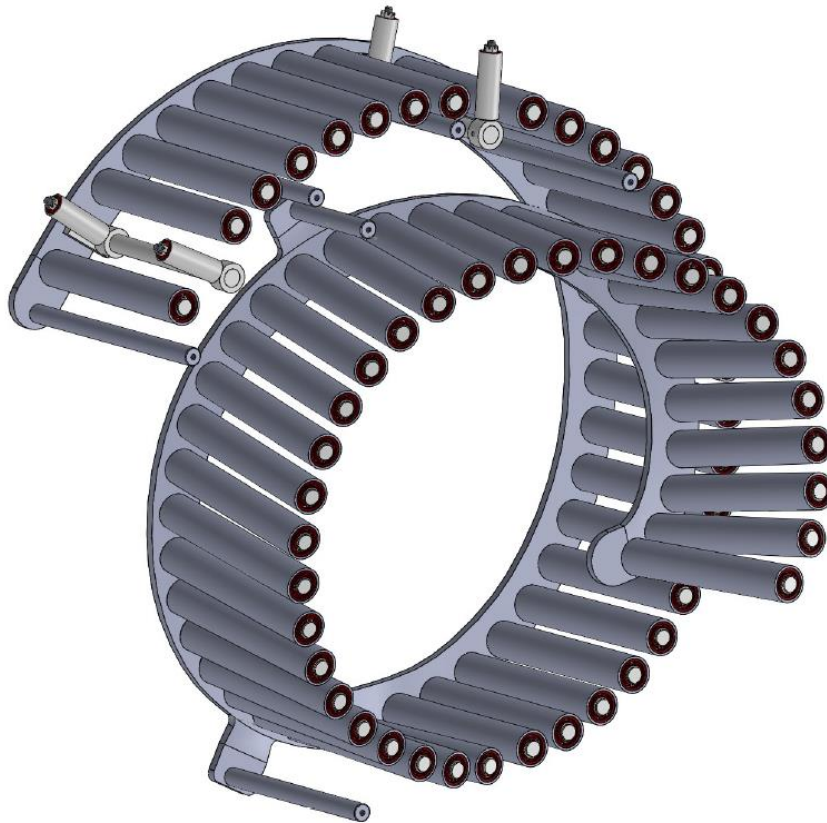


Graf 1: Výška řídicích bodů křivky šneku

Tato křivka byla také použita jako vodící křivka pro pole 60 děr pro šrouby M8. Tyto díry byly vytvořeny jako kolmé ke křivce a slouží k uchycení jednotlivých kladek kladkové dráhy k plechu šneku. Konstrukce kladky v podstavě šnek je mírně odlišná od kladek použitých pro buben a vnější zvon, má menší vnější průměr (40 mm) a je uchycena pouze ze strany plechu šneku.

Ve dvou místech je kladka nahrazena stranovým vedením pásky. To je zajištěné pomocí dvou menších stranových kladek, osazených na společnou příčnou tyč a zajištěných pomocí stavěcího šroubu. Díky tomu je jejich poloha volně nastavitelná po celé délce příčné tyče, což umožňuje libovolně upravovat polohu procházející pásky.

Plech šneku je k vnitřnímu zvonu uchycen pomocí 7 tyčí o průměru 20 mm. Délka tyčí je různá, závisí na výšce řídicí křivky šneku v daném místě tak, aby jejich druhý konec byl v konstantní rovině. Finální upravená konstrukce podstavě šnek je patrná z obrázku 39.



Obrázek 39: Upravená konstrukce podstavy Šnek

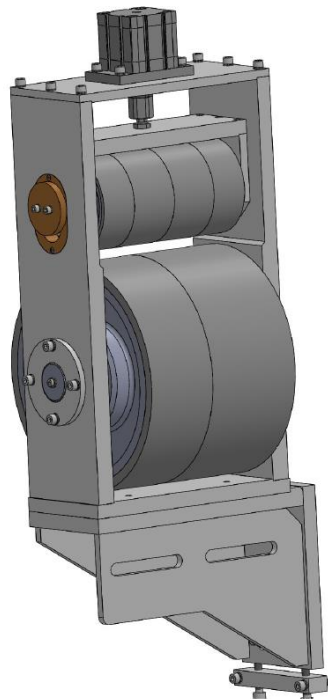
6.4.5. Úpravy v podstavě podávání levé

V podstavě levého podávání je hlavním komponentem hnací kladka, která ze spodní strany pásku pohání směrem do akumulátoru. Tato kladka je poháněna pomocí samostatného servomotoru. Hlavní hnací kladka je doplněna přítlačovou kladkou, ovládanou pneumatickým válcem, která na pásku působí tlakem z horní strany a zamezuje tak prokluzu pásky přes hnací kladku. Díky pneumatickému válci je přítlak možné nastavit nezávisle na tloušťce pásky, která se aktuálně v lince zpracovává.

Hlavní úpravou v této podstavě bylo zvětšení vnějšího průměru hnací kladky z 200 mm na 300 mm za účelem omezení plastické deformace pásky. Dále bylo třeba obě kladky rozšířit z původních 170 mm na 235 mm tak, aby byla sestava použitelná pro pásku o šířce 200 mm. V návaznosti na zvětšení průměru a šířky bylo potřeba úměrně zvýšit a rozšířit plechy, které tvoří rám této podstavy.

Další významnou úpravou je změna z kladky vyráběné na kladku nakupovanou, a to za účelem snížení nákladů. Vzhledem k tomu, že došlo ke zvětšení průměru, by se výroba kladek výrazně prodražila. Bylo zjištěno, že nákup vychází cenově výhodněji. Jelikož ale výrobce nenabízí kladky o dostatečné šířce, byla hnací kladka složena ze dvou, a přítlačová

kladka ze čtyř standardizovaných nakupovaných kladek. Upravená konstrukce podsestavy podávání levé je na obrázku 40.



