

Návrh procesu tváření plechového dílu včetně koncepce tvářecího nástroje a simulace výroby

Bc. Ondřej Kotrla

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Kotrla
Osobní číslo:	T24492
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Návrh procesu tváření plechového dílu včetně koncepce tvářecího nástroje a simulace výroby

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši zabývající se řešeným tématem.
- Vytvořte model zadaného plechového dílu.
- Navrhněte postup tvářecích operací a proveďte analýzu výrobního procesu.
- Navrhněte koncepci tvářecího nástroje pro výrobu daného dílu.
- Nakreslete sestavu nástroje spolu s kusovníkem a patřičnými pohledy.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 5. vydání, v CERM 3., 2013, učební text pro vysoké školy, ISBN 978-80-214-4747-9.

BOLJANOVIC, Vukota. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. 2nd Edition. New York: Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3492-1.

ALTAN, Taylan a Erman Tekkaya. Sheet Metal Forming – Processes and Applications. Detroit: ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-844-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem technologického procesu tváření plechového dílu, jeho simulací, následnou optimalizací a návrhem koncepce nástroje. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části je provedena literární rešerše zaměřená na problematiku tváření, převážně na problematiku plošného tváření s bližším zaměřením na proces hlubokého tažení. Dále se zaměřuje na vlastnosti používaných materiálů, typy strojů a principy simulačních metod.

V praktické části je vytvořen 3D model zvoleného plechového dílu. Na základě stanovených technologických podmínek je následně provedena simulace výroby, přičemž jsou analyzovány klíčové parametry jako lisovatelnost, ztenčení, vrásnění a odpružení. Mezi poslední část patří návrh sledu tvářecích operací a koncepce samotného tvářecího nástroje.

Klíčová slova: hluboké tažení, plošné tváření, optimalizace simulace, tažný nástroj

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of the technological process of sheet metal forming, its simulation, subsequent optimization, and the development of the tool concept. The thesis is divided into a theoretical and a practical part.

The theoretical part includes a literature review focused on the issues of forming, mainly on sheet metal forming, with a closer focus on the deep drawing process. It also covers the properties of the materials used, types of forming machines, and the principles of simulation methods.

In the practical part, a 3D model of the selected sheet metal component is created. Based on defined technological conditions, a production simulation is performed, during which key parameters such as formability, thinning, wrinkling, and springback are analyzed. Finally, a sequence of forming operations and the concept of the forming tool itself are proposed.

Keywords: deep drawing, sheet metal forming, simulation optimization, forming tool

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit své upřímné poděkování vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph. D. za jeho odborné vedení, cenné rady, vstřícný přístup a čas, který mi ochotně věnoval v průběhu celé realizace této práce. Jeho ochota konzultovat a přizpůsobit se mým časovým možnostem výrazně přispěla k odborné i praktické kvalitě mé práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině za nepřetržitou podporu a trpělivost, které mi poskytovala nejen v průběhu zpracování této práce, ale po celou dobu mého studia. Zvláštní poděkování patří mé manželce za její morální podporu a motivaci, které pro mě byly nepostradatelným zázemím při překonávání všech studijních i pracovních výzev.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 TVÁŘENÍ.....	15
1.1 ROZDĚLENÍ PROCESŮ TVÁŘENÍ PODLE TEPLoty	16
1.1.1 Tváření za studena.....	16
1.1.2 Tváření za poloohřevu.....	18
1.1.3 Tváření za tepla	18
1.2 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ.....	21
1.2.1 Válcování	21
1.2.2 Kování	22
1.2.3 Protlačování.....	24
1.3 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....	26
1.3.1 Stříhání	27
1.3.2 Ohýbání	28
1.4 HLUBOKÉ TAŽENÍ	31
1.4.1 Mechanické chování materiálu při tažení.....	33
1.4.2 Poloměr rohů tažníku a tažnice	34
1.4.3 Defekty způsobené tažením	35
1.4.4 Maziva pro tažení	35
1.5 MECHANISMY PLASTICKÉ DEFORMACE PŘI TVÁŘENÍ	36
1.5.1 Stav napjatosti	38
2 MATERIÁLY PRO PLOŠNÉ TVÁŘENÍ PLECHŮ.....	39
2.1 KVALITA PLECHŮ	39
2.2 KATEGORIE OCELÍ	40
2.2.1 Uhlíkové oceli	41
2.2.2 IF (Interstitial Free) oceli	41
2.2.3 BH (Bake Hardenable) oceli	41
2.2.4 HSLA (High Strength Low Alloy) oceli	42
2.2.5 DP (Dual Phase) oceli	42
2.2.6 CP (Complex Phase) oceli	42
2.2.7 TRIP (Transformation Induced Plasticity) oceli	43
2.2.8 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli	43
2.3 SHRNUÍ PŘEHLEDU OCELÍ	44
3 NÁSTROJE PRO TAŽENÍ.....	46
3.1 KONSTRUKCE TAŽNÝCH NÁSTROJŮ	47
3.1.1 Materiály pro nástroje a tvárníky	47
3.1.2 Běžné poruchy nástrojů při tažení.....	48
4 SIMULACE TVÁŘENÍ	50

4.1	DIAGRAM MEZNÍCH TVÁŘECÍCH KŘIVEK (FLD)	51
4.2	VÝSLEDKY SIMULACÍ	51
4.2.1	Simulace tvářitelnosti (Formability)	52
4.2.2	Simulace nadměrného zeslabení (Thinning)	52
4.2.3	Simulace porušení (Failure)	53
4.2.4	Simulace zvlnění (Wrinkling)	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	55
6	ZADÁNÍ A STANOVENÍ POŽADAVKŮ	56
6.1	SOFTWARE AUTOFORM R8	56
6.1.1	Požadované parametry a výsledky simulací.....	57
7	PRVNÍ NÁVRH SUMILACE PROCESU	58
7.1	NASTAVENÍ PARAMETRŮ SOUČÁSTI.....	58
7.1.1	Vložení součásti (Import)	58
7.1.2	Optimální orientace výtažku (Tipping)	58
7.1.3	Zvolení vhodného materiálu (Material)	59
7.1.4	První kontrola tvarovatelnosti (Formcheck).....	60
7.2	PLÁNOVÁNÍ PROCESNÍCH OPERACÍ	61
7.2.1	Počet a pořadí operací (Plan).....	61
7.3	DEFINICE TAŽNÉHO NÁSTROJE	62
7.3.1	Navržení přidržovače (Automatic Binder)	62
7.3.2	Navržení tažné hrany nástroje (Addendum).....	63
7.3.3	Druhá kontrola tvarovatelnosti (Formcheck)	65
7.4	NAVRŽENÍ POLOTOVARU	65
7.4.1	Základní informace o polotovaru (Blank)	66
7.5	SIMULACE	66
7.6	VÝSLEDKY	66
7.6.1	Výsledek tvářitelnosti (Formability)	66
7.6.2	Výsledek maximálního porušení (Max Failure).....	67
7.6.3	Výsledek ztenčení (Thinning)	68
7.7	SOUHRN VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ S POŽADOVANÝMI.....	69
8	OPTIMALIZACE NÁVRHU SIMULACE PROCESU	70
8.1	OPTIMALIZACE PARAMETRŮ SOUČÁSTI	70
8.1.1	Zvolení materiálu (Material) pro optimalizovaný proces.....	70
8.1.2	Optimalizovaná kontrola tvarovatelnosti (Formcheck).....	71
8.2	PLÁNOVÁNÍ PROCESNÍCH OPERACÍ OPTIMALIZACE	72
8.3	DEFINICE TAŽNÉHO NÁSTROJE OPTIMALIZACE	72
8.3.1	Změna geometrie (Modify)	73
8.3.2	Optimalizace navržení přidržovače (Automatic Binder).....	74

8.3.3	Nastavení optimalizované tažné hrany nástroje (Addendum)	75
8.3.4	Druhá kontrola optimalizovaného návrhu (Formcheck)	76
8.4	NAVRŽENÍ NOVÉHO POLOTOVARU	76
8.4.1	Základní informace o novém polotovaru (Blank)	77
8.5	NASTAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK	77
8.5.1	Nastavení brzdných drážek (Beads)	77
8.5.2	Nastavení maziva (Lube)	78
8.6	OPTIMALIZOVANÁ SIMULACE	79
8.7	OPTIMALIZOVANÉ VÝSLEDKY	79
8.7.1	Výsledky tvářitelnosti (Formability) po optimalizaci	80
8.7.2	Výsledek maximálního porušení (Max Failure) po optimalizaci	80
8.7.3	Výsledek ztenčení (Thinning) po optimalizaci	81
8.8	SOUHRN VÝSLEDKŮ OPTIMALIZACE A POROVNÁNÍ S POŽADOVANÝMI	82
9	POSTUP PROCESU	83
9.1	PRVNÍ KROK POSTUPU	83
9.2	DRUHÝ KROK POSTUPU	84
9.3	TŘETÍ KROK POSTUPU	84
9.4	ČTVRTÝ KROK POSTUPU	85
10	NÁVRH KONCEPCE TAŽNÉHO NÁSTROJE	86
10.1	HORNÍ ČÁST TAŽNÉHO NÁSTROJE	86
10.1.1	Horní základová deska	87
10.1.2	Tažník	87
10.1.3	Přidržovač	88
10.2	SPODNÍ ČÁST TAŽNÉHO NÁSTROJE	88
10.2.1	Spodní základová deska	89
10.2.2	Tažnice	89
10.2.3	Vyhazovací systém	90
10.3	POTŘEBNÉ PŘÍSLUŠENSTVÍ	90
10.3.1	Vodící sloupky a pouzdra	91
10.3.2	Excentrické držáky	92
10.3.3	Pružiny a šrouby	92
	ZÁVĚR	93
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM TABULEK	104
	SEZNAM PŘÍLOH	105

ÚVOD

Tváření plechů patří mezi klíčové technologie v oblasti strojírenství a zejména v automobilovém průmyslu, kde je kladen důraz na přesnost, pevnost a zároveň nízkou hmotnost vyráběných komponentů. Neustále rostoucí požadavky na kvalitu, efektivitu výroby a snižování materiálových nákladů vedou ke snaze o optimalizaci celého procesu od konstrukčního návrhu, přes volbu vhodného materiálu až po výrobu a finalizaci výlisku.