Obrázek 40: Upravená konstrukce sestavy podávání

6.4.6. Úpravy v podsestavě napínací kladka levá

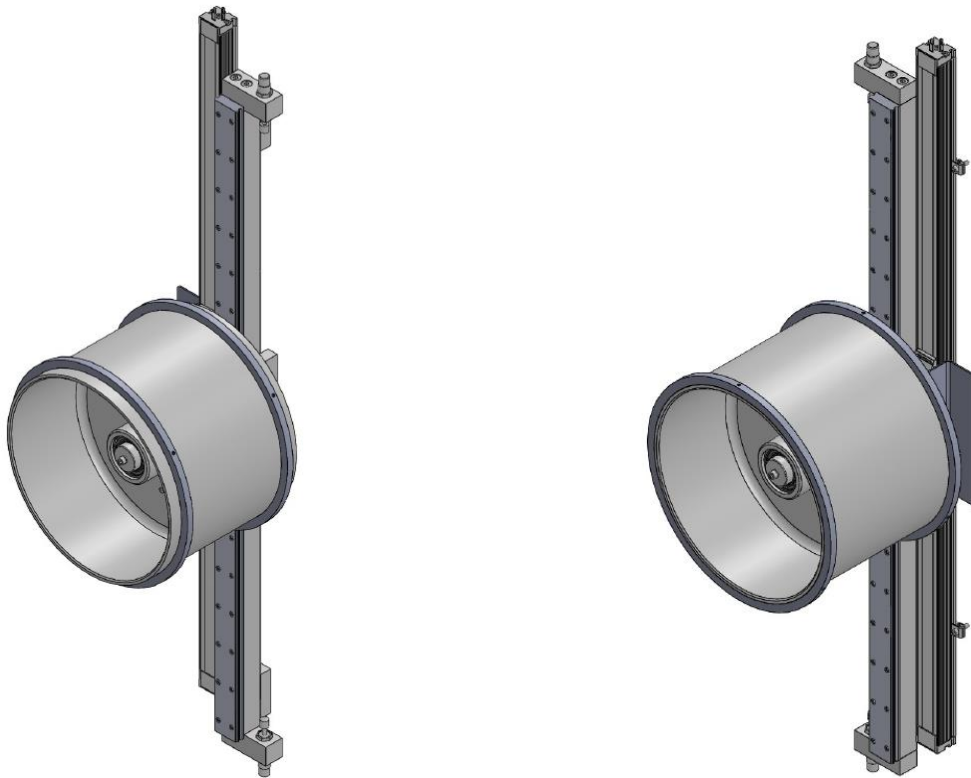
Levá napínací kladka slouží k napínání pásky na vstupu do akumulátoru. Samotná napínací kladka je pomocí kuličkových ložisek uložena na nosné hřídeli, která je umístěna na lineárním vedení od firmy Hiwin. To umožňuje kladce volný vertikální pohyb, a kladka tak svou hmotností pásku napíná.

Vertikální poloha kladky je kontinuálně snímána pomocí lineárního snímače od firmy Novotechnik. Informace ze snímače polohy slouží k řízení rychlosti servomotoru podávací kladky (pokud je napínací kladka v horní části, je třeba podávat pásku rychleji, pokud je v dolní části, podávání je třeba zpomalit). Lineární vedení je také vybaveno koncovými snímači polohy na horní i dolní straně, jejichž dosažení kladkou způsobí okamžité zastavení linky.

Úprava v této podsestavě spočívala ve zvětšení průměru napínací kladky z 210 mm na 300 mm a šířky kladky ze 150 na 230 mm. Vzhledem ke zvětšení průměru byla upravena i konstrukce kladky za účelem snížení její hmotnosti, a tedy i nákladů na výrobu. Páska je přes kladku stranově vedena pomocí obručí, jejichž poloha je libovolně nastavitelná pomocí stavěcích šroubů. Průměr obručí byl také upraven, aby odpovídal průměru nové kladky. Upravená konstrukce podsestavy levé napínací kladky je patrná z obrázku 41 (vlevo).

6.4.7. Úpravy v podsestavě napínací kladka pravá

Pravá napínací kladka slouží k napínání pásky na výstupu z akumulátoru. Princip, konstrukce i provedené úpravy jsou shodné s levou napínací kladkou. Jediným rozdílem je, že snímání polohy kladky je umístěno z pravé strany vedení z důvodu nedostatku místa na levé straně v tomto místě a také pro zachování symetričnosti konstrukce akumulátoru. Upravená konstrukce pravé napínací kladky je patrná z obrázku 41 (vpravo).



Obrázek 41: Upravená konstrukce levé napínací kladky (vlevo) a pravé napínací kladky (vpravo)

6.4.8. Úpravy v podsestavě podávání pravé

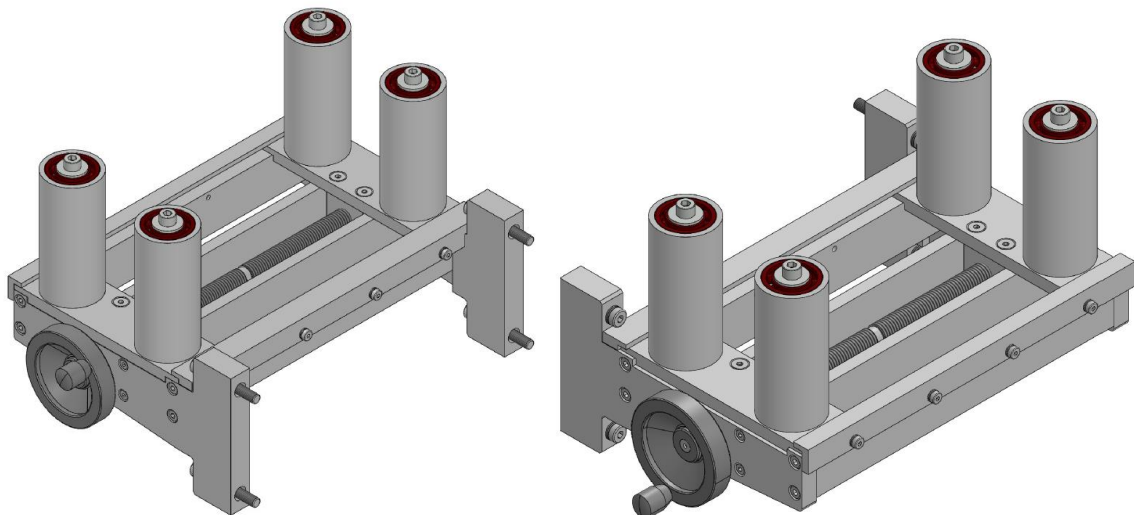
Pravé podávání slouží k pohánění pásky z akumulátoru dále do linky. Konstrukčně je zcela shodné s levým podáváním, proto i všechny provedené změny byly stejné, a upravenou konstrukci je tak možné vidět na obrázku 40.

6.4.9. Úpravy v podsestavě seřizování pásu

Seřizování pásu slouží ke stranovému vedení pásky na výstupu z akumulátoru (je umístěno za pravou hnací kladkou). Zajišťuje vycentrování pásky na osu linky, což je základem pro správné zformování trubky ve formovací sekci linky. Stranové vedení je zajišťováno v původní konstrukci pomocí 6 kladek, 3 z každé strany pásky. Svírání a rozevírání vodících kladek je zajišťováno pomocí hřídele s levým závitem na straně levých kladek a pravým závitem na straně pravých kladek, stejně jako v případě stranového vedení v sestavách vnitřní a vnější zvon.

První úprava této podsestavy spočívala ve vyřazení třetí dvojice kladek, která se na základě zkušeností se stranovým vedením pásky na jiných linkách ukázala jako nadbytečná. Další úpravou bylo prodloužení závitové části hřídele z původních 144 mm na 248 mm, tak aby bylo možné seřizování použít pro pásku do šířky 200 mm. Úměrně těmto změnám byl upraven rám podsestavy. Pro usnadnění seřizování byla také hřídel opatřena klikou. Konstrukce upraveného seřizování pásu na výstupu z akumulátoru je patrná z obrázku 42 (vpravo).