S rozvojem výpočetní techniky a simulačních nástrojů je možné provádět simulace tvářecích procesů již ve fázi návrhu, což výrazně snižuje počet fyzických prototypů a šetří čas i finanční prostředky. Jedním z nejpoužívanějších softwarových nástrojů v této oblasti je program AutoForm, který umožňuje realistickou simulaci celého procesu hlubokého tažení včetně vyhodnocení kritických jevů, jako jsou ztenčení materiálu, vrásnění nebo vznik trhlin.

Cílem této diplomové práce je navrhnout kompletní proces výroby vybraného plechového dílu, a to od vytvoření 3D modelu, přes návrh sledu tvářecích operací, až po vytvoření koncepce tvářecího nástroje a provedení simulační analýzy procesu. Součástí práce je rovněž zhodnocení výsledků simulace a návrh případných optimalizačních úprav tak, aby výsledný výrobní proces splňoval technické a kvalitativní požadavky.

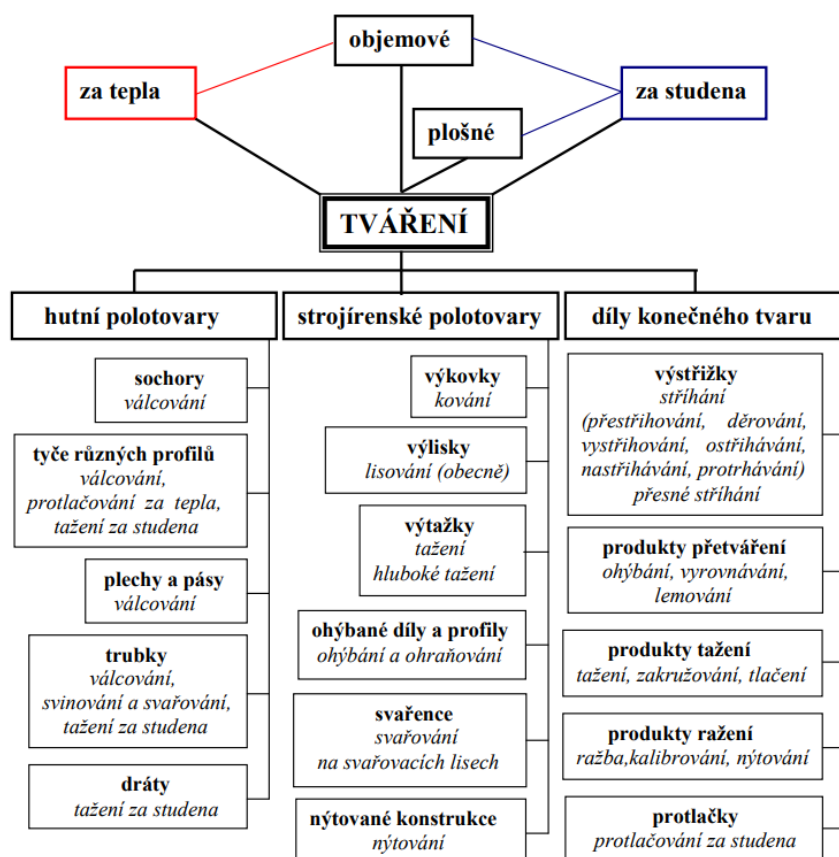
I TEORETICKÁ ČÁST

1 TVÁŘENÍ

Tváření je technologie zpracování kovů, ať už čistých kovů nebo jejich slitin, které se vyznačují společnou vlastností (tvářitelností). Při tváření jsou materiály vystaveny plastické deformaci za účelem získání požadované velikosti, tvaru nebo změny fyzikálních a chemických vlastností. Princip tohoto procesu spočívá v působení vnějších sil na polotovary pomocí speciálně tvarovaných nástrojů. Pokud je vyvolané napětí dostatečně vysoké, dochází k přetvoření materiálu bez narušení jeho celistvosti a materiál se takzvaně tváří.

Tváření je moderní a vysoce produktivní technologie, která má klíčový význam v průmyslové výrobě. Slouží nejen k produkci hutních polotovarů, ale také k výrobě součástí pro strojírenství a další průmyslová odvětví. Bez této technologie by byla hromadná výroba mnoha průmyslových dílů téměř nemožná.

Tváření kovů se dělí do těchto základních skupin (viz. obrázek 1): objemové tváření, plošné tváření, tváření za studena a tváření za tepla. Mezi objemové tváření patří například kování, válcování, tažení a vytlačování, což jsou procesy, při kterých je vzorek vystaven vysokému tlakovému namáhání, které zlepšuje mechanické vlastnosti. Při plošném tváření jsou obvykle aplikována tahová napětí a formování je omezeno místním krčením materiálu.[1; 2]

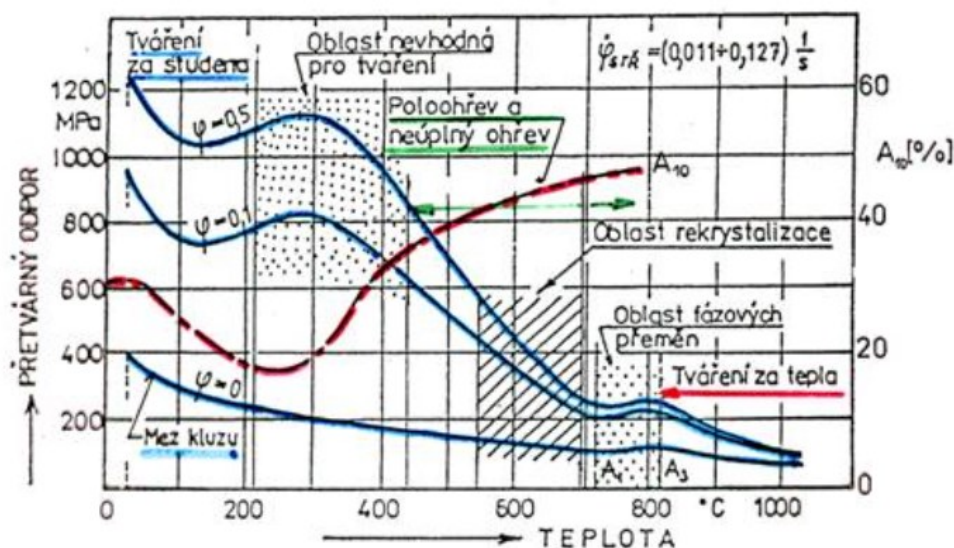


Obrázek 1. Základní rozdělení tváření a výsledné produkty s názvy operací [2]

Mezi hlavní výhody tváření patří vysoká efektivita výroby, optimální využití materiálu a vynikající rozměrová přesnost hotových produktů. Na druhou stranu mezi nevýhody patří vysoké náklady na stroje a nástroje. Také mezi ně patří omezení velikosti finálního výrobku.[3]

1.1 Rozdělení procesů tváření podle teploty

Při změně teploty se při tváření mění deformační odpor tvářené oceli. S narůstající teplotou se výrazně zlepšují plastické vlastnosti kovů a jejich slitin. Klasifikace tvářecích procesů podle teploty vychází ze vztahu mezi teplotou tvářeného materiálu a jeho rekrytalizační teplotou, která odpovídá přibližně 40 % teploty tání kovu (viz. obrázek 2).

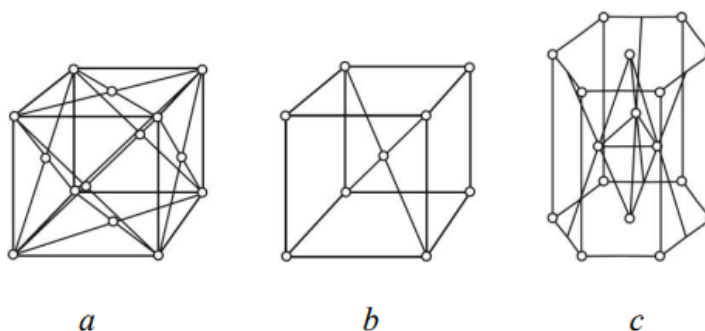


Obrázek 2. Rozdělení procesů tváření podle teploty [3]

Rekrytalizační teplota je hodnota, při které dochází k obnově deformovaných zrn vzniklých při tváření za studena, aniž by došlo ke změně krystalové mřížky. Na základě této teploty se tvářecí technologie dělí do jednotlivých kategorií.[3]

1.1.1 Tváření za studena

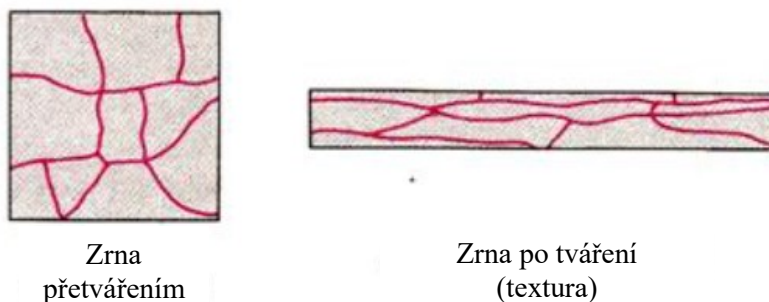
Kovy mají krystalickou strukturu. Obvykle se skládají z velkého množství krystalů různých tvarů a velikostí, které se nazývají zrna. Zrna jsou mezi sebou spojena mezimolekulárními vazebnými silami a tvoří tak jeden celek. Kovy mají uspořádané uspořádání atomů a vytvářejí mřížku (viz. obrázek 3).[4]



Obrázek 3 Typy mřížek u kovů [4]

- a) Plošně centrovaná krychlová mřížka, b) Tělesně centrovaná kubická mřížka,
c) Šestihranná kubická mřížka

Tváření za studena probíhá při teplotách nižších než rekrytalizační teplota, takže teplota tváření je pod 30 % teploty tání materiálu. Tento proces vede k zpevnění materiálu, které se uchovává a dochází zároveň k nárůstu odporu proti dalšímu tváření. Zrna se deformují ve směru tváření (viz. obrázek 4) a vytvářejí specifickou texturu, což vede k anizotropii mechanických vlastností. Zpevněním materiálu dochází ke zvýšení jeho mechanických vlastností (jako jsou mez pevnosti a mez kluzu), zatímco jeho tažnost klesá. Zahřátím materiálu se deformační schopnosti obnoví a kov opět získává vlastnost plastické tvárnosti.



Obrázek 4. Změna struktury zrn v důsledku tváření [3]

Mezi výhody tohoto procesu patří vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch (bez tvorby okují). Například pokud testujeme tvrdost oceli válcované za studena a za tepla se stejným chemickým složením, ocel válcovaná za studena bude tvrdší a tedy pevnější. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na tvářecí síly, nerovnoměrné zpevnění a omezená tvárnost materiálu. Mezi další nevýhody patří to, že daná ocel, která bude tvářena za studena bude mít zbytkové pnutí a bude náchylnější ke korozi, jestliže nebude patřičně chráněna.[3; 5]

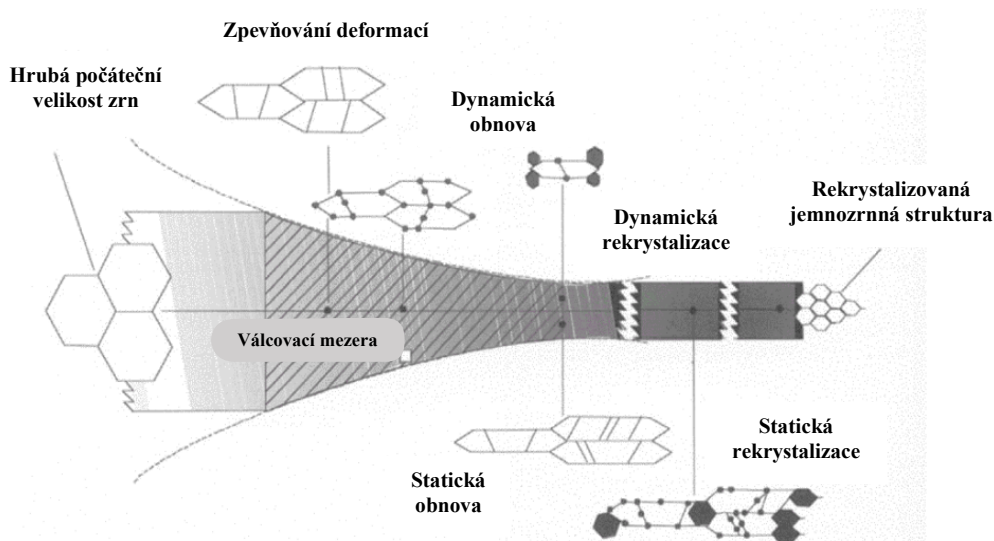
1.1.2 Tváření za poloohřevu

Jak již bylo zmíněno při výrobě hotových dílů, mezi klíčovými faktory je kvalita produktu, zejména povrchová kvalita a rozměrová přesnost. Proces, který se běžně používá, když jsou požadavky na povrchovou kvalitu a rozměrovou přesnost vysoké, je tváření materiálu za studena. To znamená, že polotovary nejsou před začátkem výroby výrazně zahřívány. Tváření za studena však naráží na technologické limity kvůli obvykle velmi vysokým mezím kluzu. Tvářecí stroje nemohou vyvinout požadovanou sílu, a tvárnost materiálu je do jisté míry omezena, jelikož tyto vlastnosti do značné meze závisí na teplotě, lze mez kluzu obecně snížit a tvárnost zlepšit zvýšením teploty tváření. Zvýšení teploty na 900 °C, a dokonce až na 1200 °C, jak je běžné při tváření za tepla, však vede k výraznému tvorbě okujů, a tím i ke zhoršení rozměrové přesnosti a povrchové kvality. Alternativou je metoda tváření za poloohřevu. Ta obvykle probíhá v teplotním rozmezí mezi pokojovou teplotou a transformační teplotou, čímž spojuje výhody tváření za tepla s výhodami tváření za studena. V teplotním rozmezí přibližně 200 °C až 400 °C vykazuje mez kluzu u těchto ocelí relativní maximum. Mez kluzu může v tomto případě dosáhnout hodnot, které se běžně vyskytují při pokojové teplotě.[6]

1.1.3 Tváření za tepla

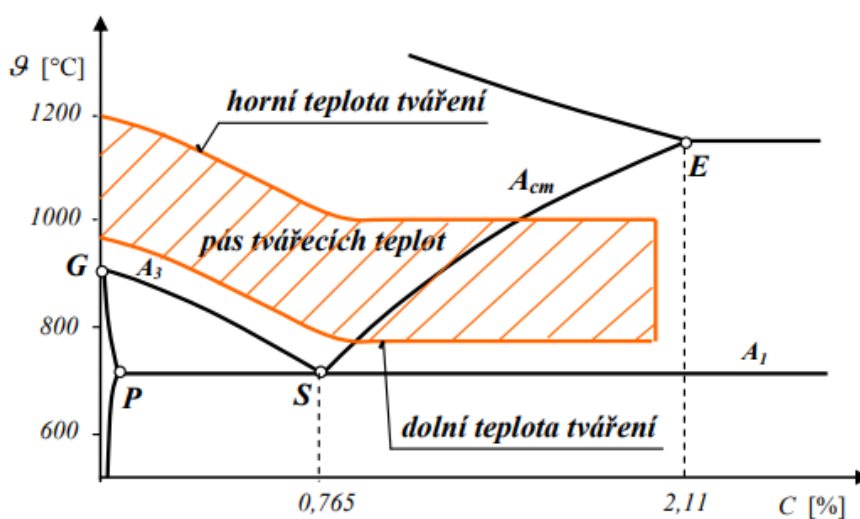
Tváření za tepla probíhá při teplotách nad rekrytalizační teplotou, kdy je rychlost rekrytalizace tak vysoká, že zpevnění způsobené tvářením se eliminuje již během procesu nebo krátce po něm. Teplota tváření je nad 70 % teploty tání daného materiálu. Materiál se během tváření nezpevňuje a k tváření jsou za potřeby mnohem menší síly (až desetkrát nižší), než je tomu při tváření za studena. Při tváření za tepla je povrch často nekvalitní kvůli okujení, což může být problematické při dalších technologických operacích. Tento proces může být časově náročný a nákladný, ale na druhou stranu pomáhá odstraňovat trhliny, bubliny a další defekty. Dalším efektem tváření za tepla je vznik vláknité struktury z původní hrubé dendritické struktury ingotu, která "kopíruje" tvar výkovku.[3]

Při vysokých teplotách se stávají možné modifikace (viz. obrázek 5) v mikrostruktuře, jako je rekrytalizace a regenerace. Vlastnosti metalurgické struktury, například velikost zrn, mohou být dodatečně měněny řízenými termomechanickými zpracováními.[6]



Obrázek 5. Změny v struktuře před a po tváření za tepla [6]

Teplotní interval, ve kterém je možné provádět tváření za tepla, závisí na obsahu uhlíku v oceli, a ten pro různé kovy lze určovat podle Fe-C diagramu (viz. obrázek 6).



Obrázek 6. Teplotní rozsah pro kovy tvářené za tepla s rozdílným obsahem uhlíku [2]

Ve vyznačeném pásu šrafováním je možné tváření ocelí s rozdílným obsahem uhlíku. Ocel se ohřívá přibližně na 250 až 300 °C pod teplotu solidu, čímž se dostává do takzvané pásma tvářecích teplot. Toto pásmo je vymezeno horní a dolní teplotou tváření (viz. obrázek 6). Aby bylo tváření vyhodnoceno jako tváření za tepla, musí celý proces probíhat a být dokončen v tomto teplotním rozmezí.