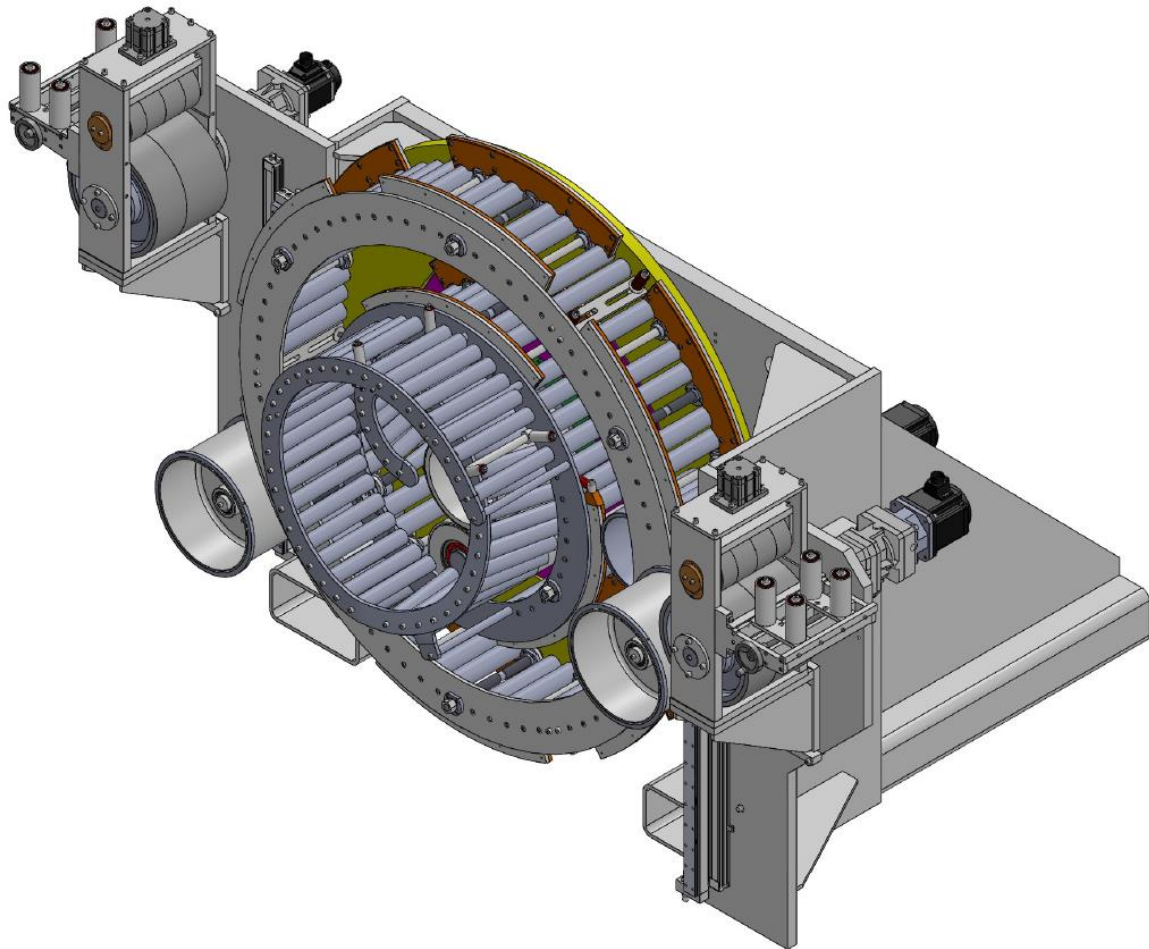
Na základě zkušeností z provozu výchozího akumulátoru bylo seřizování pásu přidáno i na vstup do akumulátoru od odvíjáku, kde ve výchozí konstrukci nebylo. Důvodem je, že při odvíjení pásky z odvíjáku vzniká průvěš, který volně visí v prostoru, a je tak lepší stranovou polohu pásky usměrnit ještě před jejím vstupem do akumulátoru (obrázek 42 vlevo).



Obrázek 42: Upravená konstrukce seřizování pásu na vstupu (vlevo) a na výstupu (vpravo)

7. Ověření funkčnosti upravené konstrukce akumulátoru

Upravená konstrukce akumulátoru po sestavení všech dílčích podsestav je patrná z následujícího obrázku 43. Tuto sestavu bylo nutné ověřit z hlediska funkčnosti provedených úprav. V první fázi bylo vizuálně zkontrolováno, že v rámci celkové sestavy akumulátoru nedochází ke kolizím jednotlivých podsestav, a to jak stacionárních podsestav, tak i těch, u kterých během provozu dochází k rotačnímu nebo posuvnému pohybu.

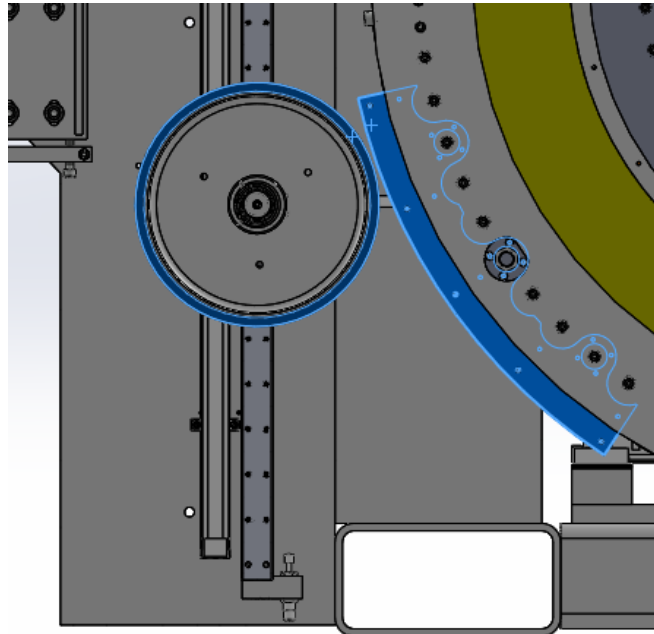


Obrázek 43: Upravená konstrukce akumulátoru

Z vizuální analýzy vyplynulo, že ke kolizi by mohlo dojít mezi levou (vstupní) napínací kladkou a stranovým vedením vnějšího zvonu, a to z důvodu zvětšení průměru napínací kladky z 200 na 300 mm (obrázek 44). Řešením by mohlo být prodloužení levého plechu rámu akumulátoru a posunutí napínací i hnací kladky a stranového vedení směrem vlevo. Tím by ale vzrostla celková délka akumulátoru, což není možné, protože rozvržení celé linky je již pevně dané a prodlužování jednotlivých sekcí tak není možné.

Na základě zkušeností s provozem akumulátoru původní konstrukce však bylo zjištěno, že délka lineárního vedení vstupní napínací kladky je předimenzovaná, reálný vertikální pohyb napínací kladky během provozu je výrazně menší než délka lineárního

vedení. Bylo tedy rozhodnuto, že se zkrátí funkční délka lineárního vedení, a tedy dojde pouze k úpravě polohy koncového čidla tak, aby ke kolizi nemohlo dojít.