Dokončení tváření je nutné realizovat minimálně na dolní hranici tvářecí teploty, tedy alespoň o 50 °C nad hodnotou A3, případně A1. To zajistí vznik jemnozrnné a rovnoměrné struktury materiálu. Porovnání technologií tváření v závislosti na teplotě je znázorněno (viz. tabulka 1).[2; 4; 7]

Tabulka 1. Srovnání hlavních technologií tváření za studena a za tepla [5; 7]

	Tváření za studena	Tváření za tepla
Počáteční teplota	Pod rekrytalizační teplotou. Přibližně 1–29 % teploty tání	Nad rekrytalizační teplotou. Přibližně 60–90 % teploty tání
Rozměry	Nejmenší tloušťka je neomezena	Omezení nejmenší tloušťky
Rozměrová přesnost	Vysoká	Méně kvalitní. Důsledkem rozdílného smršťování z dotvářecí teploty
Povrchová jakost	Kvalitnější. Použití maziva	Horší kvalita. Důsledkem je zokujení a omezená možnost použití maziva
Průřezový tvar	Spíše jednodušší tvary	Možnost i velice náročných tvarů a geometrií
Struktura – zrna	Protažení je výrazné	Globulární následkem dynamických uzdravovacích procesů
Textura	Značně orientována	Sotva patrná
Zpevnění	Značné	Eliminováno důsledkem zotavovacími procesy
Vnitřní napětí	Značné	Žádné

1.2 Objemové tváření

Procesy objemového tváření jsou často označovány jako deformační procesy. Je to proto, že převážná část tvarování je způsobena deformací materiálu v důsledku tlakové zátěže působící nástrojem. U většiny těchto procesů dochází ke změně tvaru. Prostřednictvím působení tlakové síly obvykle dochází ke změně průřezu.

Z tohoto důvodu musí být materiály vhodné pro objemové tváření dostatečně tvárné. Termín „objemové“ se používá proto, že poměr povrchové plochy k tloušťce je nízký. Objemové tváření obvykle zahrnuje tváření za tepla, tedy zpracování kovu při teplotě nad jeho rekrytalizační teplotou.[8]

Objemové tváření zahrnuje tyto technologie a jejich operace:

- Kování – volné nebo zápustkové kování, pěchování, rotační, radiální, izotermické, přesné, kalibrování
- Válcování – podélné (na plocho), podélné tvarové, příčné tvarové takzvaně klínové, příčné profilové, rozválcování
- Protlačování – dopředné, zpětné, kombinované, radiální (stranové), hydrostatické, profilové
- Tažení – redukování, kalibrování, rozšiřování. [7]

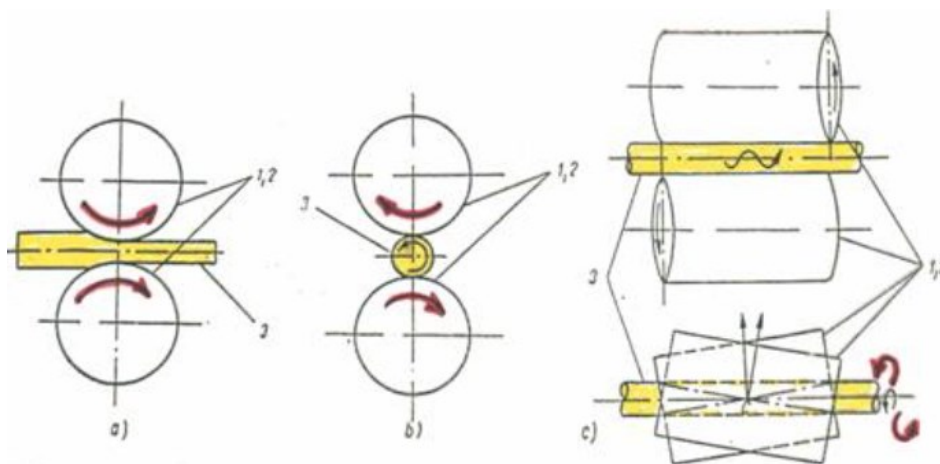
Ačkoli se někdy pro objemové tváření využívá také tváření za studena, obecně je běžnější tváření za tepla. Nejrozšířenějším procesem objemového tváření je válcování za tepla, při kterém materiál prochází několika válci do té doby, dokud není dosaženo požadovaného tvaru.[8]

1.2.1 Válcování

Ocelové ingoty o hmotnosti přibližně 10 tun se nejprve zahřívají v hlubinných pecích na teplotu kolem 1100 °C, což umožňuje jejich následné tváření válcováním na předvalky. Ty se dále zpracovávají válcováním do finálních produktů.

Válcování je nepřetržitý proces, při kterém se materiál deformuje mezi rotujícími pracovními válci (viz. obrázek 7), přičemž na něj působí převážně tlak. Během válcování dochází ke snížení výšky materiálu, jeho prodloužení i rozšíření a zároveň ke změně rychlosti, s jakou opouští válcovací stolici. Mezera mezi válci je vždy menší než původní tloušťka vstupního materiálu. Výsledným produktem je vývalek. Podle směru pohybu

materiálu skrz pracovní válce, uspořádání os válců a charakteru deformace se válcování rozděluje na podélné, příčné a kosé (viz. obrázek 7).[9]

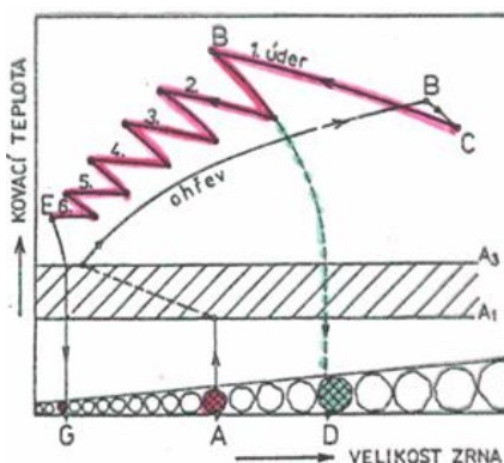


Obrázek 7. Proces válcování [9]

Podélného válcování (vlevo), příčného (uprostřed) a kosého (vpravo) válcování (1, 2 – válce, 3 – materiál)

1.2.2 Kování

Kování je proces objemového tváření za tepla, při kterém dochází k tvarování materiálu údery nebo působením síly. Tento způsob zpracování má dlouhou historii – ruční kování pomocí kladiva a kovadliny je známé již tisíce let. Jedná se o přerušovaný proces, jehož výsledkem je výkovek s požadovaným tvarem, příznivou makrostrukturou, vhodnou mikrostrukturou a vylepšenými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Metodou kování je možné zpracovávat téměř všechny kovy.



Obrázek 8. Kovací diagram [9]

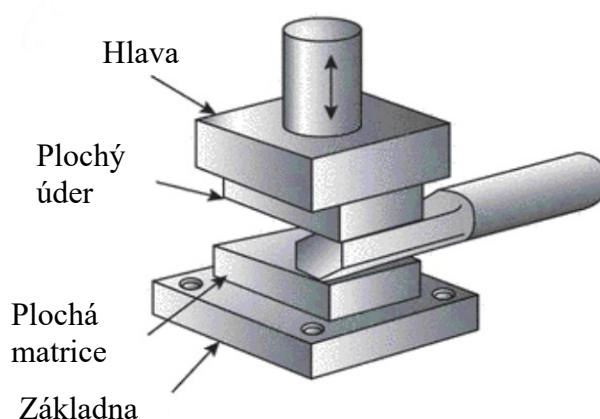
Strojní kování zvyšuje efektivitu výroby menších a středně velkých výkoveků. Klíčovým cílem tohoto procesu je minimalizovat spotřebu materiálu, dosáhnout maximální přesnosti

výkovků, zajistit vysokou kvalitu tvářeného kovu a optimalizovat průběh vláken. Zároveň se klade důraz i na ekonomickou stránku provozu. Kování nejen umožňuje vytvářet výrobky požadovaných rozměrů, ale také významně zlepšuje mechanické vlastnosti a vnitřní strukturu kovaného materiálu (viz. obrázek 8). Má tedy zásadní význam nejen pro tvarování, ale i pro zvýšení pevnosti a homogenity kovu (stupeň prokování).[9]

Volné kování

Volné kování může být prováděn pomocí jednoduchého kovadlinového kladiva nebo obrovským řízeným lisem, který vytváří extrémní síly. Tímto způsobem lze vyrábět pouze jednoduché tvary.

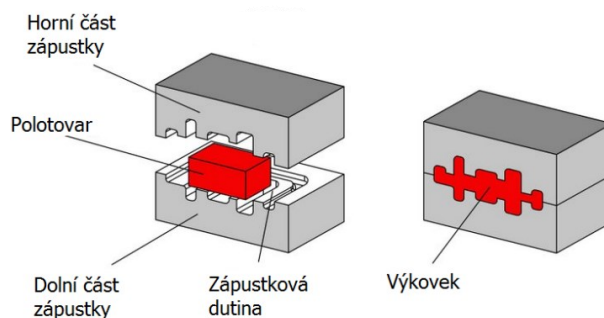
- Ruční (nářadí: kovadlina, kladiva, nářadí).
- Strojní (stroje: buchary, lisy).[8; 10]



Obrázek 9. Volné kování [8]

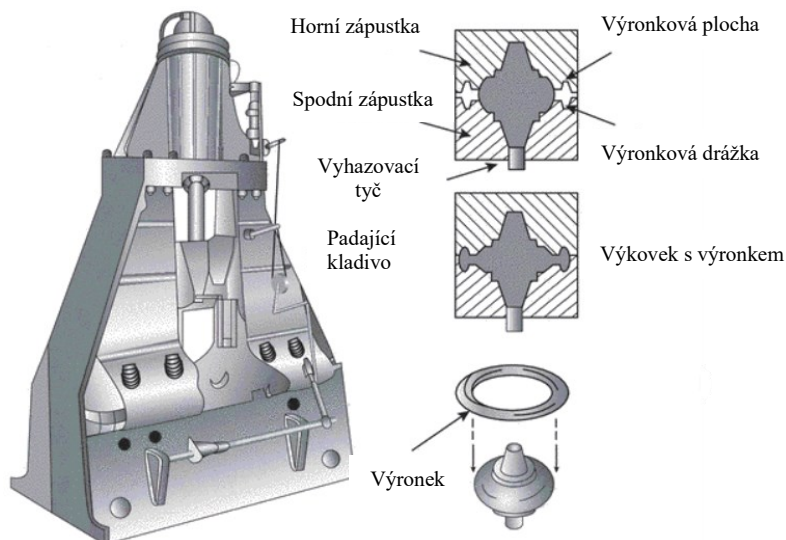
Kování v uzavřené zápustce

Tento typ kování využívá lisy a umožňuje vytvoření složitějších geometrií. Zvláštní důraz je kladen na konstrukci zápustky, aby bylo zajištěno její úplné vyplnění bez nadměrného tlaku, který by mohl zápustku poškodit. Kováním dochází k vyplnění dutiny zápustky, a tím k dosažení požadovaného tvaru (viz. obrázek 10).



Obrázek 10. Zápustka s výkovkem [10]

Mezi hlavní požadavky pro oceli, se kterých se zápustky vyrábí, patří vysoká pevnost, houževnatost a vysoká ořezová vzdornost, nízká tepelná roztažnost, nejvyšší tepelná vodivost a dobrá obrobiteľnosť vyráběné zápustky.[8; 10]



Obrázek 11. Strojní zařízení se znázorněním kovacího procesu [8]

1.2.3 Protlačování

Proces protlačování spočívá v protlačování polotovaru skrz matrici za účelem vytvoření dlouhého produktu s konstantním průřezem. Proces protlačování zahrnuje jak ustálené, tak neustálené podmínky.

Neustálené podmínky nastávají na začátku a na konci procesu protlačování. Ustálené podmínky převládají při protlačování dlouhých produktů jako jsou tyče, profily a trubky. U těchto výrobků se mohou do jisté míry vyvinout koncové vady, což vede ke vzniku zbytkového materiálu (pahýlu). Deformace jsou obvykle značné, což vyžaduje přehřátí polotovaru.

Naopak, neustálené podmínky převažují při protlačování krátkých ingotů určených k výrobě jednotlivých součástí. V tomto případě nelze připustit vznik vad, protože neprotlačená část ingotu tvoří součást hotového výrobku.

S několika výjimkami je protlačování dávkový proces. Výchozím materiálem bývá obvykle válcový odlitek nebo předem válcovaný ingot, který se vloží do kontejneru a stlačí razníkem připojeným k beranu hydraulického nebo mechanického lisu. Z hlediska tření je důležité, zda se ingot pohybuje vzhledem ke kontejneru (přímé protlačování), nebo zda zůstává nehybný a do materiálu je vtlačována matrice (nepřímé neboli reverzní protlačování).

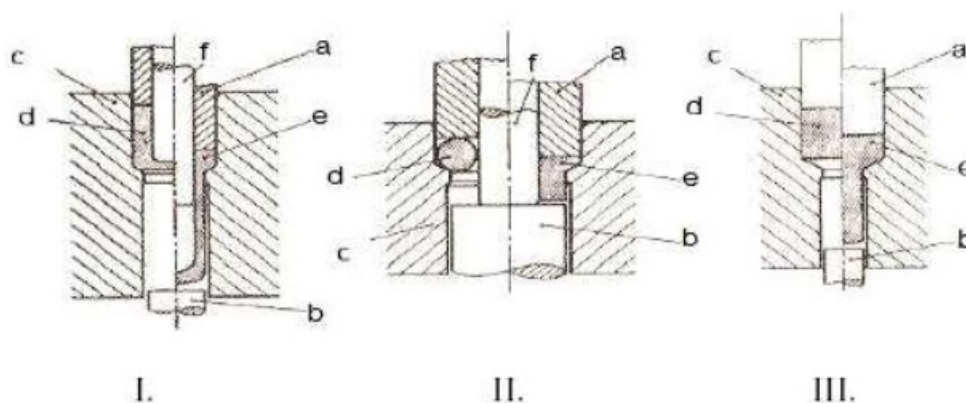
V obou případech se ingot nejprve zhutní tak, aby vyplnil celý kontejner s průřezem. Poté tlak narůstá, dokud nezačne plastická deformace, a z matrice vystupuje produkt s požadovaným průřezem. Výrobky se značně liší svými průřezovými rozměry a délkou, ale obvykle se pohybují od drátů o průměru kolem 5 mm až po trubky nebo profily o průměru 500 mm. Lisovací zařízení mají kapacitu od 2 do 50 MN, přičemž existují i lisy s kapacitou až 150 MN.[11]

Zpětné protlačování

Během tohoto procesu materiál proudí proti směru pohybu průtlačníku. Výsledkem jsou součásti ve tvaru kalíšku se dnem nebo s průchozím otvorem, což závisí na typu výchozího polotovaru, jestliže byl použit plný špalík nebo prstenec. Obvykle platí, že výška špalíku přesahuje polovinu jeho průměru. Hlavní nevýhodou této metody je vysoký deformační odpor materiálu, který významně omezuje funkční délku průtlačníku. Z ekonomického hlediska je tedy nejvhodnější vyrábět krátké a tlustostěnné průtlačky.

Dopředné protlačování

Tento proces je označován jako sousledný, protože materiál proudí ve stejném směru jako je pohyb průtlačníku. Používá se jako samostatná operace ke zmenšení průřezu plných špalíků nebo dutých polotovarů. Směr toku materiálu je znázorněn na obrázku (viz. obrázek 12).[12]



Obrázek 12. Dopředné protlačování [12]

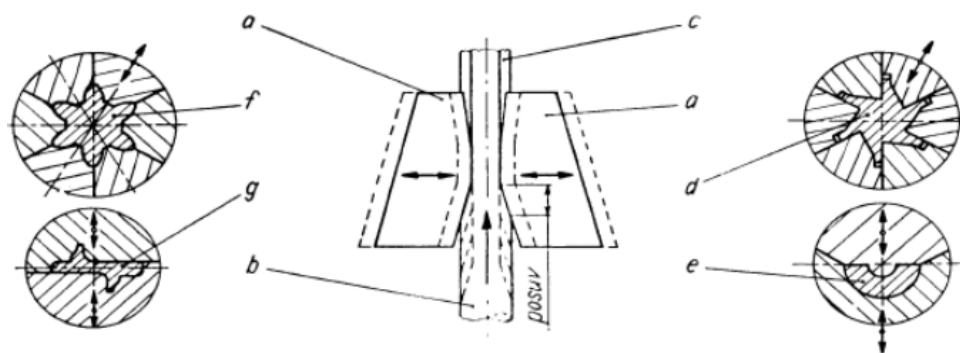
a – průtlačník, b – vyhazovač, c – průtlačnice, d – polotovar, e – průtlaček, f – trn

I – výchozím polotovarem je kalíšek, II – výchozím polotovarem je kroužek

III – výchozím polotovarem je špalík

Stranové a radiální protlačování

- Stranové – Tento způsob protlačování se od ostatních liší směrem toku materiálu. Hlavní deformace probíhá kolmo k podélné ose polotovaru. Lze jej využít ke změně průřezu určité části vylisku, přičemž výsledný tvar může být pravidelný i nepravidelný.
- Radiální – Proces radiálního protlačování (viz. obrázek 13) se používá ke změně průřezu části vylisku podobně jako při stranovém protlačování. Hlavním rozdílem však je, že rozměry polotovaru zůstávají stejné, mění se pouze tvar jeho průřezu.[12]



Obrázek 13. Radiální protlačování [12]

*a – tlačné čelisti, b – výchozí materiál, c – tvářený profil,
d, e, f, g – tvary radiálně tvářených profilů*

1.3 Plošné tváření

Technologie plošného tváření obvykle využívají studeně nebo tepelně zpracovaný válcovaný plech, pásový materiál, který je obvykle studeně tvářen do požadovaného tvaru. Deformace probíhá převážně tahem nebo kombinací tahu a stlačení, přičemž limity jsou stanoveny tvářitelností materiálu a jen málo kdy jsou dány silou nebo tlakem nástroje. Mnoho dílů, které jsou vyrobeny technologií plošného tváření mají poměrně jednoduchý tvar.[13]

K plošnému tváření náleží následující technologie a jejich operace:

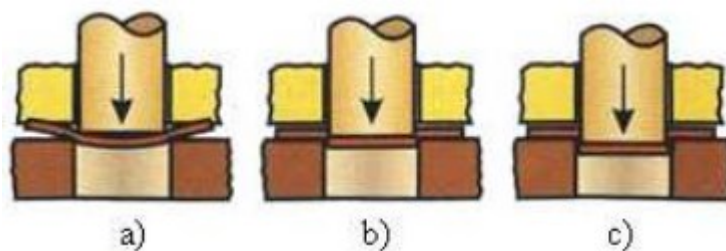
- Stříhání – prosté, vystřihování, prostřihování, ostřihování, přistřihování, nastřihování, děrování, protrhávání, nasekávání
- Ohýbání – prosté, lemování, zakružování, ohraňování, obrubování, rovnání, prosazování

- Tažení – klasické (bez ztenčení stěny), tažení se ztenčením stěny, zpětné, protahování, rozšiřování, vypínání, přetahování, zužování [7]

1.3.1 Stříhání

Stříhání je důležitý proces automobilové výroby vzhledem k jeho vlivu na kvalitu dílů. Při stříhu je materiál namáhán mezi dvěma střížnými hranami, dokud se nevyvine dostatečně velká stříhová zóna a materiál nepraskne. Je to jedinečná operace tvářících metod, která jako jediná vede k žádoucímu poručení materiálu. Proces stříhání je rozdělen do tří hlavních fází (viz. obrázek 14).