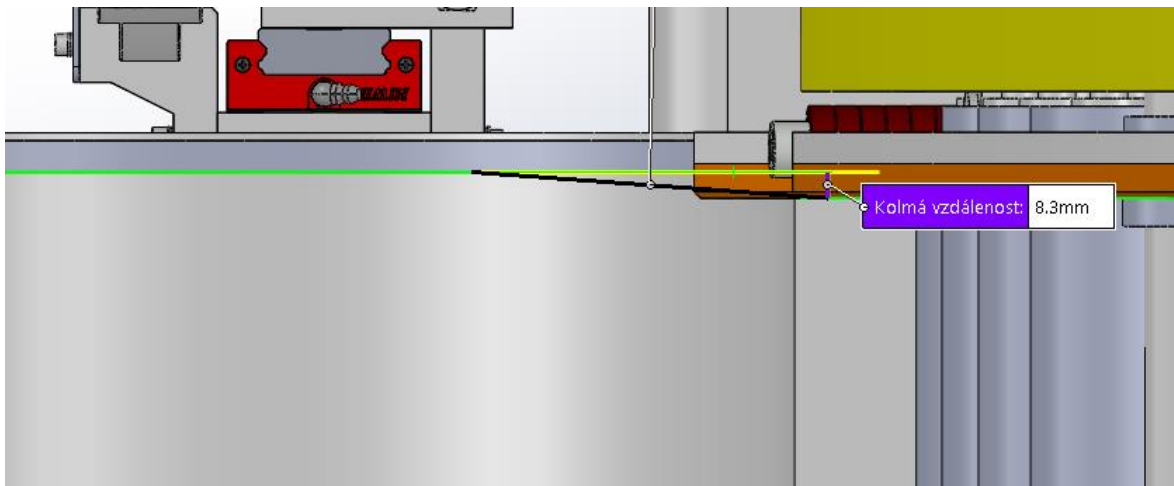


Obrázek 44: Riziko kolize mezi levou napínací kladkou a stranovým vedením vnějšího zvonu

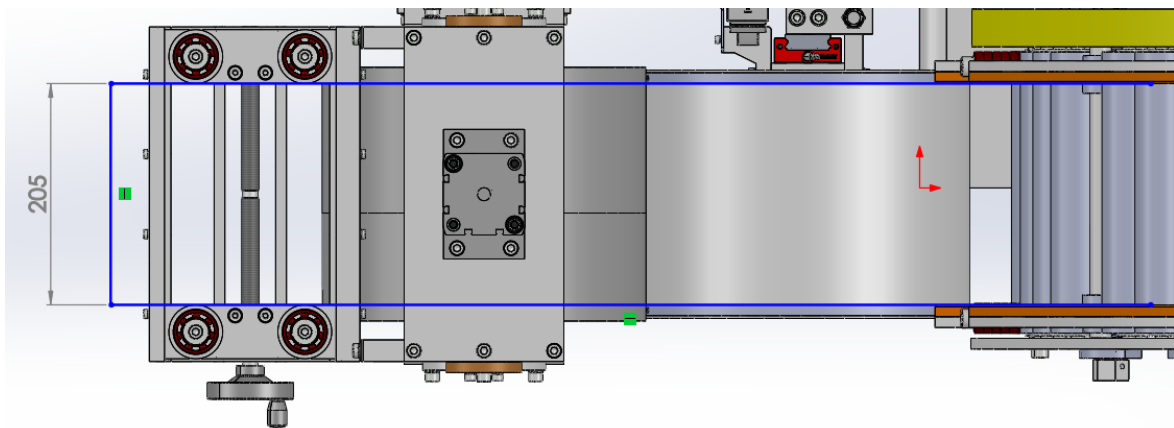
7.1. Ověření použitelnosti upraveného akumulátoru pro pásku o šířce 200 mm

Dále byla provedena kontrola, zda akumulátor bude použitelný pro pásku o šířce 200 mm. Ověření přípustné šířky pásky proběhlo nastavením všech stranových vedení na vzdálenost 205 mm (200 mm šířka pásky + 5 mm rezerva). Bylo ověřeno, že všechna stranová vedení mají minimálně tento rozsah.

Následně proběhla kontrola, zda je průchod pásky akumulátorem plynulý. To bylo provedeno měřením vzdálenosti mezi jednotlivými stranovými vedeními, které dohromady tvoří trasu průchodu pásky akumulátorem. Zde byl zjištěn nesoulad v rovinách stranového vedení. Rovina, kterou hrany pásky prochází přes vstupní seřizování pásu a hnací a napínací kladku je o 8,3 mm odsazena od roviny, kterou hrany pásky prochází přes vnější a vnitřní zvon (obrázek 45). Došlo proto k prodloužení délky levého bočnicového plechu rámu akumulátoru o stejnou vzdálenost, čímž došlo ke korekci průchodu pásky vstupní částí akumulátoru (obrázek 46). Jiné nesrovnalosti v průchodu pásky upravenou konstrukcí akumulátoru nebyly zjištěny.



Obrázek 45: Nesoulad mezi rovinami stranového vedení (pohled shora)