- První fáze zahrnuje oblast pružných deformací, kdy dochází ke stlačení materiálu a následně ohybu, který materiál začne vtlačovat do střížnice.
- Druhá fáze představuje oblast plastických deformací, kdy střížník začíná pronikat do plechu a ten je vtlačován hlouběji do otvoru střížnice. Napětí překračuje mez kluzu, a to postupuje do té meze, že mezi hranami střížníku a střížnice se přiblíží mezi pevnosti.
- Ve třetí fázi dochází k tvorbě trhlinek na hranách stříhaného materiálu, které se postupně šíří po celém obvodu do té fáze, dokud nedojde k úplnému oddělení materiálu.



Obrázek 14. Postup procesu stříhání [12]

*a) oblast pružné deformace, b) oblast plastické deformace,
c) ustřížení materiálu*

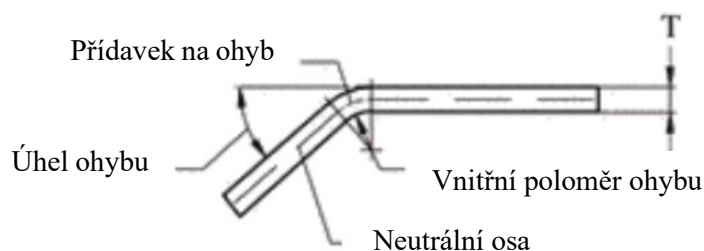
Obecně platí, že kvalitu stříhaného okraje ovlivňuje několik faktorů, a to včetně materiálu, který je stříhán, střížního procesu, střížního stroje a střížného nástroje. Kvalita stříhaného povrchu má významný vliv na jakékoliv následné operace, které zahrnují deformaci materiálu, jako je například ohýbání. Kvality stříhaného okraje se obvykle vyhodnocuje

podle velikost otřepu. Nejlepším možným výsledkem je mít okraj bez otřepů, čímž se eliminuje potřeba sekundární operace odstraňování otřepů.[12; 14]

1.3.2 Ohýbání

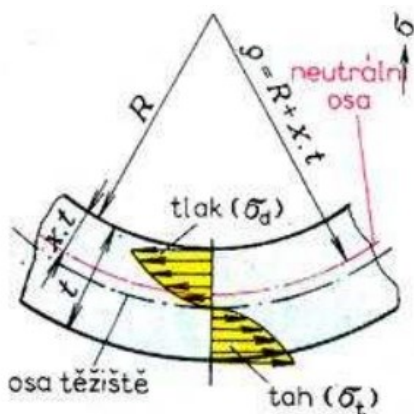
Mezi plošné tváření spadá mnoho procesů. Jedním z nejběžnějších procesů tváření plechů je ohýbání, které se používá k tváření profilů a tvarů, jako jsou L, U nebo V profily. Ohýbání se také využívá ke zvýšení tuhosti součásti a to zvýšením jejího momentu setrvačnosti. Proces ohýbání kovu je rovnoměrné deformování, při kterém dochází k plastické deformaci materiálu a změně jeho tvaru. Materiál je namáhán nad mez kluzu, ale pod mez pevnosti v tahu. Plocha materiálu se mění pouze v oblasti ohybu. „Ohýbání“ obvykle znamená lineární deformaci kolem jedné osy.

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících kvalitu ohýbaných obrobků je vnitřní poloměr ohybu (viz. obrázek 15), který musí být v definovaných mezích.[15]



Obrázek 15. Schématické zobrazení terminologie během procesu ohýbání [15]

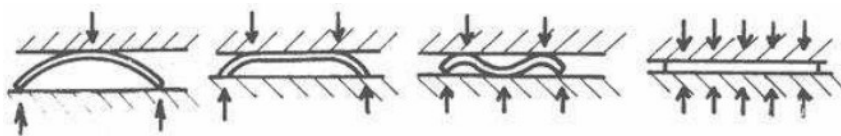
Výsledný produkt procesu ohýbání se nazývá ohýbaný díl. K provedení této tvářecí operace se využívají ohýbací nástroje, které se skládají z ohýbacího trnu a opěrné matrice. V místě ohybu dochází k tomu největšímu napětí (viz. obrázek 16) během celého procesu.



Obrázek 16. Znázornění rozložení a růstu napětí v materiálu [12]

Rovnění

Mezi další důležité technologie patří rovnání, které se využívá především k odstranění nežádoucích deformací na výrobku. Tyto deformace mohly vzniknout během některých tvářecích operací, jako je děrování či stříhání, nebo v důsledku nesprávné manipulace s materiálem. Procesu rovnání dosáhneme za pomoci působení tlaku na nerovnou součást. Pod lisem probíhá jakoby „opačný“ ohyb, jehož cílem je narovnat deformované části do rovné polohy (viz. obrázek 17). Po odstranění působení vnějších sil má však narovnaný materiál tendenci zpětně pružit, což je důsledkem elasticko-plastických deformací, a proto na tělese zůstává určité zbytkové zakřivení.

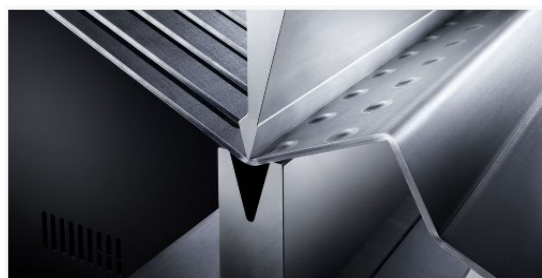
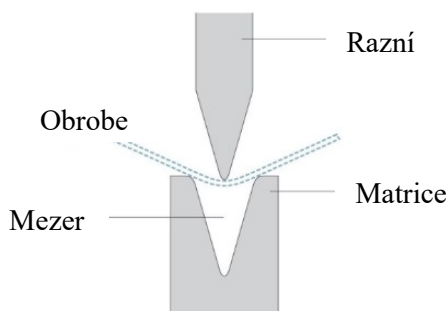


Obrázek 17. Rovnění tlakem mezi rovnými deskami [12]

U součástí, které jsou z tvrdších, nebo velmi tenkých materiálů by mohla lisovací síla vzrůst do neúnosných hodnot, a proto se používá odlišný způsob rovnání. Těleso se neuvádí do plastického stavu po celém objemu, ale pouze v určitých, pravidelně rozložených místech. Jedná se například o bodové rovnání. Tento typ rovnání se aplikuje u výrobků, kde nevedí vpichy na povrchu, anebo u velice tvrdých materiálů.[12]

Volné ohýbání

Při volném ohýbání razník tlačí materiál do matrice, aniž by jej pevně přitiskl ke stěně zápusky. Jakmile razník postupuje dolů, ramena obrobku se ohýbají směrem nahoru a vytvářejí úhel. Čím hlouběji je materiál vtlačen do matrice, tím ostřejší vzniká úhel. Mezi razníkem a matricí přitom zůstává určitá mezera. Pro dosažení konkrétního úhlu je nutné nastavit přesnou dráhu pohybu razníku. Řídicí systém stroje vypočítává nejen tuto dráhu, ale i potřebnou lisovací sílu, která závisí na použitých nástrojích, vlastnostech materiálu a parametrech výrobku, jako je úhel či délka ohybu.[16]



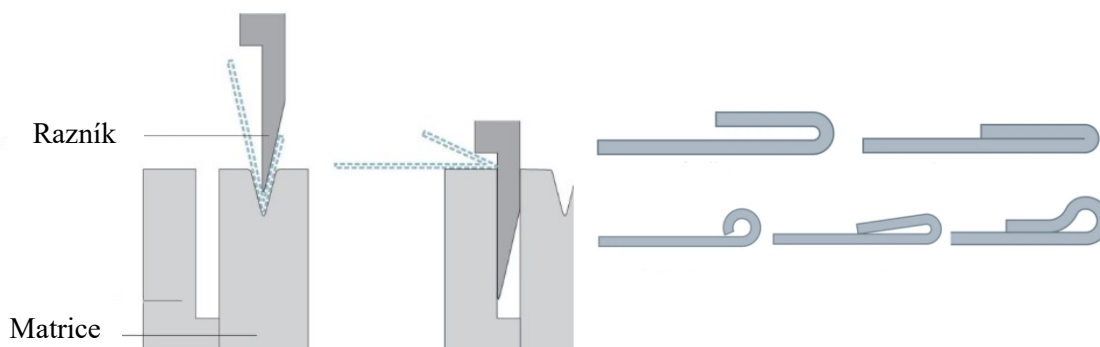
Obrázek 18. Volné ohýbání [16]

Lemování

Jedná se o metodu ohýbání plechu, při níž se okraj plechu překládá přes sebe, díky čemu vznikne upravený a pevnější okraj. Tento proces nejen zvyšuje pevnost a tuhost součásti, ale také eliminuje ostré hrany (viz. obrázek 19) a zlepšuje estetické i funkční vlastnosti dílu.