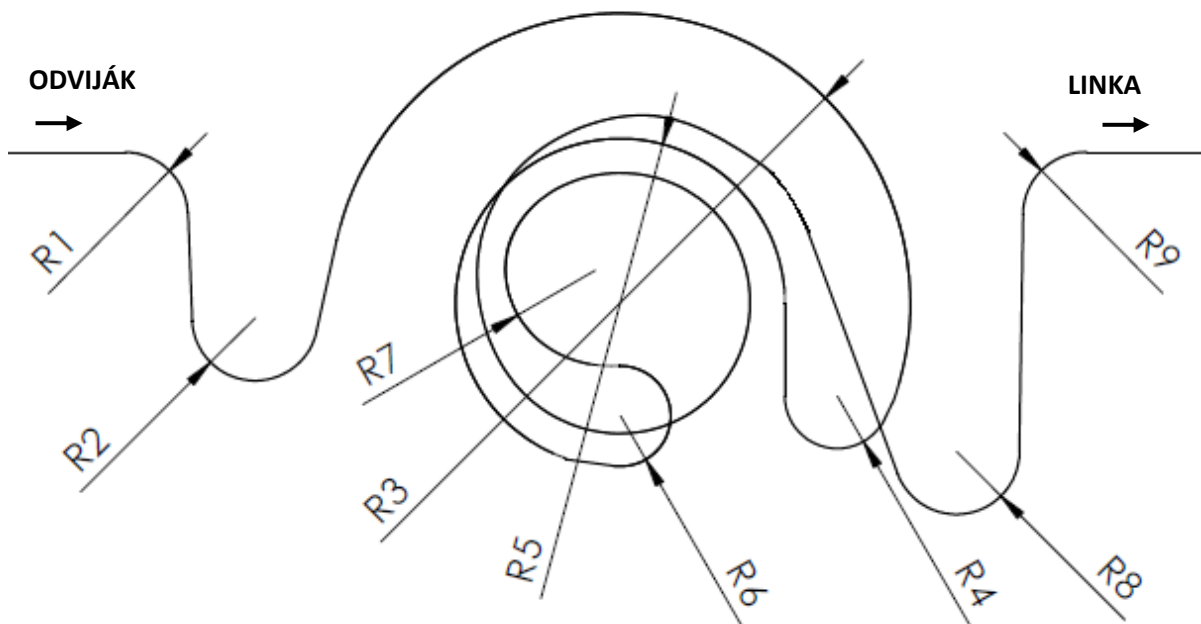
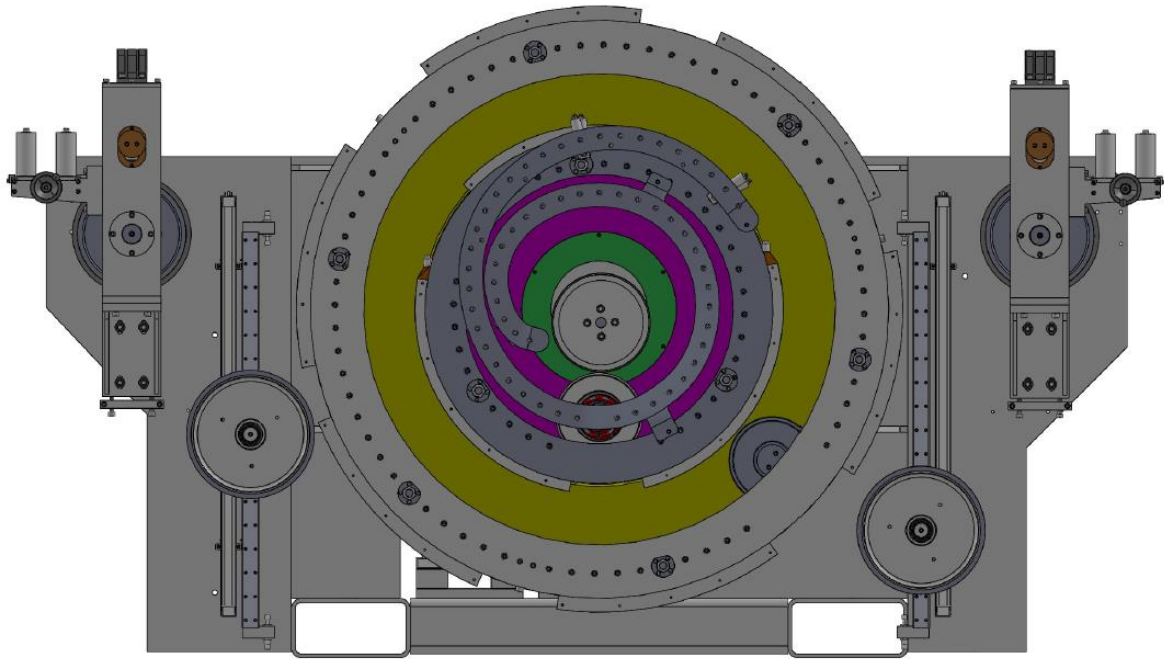
Obrázek 46: Znáznornění průchodu pásy vstupní částí akumulátoru po korekci (pohled shora)

7.2. Ověření konstrukce upraveného akumulátoru z hlediska plastické deformace pásy

Průchod pásy upravenou konstrukcí akumulátoru je patrný z obrázku 47, tabulka 15 pak shrnuje jednotlivé poloměry ohybu pásy při průchodu upraveným akumulátorem.

Označení rádiusu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Poloměr ohybu [mm]	150	150	692,5	110	392,5	110	220	150	150

Tabulka 15: Rádiusy ohybu pásy při průchodu upravenou konstrukcí akumulátoru



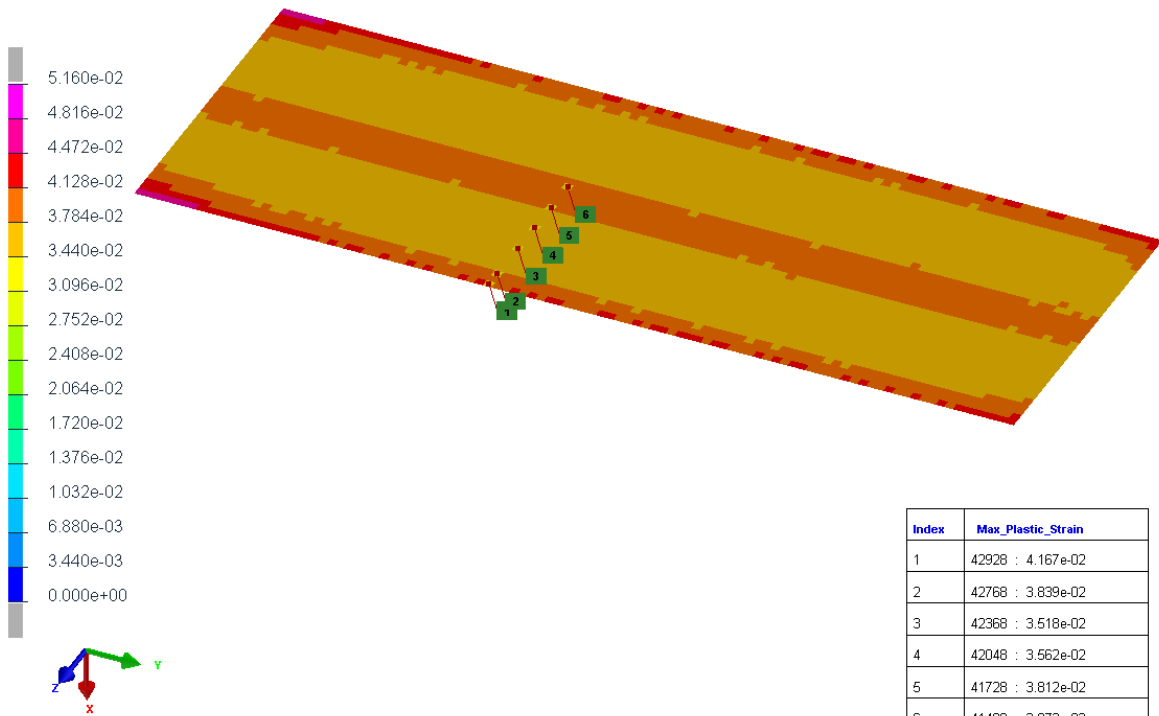
Obrázek 47: Trasa průchodu pásky upravenou konstrukcí akumulátoru

Dle skutečné trasy průchodu pásky upravenou konstrukcí akumulátoru byla následně upravena i trasa použitá pro MKP simulaci. Stejně jako při analýze trasy průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru byla z každého poloměru ohybu využita pouze část. Všechny použité materiálové vlastnosti také zůstaly stejné (páska z materiálu W.Nr. 1.4309 o tloušťce stěny 1,2 mm, modul pružnosti $E=220\,000$ MPa, Poissonovo číslo $\mu=0,28$ a hustota materiálu $\rho=7850$ kg/m³). Výsledek simulace plastické deformace pásky po průchodu upravenou konstrukcí akumulátoru je patrný z následujícího obrázku 48, výsledek napětí Von Mises z obrázku 49. [33]