Jedná se o techniku zpracování kovů, při které se okraj plechu buď sroluje, nebo přehne. Obvykle probíhá ve dvou krocích. Nejprve se pomocí ostré matrice (V-tvar) vytvoří výrazný ohyb, který se následně zplošťovací matricí zarovná do rovného povrchu (viz. obrázek 19).

[17]



Obrázek 19. Proces lemování a typy lemů [16; 17]

Zakružování

Při této technologii se rozvinutý polotovár tvaruje ohýbáním mezi zakružovacími válci (viz. obrázek 20), čímž se dosahuje válcového nebo kuželového tvaru. Místo ohybu v určitém místě se během procesu polotovár plynule posouvá po celé jeho délce. Hlavním pracovním nástrojem jsou zakružovací válce, jejichž vzájemné uspořádání je klíčové. Zakružovačky se dělí na symetrické a nesymetrické, přičemž existuje i další rozdělení, například podle počtu válců (dvouválcové, tříválcové nebo víceválcové).



Obrázek 20. Proces zakružování [18]

Zakružovačky nejsou určeny pouze pro výrobu válců, ale umožňují i tvarování profilů do různých tvarů, jako jsou například šroubovice, kruhy nebo oblouky. Při zpracování silnějších

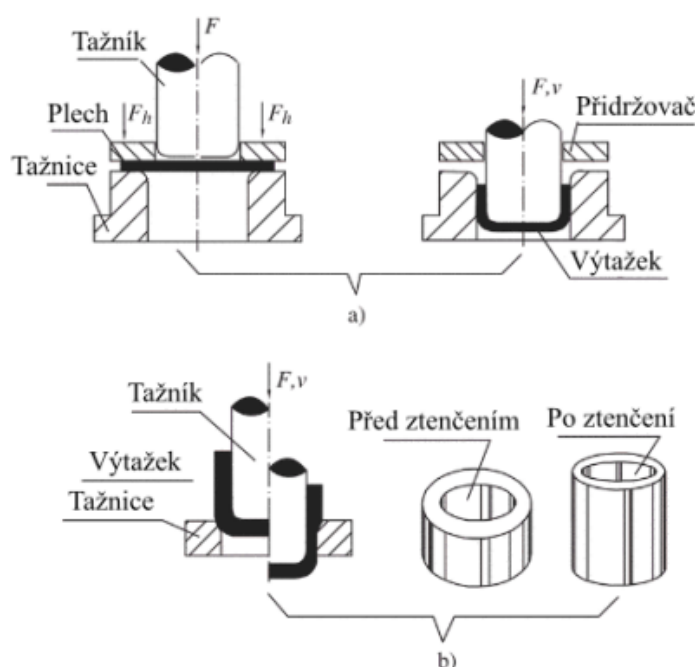
plechů (nad 40 mm) se zakružování provádí za tepla, zatímco tenčí plechy lze tvarovat za studena. Klíčovým aspektem zakružování je sledování směru vláken plechu, který ovlivňuje výslednou pevnost a vlastnosti výrobku.[18]

1.4 Hluboké tažení

Tažení kovů neboli takzvané hluboké tažení (viz. obrázek 21) je proces, při kterém se pomocí razníku tlačí plech mezi povrchy razníku a matrice. Plochý plech se tak formuje do válcovitého, kuželovitého nebo skříňového tvaru. Tento proces umožňuje vyrobit finální výrobek s minimálním počtem operací a s minimálním odpadem a díky tomu není nutné dalších upravovacích operací před montáží. Hluboké tažení je složitější proces než stříhání, řezání a ohýbání, protože v závislosti na geometrii vyráběného dílu kombinuje více procesů jako je ohýbání, narovnávání, protahování, stlačování a stříhání.

Vývoj specifických metod hlubokého tažení úzce souvisí s celkovým technologickým pokrokem, zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Tato technologie však nachází široké uplatnění při výrobě dílů různých tvarů a rozměrů i v dalších odvětvích, a to od velmi malých součástek pro elektrotechniku až po několika metrové výrobky v jiných průmyslových sektorech.

Hluboké tažení je oblíbené díky rychlému cyklu lisování. Tímto způsobem lze vyrábět složité osově souměrné i některé nesouměrné tvary s minimálním počtem operací a bez nutnosti vysoce kvalifikované pracovní síly.



Obrázek 21. Schématické znázornění procesu hlubokého tažení [19]

a) Hluboké tažení bez ztenčení materiálu, b) Hluboké tažení se ztenčením materiálu

Z funkčního hlediska přináší tento proces plošného tváření výhody v podobě vysoce pevnostních a lehkých dílů a umožňuje výrobu geometrických tvarů, které nelze dosáhnout některými jinými výrobními postupy. Proces hlubokého tažení se dělí do dvou základních procesů.

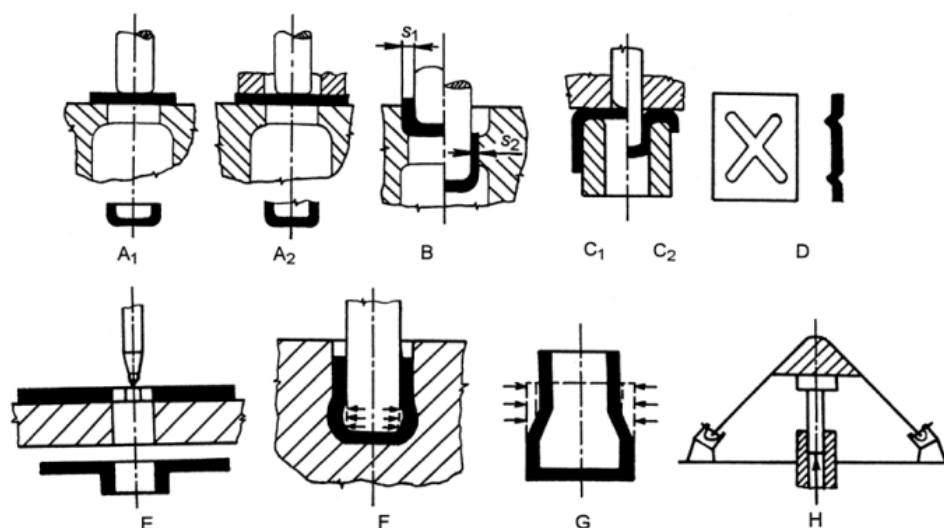
- Hluboké tažení bez ztenčení materiálu (čisté tažení)
- Hluboké tažení se ztenčením materiálu (žehlení)

Jak je patrné z ilustrace hlubokého tažení bez redukce tloušťky materiálu (viz. obrázek 20a), základními nástroji pro tento proces jsou razník, tažná matrice a přidržovač plechu. Při procesu žehlení (viz. obrázek 20b) je předem vytažený pohárek protažen jedním nebo více žehlicími kroužky pohybujícím se razníkem, což vede ke snížení tloušťky stěny pohárku. Typickými výrobky jsou hrnce a pánve, nádoby různých tvarů, dřezy, plechovky na nápoje a panely pro automobily a letadla.[19; 20]

Proces tažení je samozřejmě rozděleno do více kategorií (viz. obrázek 22), má velice širokou škálu procesů a jejich rozdělení je následující:

- Prosté tažení – Přeměna rovinného přístřihu na uzavřený prostorový tvar bez výrazné změny tloušťky materiálu, a to buď bez přidržovače nebo s přidržovačem.
- Tažení se ztenčením stěny – Tváří se dutý polotovar a během procesu se zmenšuje jeho tloušťka stěny.
- Zpětné tažení – Během druhé operace se provede tažení v protisměru vůči tažení předchozímu.
- Žlábkování – Tažení mělkých prohlubenin pro zvýšení tuhosti finálního výtažku
- Protahování – Protahování polotovaru po vnějším nebo vnitřním okraji tak, aby se vytvořila kolmá válcová plocha.
- Rozšiřování – Zvětšování místního průměru daného válcového polotovaru.
- Zužování – Zmenšování daného válcového polotovaru.

- Přetahování – Tváření rovinného polotovaru v prostorovou plochu (napínání přes šablonu).[21]



Obrázek 22. Rozdělení procesů tažení [21]

A1 – prosté tažení bez přidržovače, A2 – prosté tažení s přidržovačem, B – tažení se ztenčením stěny, C1 – vložení polotovaru vyrobeného dle A2, C2 – tažení v obráceném směru vůči tažení předchozímu, D – žlábkování, E – protahování, F – rozšiřování, G – zužování, H – přetahování

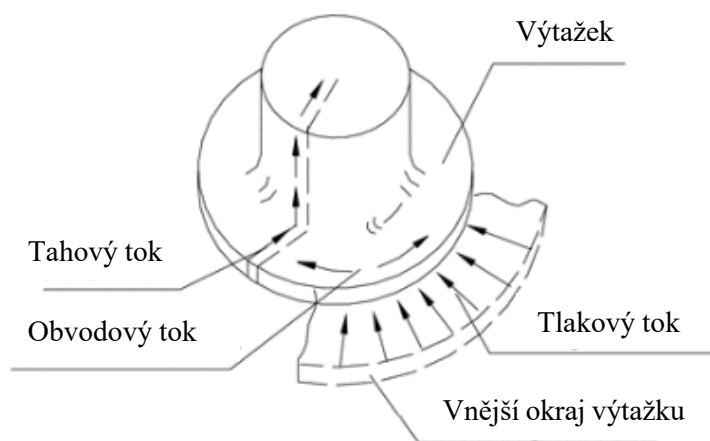
1.4.1 Mechanické chování materiálu při tažení

Mnoho nepravidelně tvarovaných součástí se vyrábí procesem tažení pomocí tažných nástrojů, přičemž teorie toku kovů je u těchto součástí komplikovaná.