EXPLICIT_SIMULATION

SHELL : Max_Plastic_Strain
Min = 0 at Ele 40057
Max = 0.0516006 at Ele 4956

245 / 12200.000000

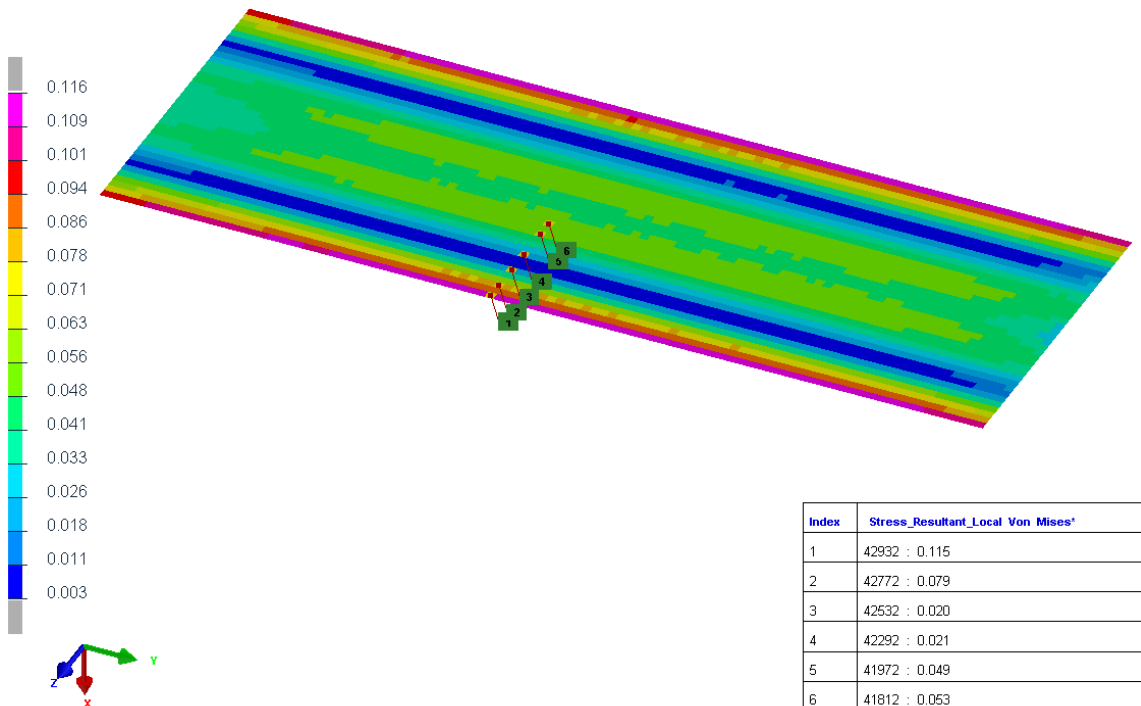


Obrázek 48: Výsledky plastické deformace pásky po průchodu upravenou konstrukcí akumulátoru [33]

EXPLICIT_SIMULATION

SHELL : Stress_Resultant_Local Von Mises*
Min = 0.00303433 at Ele 1971
Max = 0.116208 at Ele 40127

245 / 12200.000000



Obrázek 49: Výsledky zbytkového mechanického napětí pásky podle Von Mises po průchodu pásky upravenou konstrukcí akumulátoru [33]



Z MKP simulace vyplývá, že úpravou konstrukce akumulátoru klesla maximální hodnota plastické deformace na hodnotu $\varepsilon=0,042$. To představuje pokles přibližně o 25 % proti výchozí konstrukci akumulátoru.

8. Závěr

Diplomová práce se zabývala akumulátorem plechové pásky jako jedním z prostředků sloužících ke zvýšení produktivity výroby profilovacích linek.

První část práce se soustředila na profilovací linku a její součásti. Byly zde popsány jednotlivé sekce linky a jejich funkce při procesu výroby trubek a profilů. Druhá část práce se zabývala samotnými akumulátory. Byl zde popsán základní princip, na kterém všechny typy akumulátorů pracují, a dále pak jednotlivé konstrukční varianty akumulátorů pásky od nejjednodušších až po nejkomplovnější.

Další část práce se zabývala problematikou plastické deformace se zaměřením na ohyb profilu obdélníkového průřezu, což je druh deformace, ke kterému dochází během průchodu pásky akumulátorem. Byl zde mimo jiné popsán princip vzniku elastického jádra a plastického obalu při ohybu. Výpočet výšky elastického jádra byl následně použit v praktické části práce při analýze průchodu pásky akumulátorem.

Následující praktické části diplomové práce se zabývaly aplikací akumulátoru pásky do konkrétní profilovací linky, určené na výrobu nerezových, laserem svařovaných trubek. Z jednotlivých konstrukčních provedení popsaných v teoretické části práce se jako nejvhodnější pro tuto linku ukázal být vertikální G-akumulátor. V první fázi bylo třeba zjistit, zda se poměrně vysoká investice do akumulátoru pro tuto konkrétní linku vyplatí. Bylo zjištěno, že zařazením akumulátoru do linky se zvýší produktivita výroby přibližně o 10 % a díky tomu vzroste roční cash flow přibližně o 3,7 mil. Kč. To při odhadovaných nákladech na pořízení akumulátoru 4,2 mil. Kč představuje dobu návratnosti investice cca 1,2 roku. Vzhledem k tomu, že profilovací linky bývají v provozu desítky let, bylo rozhodnuto o zařazení G-akumulátoru do této linky.

Konstrukce G-akumulátoru sice v zadávající firmě již existovala, ale byla určena pro linku zpracovávající pásku o nižší tloušťce i šířce. Bylo proto třeba konstrukci upravit tak, aby byla použitelná i pro aplikaci do vyvíjené linky s názvem TA-2. Potřebné úpravy konstrukce byly rozděleny do tří kategorií – úpravy za účelem zvýšení přípustné šířky pásky na 200 mm, úpravy za účelem omezení plastické deformace pásky při průchodu akumulátorem a další úpravy a vylepšení konstrukce.

Z teoretických výpočtů bylo zjištěno, že upravit konstrukci akumulátoru tak, aby při průchodu pásky k plastické deformaci vůbec nedocházelo, je nereálné, protože by se celá konstrukce neúnosně zvětšila. Bylo proto zadáno zpracování MKP simulace průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru, ze které vyplynulo, že plastická deformace pásky způsobená průchodem pásky akumulátorem není v porovnání s plastickými deformacemi způsobenými tvářením trubky tak zásadní. Bylo proto přijato rozhodnutí, že za účelem

omezení plastické deformace pásky dojde pouze k takovým úpravám, které neztvrdí celkovou zástavbovou plochu akumulátoru.

Další část se zabývala konkrétními provedenými úpravami konstrukce. Sestava akumulátoru se skládá z 9 hlavních podsestav a ve všech bylo třeba provést více či méně zásadní úpravy, které zde byly popsány.

V poslední části práce bylo provedeno konstrukční ověření funkčnosti upravené konstrukce. Bylo ověřeno, že v upravené konstrukci akumulátoru nedochází ke kolizím mezi jednotlivými podsestavami a že dohromady tvoří plynulou trasu pro průchod pásky o maximální šířce 200 mm. Pomocí MKP simulace bylo zjištěno, že provedenými úpravami klesla maximální hodnota plastické deformace pásky po průchodu akumulátorem přibližně o 25 % v porovnání s výchozí konstrukcí.

Diplomová práce vyřešila zapojení nejvhodnějšího typu akumulátoru (G-akumulátor) do konkrétní profilovací linky. Lze konstatovat, že upravená konstrukce akumulátoru pro šířku pásky max. 200 mm a tloušťku pásky 0,3-1,2 mm má předpoklady k tomu, aby byla funkční součástí profilovací linky s názvem TA-2, jejíž výroba a zprovoznění je plánované na druhou polovinu roku 2023.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotka	Význam
σ	[N/mm ²]	Napětí ve vzorku
F	[N]	Zatěžovací síla
S	[mm ²]	Aktuální plocha průřezu vzorku
S_0	[mm ²]	Původní plocha průřezu vzorku
E	[-]	Poměrná deformace
ΔL	[mm]	Absolutní prodloužení zkoušeného vzorku
L	[mm]	Aktuální délka vzorku
L_0	[mm]	Původní délka vzorku
E	[N/mm ²]	Youngův modul pružnosti
ϵ_{pl}	[-]	Plastická složka poměrné deformace
ϵ_{el}	[-]	Elastická složka poměrné deformace
M_O	[N·mm]	Ohybový moment
T	[N]	Posouvající síla
σ_{max}	[N/mm ²]	Maximální napětí
σ_k, R_p	[N/mm ²]	Napětí na mezi kluzu
J_z	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu k ose z
e	[mm]	Maximální vzdálenost od neutrální osy
W_O	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu
h	[mm]	Výška profilu
b	[mm]	Šířka profilu
a	[mm]	Výška elastického jádra
M_{Okr}	[N·mm]	Kritický ohybový moment
M_{Oel-pl}	[N·mm]	Elasto-plastický ohybový moment
M_{Oel}	[N·mm]	Moment přenášený elastickým jádrem
M_{Opl}	[N·mm]	Moment přenášený plastickým obalem
W_{Oel-pl}	[mm ³]	Elasto-plastický průřezový modul v ohybu
z	[mm]	Vzdálenost vlákna od neutrální osy
R_n	[mm]	Poloměr ohybu neutrální osy
ϕ	[rad]	Vrcholový úhel vytknutého elementu
x	[mm]	Délka neutrálního vlákna ve vytknutém elementu
T_T	[°C]	Teplota tání materiálu
τ	[N/mm ²]	Smykové napětí
τ_{kr}	[N/mm ²]	Kritické smykové napětí
G	[N/mm ²]	Modul pružnosti ve smyku
DN	[let]	Doba návratnosti investice
IN	[Kč]	Předpokládané investiční náklady
EF	[Kč]	Efekt investice (zvýšení ročního cash flow)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Příklad rozvržení profilovací linky bez akumulátoru (foto).....	2
Obrázek 2: Příklad rozvržení profilovací linky bez akumulátoru (výkres) [1].....	2
Obrázek 3: Dvojitě odvíjecí zařízení [3]	3
Obrázek 4: Zařízení nastavení pásky (poloautomatické provedení).....	4
Obrázek 5: Konstrukce formovacího pořadí (vlevo) a návrh tvaru formovacích průchodů (vpravo) [7]...	5
Obrázek 6: Svařovací sekce pro laserové svařování [10]	6
Obrázek 7: Jednotka letmého dělení kotoučovou pilou [13]	8
Obrázek 8: Znázornění fází provozu akumulátoru (1. fáze – plnění, 2. fáze – naplnění, 3. fáze – vyprazdňování, 4. fáze – synchronizace)	10
Obrázek 9: Profilovací linka s akumulátorem typu horizontální smyčka [13].....	12
Obrázek 10: Princip „festoon“ akumulátoru [15]	13
Obrázek 11: Smyčkový vertikální akumulátor [16]	14
Obrázek 12: Klasický horizontální akumulátor [17]	15
Obrázek 13: Princip horizontálního akumulátoru (pohled shora)	15
Obrázek 14: Horizontální „free loop“ akumulátor [17]	17
Obrázek 15: Princip horizontálního „free loop“ akumulátoru (pohled shora)	17
Obrázek 16: Konstrukce vertikálního „free loop“ akumulátoru [20].....	18
Obrázek 17: Princip vertikálního „free loop“ akumulátoru (pohled zepředu)	19
Obrázek 18: Konstrukce vertikálního G-akumulátoru [22].....	20
Obrázek 19: Princip vertikálního G-akumulátoru (pohled zepředu).....	21
Obrázek 20: Tahový diagram běžné uhlíkové oceli [25]	23
Obrázek 21: Plastická a elastická složka deformace [25].....	24
Obrázek 22: Tahový diagram pro ideální model (vlevo) a model s lineárním zpevněním (vpravo) [25] .	24
Obrázek 23: Rozložení ohybového napětí v profilu namáhaném ohybovým momentem [24].....	25
Obrázek 24: Přejít z elastického do plasticko-elastického a plně plastického stavu [25]	26
Obrázek 25: Prodloužení libovolného vlákna při ohybu profilu [26] (upraveno)	28
Obrázek 26: Deformace skluzem na dokonalé krystalové mřížce (vlevo) a deformace (protažení) krystalu (vpravo) [27]	30
Obrázek 27: Deformace dvojčatením na dokonalé krystalové mřížce (vlevo) a při deformaci krystalu (vpravo) [27] [28].....	31
Obrázek 28: Výchozí konstrukce akumulátoru	38
Obrázek 29: Trasa průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru	39
Obrázek 30: Zjednodušená trasa pásky použitá pro MKP simulaci [33]	42
Obrázek 31: Výsledky plastické deformace pásky po průchodu výchozí konstrukcí akumulátoru [33] ..	43
Obrázek 32: Výsledky zbytkového mechanického napětí pásky podle Von Mises po průchodu pásky výchozí konstrukcí akumulátoru [33]	43
Obrázek 33: Plastická deformace trubky při posledním kroku formování [33].....	44
Obrázek 34: Upravená konstrukce rámu akumulátoru	46
Obrázek 35: Podsestava stranového vedení.....	47
Obrázek 36: Upravená konstrukce podsestavy vnitřní zvon	48
Obrázek 37: Upravená konstrukce vnějšího zvonu	49
Obrázek 38: Řídící křivka výchozí konstrukce šneku.....	50
Obrázek 39: Upravená konstrukce podsestavy šnek.....	52
Obrázek 40: Upravená konstrukce sestavy podávání.....	53
Obrázek 41: Upravená konstrukce levé napínací kladky (vlevo) a pravé napínací kladky (vpravo)	54
Obrázek 42: Upravená konstrukce seřizování pásu na vstupu (vlevo) a na výstupu (vpravo).....	55
Obrázek 43: Upravená konstrukce akumulátoru.....	56
Obrázek 44: Riziko kolize mezi levou napínací kladkou a stranovým vedením vnějšího zvonu	57
Obrázek 45: Nesoulad mezi rovinami stranového vedení (pohled shora)	58
Obrázek 46: Znázornění průchodu pásky vstupní částí akumulátoru po korekci (pohled shora).....	58
Obrázek 47: Trasa průchodu pásky upravenou konstrukcí akumulátoru	59



Obrázek 48: Výsledky plastické deformace pásky po průchodu upravenou konstrukcí akumulátoru [33]	60
Obrázek 49: Výsledky zbytkového mechanického napětí pásky podle Von Mises po průchodu pásky upravenou konstrukcí akumulátoru [33]	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní parametry linky TA-2 [29]	32
Tabulka 2: Srovnání konstrukčních typů akumulátoru [16] [21] [29]	33
Tabulka 3: Zvýšení produktivity výroby zařazením akumulátoru pásky	34
Tabulka 4: Základní údaje o výrobě trubek (s akumulátorem a bez akumulátoru)	35
Tabulka 5: Předpokládané roční výnosy	35
Tabulka 6: Předpokládané roční náklady na materiál (páska W.Nr. 1.4404)	36
Tabulka 7: Předpokládané roční náklady na energii	36
Tabulka 8: Předpokládané roční osobní náklady	36
Tabulka 9: Předpokládané roční náklady na technické plyny	37
Tabulka 10: Předpokládané ostatní provozní náklady	37
Tabulka 11: Shrnutí předpokládaných ročních výnosů a nákladů	37
Tabulka 12: Rádiusy ohybu pásky při průchodu výchozí konstrukcí akumulátoru	40
Tabulka 13: Hodnoty meze kluzu a modulu pružnosti pro uvažované jakosti materiálu [30] [31] [32]	40
Tabulka 14: Výška elastického jádra pro jednotlivé rádiusy ohybu pásky při průchodu akumulátorem	40
Tabulka 15: Rádiusy ohybu pásky při průchodu upravenou konstrukcí akumulátoru	58

Seznam grafů

Graf 1: Výška řídicích bodů křivky šneku	51
--	----

Bibliografie

- [1] ATTL A SPOL. S.R.O. *Layout linky SPL 0,6-12/90/70/10/2PB*. 7. verze. Praha: Attl a spol. s.r.o., 2021.
- [2] *Decoiling, Straightening, Feeding, Accumulating, Rewinding, Traversing* [online]. Grenchen, Switzerland: SOPREM Automation AG, 2017 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://konturatools.cz/images/produkty/prilohy/2017-10-23-15-34-48-gesamtkatalog-e-2017-mail.pdf>
- [3] *Dvojitý odviják: výkres č. 076388*. Frýdek-Místek: ITS BENDA, 2020.
- [4] *Coil End Welders* [online]. North Royalton, USA: Kent Corporation [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.kentcorporation.com/products/entry-equipment/coil-end-welders/>
- [5] HALMOS, George, ed. *Roll Forming Handbook*. 1. vydání. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8247-9563-6.
- [6] HEJNIC, Josef. *Moderní postup návrhu procesu profilování*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [7] *COPRA RF Tubes* [online]. Valley, Germany: Data M Sheet Metal Solutions GmbH, 2017 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://cdn.datam.de/fileadmin/copra.info/Brochures/Brochure-COPRA-RF-Tubes-02-EN.pdf>
- [8] NIEDZWECKI, Henry. Exploring the welded tube making process: The basics for fabricators. *The Fabricator* [online]. 2001 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/tubepipeproduction/exploring-the-welded-tube-making-process-the-basics-for-fabricators>
- [9] MUŽÍK, Tomáš a Grzegorz SIKORSKI. Laser welding in tube production. *Laser Focus World* [online]. [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14215754/laser-welding-in-tube-production>
- [10] *Svařovací uzel LP: výkres č. 23502-00*. Praha: Attl a spol. s.r.o., 2020.
- [11] ČSN EN 10217: *Svařované ocelové trubky pro tlakové účely - Technické dodací podmínky*. 12/2021. Brusel, Belgie: Evropský výbor pro normalizaci, 2021.
- [12] ALBERTO, Caletti. Cutoff choices for tube, pipe producers. *The Tube & Pipe Journal* [online]. 2013 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/cutoff-choices-for-tube-pipe-producers>
- [13] *Katalog produktů: Válcovací linky a jejich komponenty* [online]. In: . Praha: Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje, 2012 [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: https://www.attl.cz/dokumenty/kompletni_katalog-cz.pdf

- [14] COSTELLO, Rick. Accumulating strip before the mill: An introduction to entry end equipment. *The Tube & Pipe Journal* [online]. 2001 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/accumulating-strip-before-the-mill>
- [15] *Festoon Web Accumulator* [online]. Paxinos, USA: U.S. Webcon [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <http://www.uswebcon.com/festoonwebaccumulator.htm>
- [16] *Accumulators*. North Royalton, USA: Kent Corporation, 2002.
- [17] *Strip Accumulators* [online]. Borgonovo, Italy: Olimpia 80 [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: http://www.olimpia80.com/?page_id=2216&lang=en
- [18] ABBEY, Nelson D. *Strip Accumulator*. 1996. USA. US005529257A. Zapsáno 25.06.1996.
- [19] LATOUR, Herry a George MILLER. *Compact Strip Accumulator*. 1970. USA. 3506210. Zapsáno 14.04.1970.
- [20] *Entry Section: FR22 Vertical Accumulator* [online]. Cassola, Italy: MTC Bamieh srl, 2019 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.mtcbamieh.com/entry-section/>
- [21] *Strip Accumulators* [online]. Seligenstadt, Germany: Templet Deutschland, 2020 [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <https://www.templet.de/en-gb/bandspeicher#ROTAMAT>
- [22] *Mill Entry Section: Strip Vertical Accumulator for Laser Mills* [online]. Borgonovo, Italy: Olimpia 80 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: http://www.olimpia80.com/?page_id=2262&lang=en
- [23] SOBOTOVÁ, Jana. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [24] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-800-1042-243.
- [25] ŘEZNÍČEK, Jan. *Pružnost a pevnost II: Technická plasticita*. Praha, 2015. Přednášky. FS ČVUT.
- [26] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 2. vydání. New York: Industrial Press Inc., 2014. ISBN 0831131829.
- [27] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1999. ISBN 80-010-1507-6.
- [28] ČADA, Radek. *Technologie I: Studijní opora* [online]. 1. vydání. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>
- [29] *Zadávací technické parametry linky TA-2*. 2. verze. Praha: Attl a spol. s.r.o., 2021.
- [30] *Datasheet: 1.4301 (AISI 304), S30400* [online]. Essen, Germany: Metalcor GmbH [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.metalcor.de/en/datenblatt/5/>

- [31] *Datasheet: 1.4404 (AISI 316 L), S31603* [online]. Essen, Germany: Metalcor GmbH [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.metalcor.de/en/datenblatt/12/>
- [32] *Datasheet: 1.4509 (AISI 441), S43940* [online]. Essen, Germany: Metalcor GmbH [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.metalcor.de/en/datenblatt/25/>
- [33] ŠPIRK, Stanislav. *Průmyslový výzkum inovativního vertikálního řešení Smyčkového zásobníku pro tváření materiálu (pásky)*. Plzeň: Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni, 2022.