Tažník působí silou na dno výlisku, čímž způsobuje proces tažení a přidržovač mezitím vyvíjí směrem dolů přidržovací sílu. V důsledku toho dochází k výraznému protažení materiálu ve stěnách výlisku. Na vnějším okraji polotovaru však působí tlakové síly, které mají tendenci materiál zahušťovat. Největší ztenčení materiálu nastává v blízkosti dna výlisku a může dosahovat až 35 % původní tloušťky polotovaru. Největší zesílení stěny se objevuje na vnějším okraji taženého poháru a může být až o 30 % větší než původní tloušťka polotovaru.

Proces ztenčování a zesilování materiálu během tažení pohárku zároveň odráží tok kovu. Při hlubokém tažení skořepiny poháru vzniká tahový a tlakový tok kovu (viz. obrázek 23).

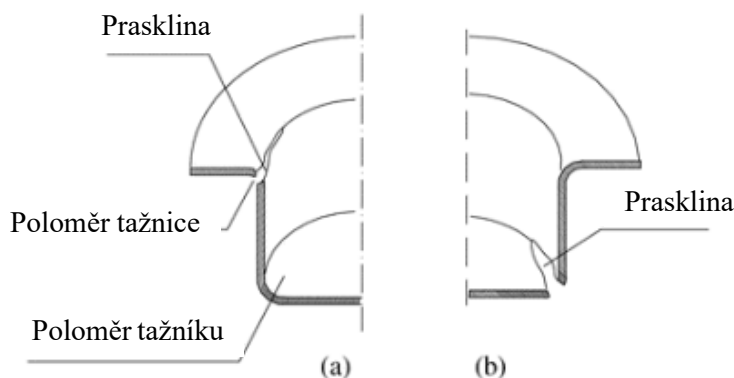
Polotovar kruhového tvaru pro tažení poháru je držen na místě přidržovačem, který působí na polotovar určitou silou. Síly na přidržovač jsou vyvinuty pomocí pružiny, vzduchového nebo hydraulického válce, případně druhého beranu lisu. Více jsou preferovány dvě poslední metody, protože poskytují téměř konstantní tlak, který je pro tažení nejlepší. Pokud je síla přidržovače při zahájení tažení příliš nízká, mohou se na polotovaru objevit vrásky dříve, než tlak dosáhne dostatečnou velikost, což je typické u pružinových systémů. Naopak, pokud je síla přidržovače příliš vysoká, tok materiálu se omezí a nadměrné protažení může způsobit prasknutí poháru.[22]



Obrázek 23. Znárodnění toku kovu při tažení [22]

1.4.2 Poloměr rohů tažníku a tažnice

Pro úspěšný proces tažení je velmi důležitý poloměr tažníku a tažnice. Pokud je poloměr tažení příliš malý, tahový tok je omezen zvýšeným třením a soudržnost obrobku se může přerušit (viz. obrázek 24). Pokud je naopak poloměr tažení příliš velký, tažnice nedokáže regulovat tlakový tok, což vede ke vzniku vrásek na obrobku.



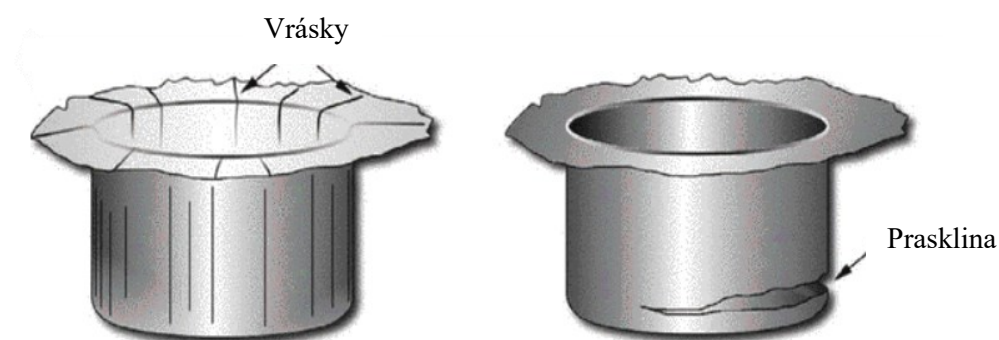
Obrázek 24. Praskliny pohárku při hlubokém tažení [22]

a) Příliš malý poloměr tažnice, b) Příliš malý poloměr tažníku

K fraktuře může dojít i v důsledku vysokého tření mezi tažnicí, obrobkem a přidržovačem polotovaru. Sílu přidržovače nelze snížit, jinak se objeví vrásky. Proto je nutné použít mazivo ke snížení tření. Téměř všechny operace tažení vyžadují z tohoto důvodu určitý druh maziva.[22]

1.4.3 Defekty způsobené tažením

Mezi nejběžnější vady při tažení tenkostěnných plechových dílů zahrnují vznik vrásek (způsobených klopením), praskání materiálu (zejména v rozích razníku a matrice) a poškrábání povrchu (viz. obrázek. 25).



Obrázek 25. Defekty vzniklé během tažení [20]

Vrásky se často objevují při tažení velmi tenkých plechů, například u plechů o tloušťce 20 μm , kdy materiál pravděpodobně podléhá klopení. Použití přidržování polotovaru je tedy klíčové. Menší pohárky z tenkých plechů nemusí být realizovatelné, a to buď kvůli nadměrnému pružení materiálu u mělkých tvarů, nebo kvůli tvoření trhlin v důsledku použití malých tažníků. Vyvarování se těchto problémů bude také záviset na způsobu manipulace s polotovary při procesu tažení.[20]

1.4.4 Maziva pro tažení

Během hlubokého tažení existují různé podmínky mazání, od hydrodynamického mazání v oblasti přidržovače polotovaru, až po mezní mazání v oblasti tažného poloměru, kde často dochází k narušení mazacího filmu. Mazání při hlubokém tažení je důležité pro snížení sil, zvýšení tažnosti, omezení opotřebení nástroje a snížení vad na obrobku. Výběr maziva závisí na obtížnosti operace, typu tažení a materiálu (viz. tabulka 2). V tabulce je mírná operace typicky mělké tažení nízkouhlíkové oceli, středně obtížná operace odpovídá hlubokému tažení nízkouhlíkové oceli a velmi náročná operace zahrnuje tažení nábojnic nebo bezešvých trubek.[19]

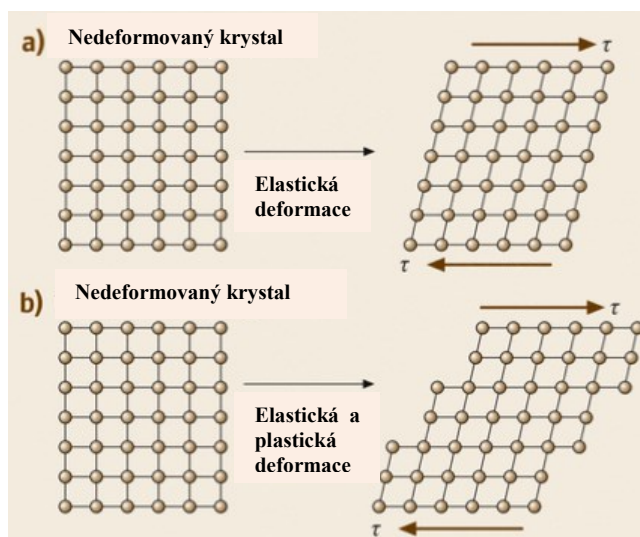
Tabulka 2. Přehled maziv používaných při tažení [19]

TVÁŘENÝ MATERIÁL	MAZIVO
Ocel – uhlíková a nízkolegovaná	Mírná operace: Minerální olej střední až vysoké viskozity, mýdlové roztoky, emulze mastného oleje + minerálního oleje. Středně obtížná operace: Tuk nebo olej v mýdlových emulzích, mastný olej + minerální olej, mýdlo + vosk. Náročná operace: Sušené mýdlo nebo voskový film, sirné nebo fosfátové povlaky + emulze s jemně rozptýlenými plnivy a někdy sirné oleje.
Nerezová ocel	Mírná operace: Kukuřičný nebo ricinový olej, ricinový olej + emulgované mýdlo, voskovaný nebo naolejovaný papír. Středně obtížná operace: Suspenze práškového grafitu, pevný voskový film. Náročná operace: Bílá olovnatá barva a lněný olej v husté konzistenci.
Hliník a hliníkové slitiny	Mírná operace: Minerální olej, směsi mastných olejů v minerálním oleji, sířené mastné oleje, nejlépe obohacené o 10 % mastného oleje. Náročná operace: Sušený mýdlový nebo voskový film, minerální olej nebo mastný olej, tukové emulze v mýdlové vodě + jemně rozptýlená plniva.

1.5 Mechanismy plastické deformace při tváření

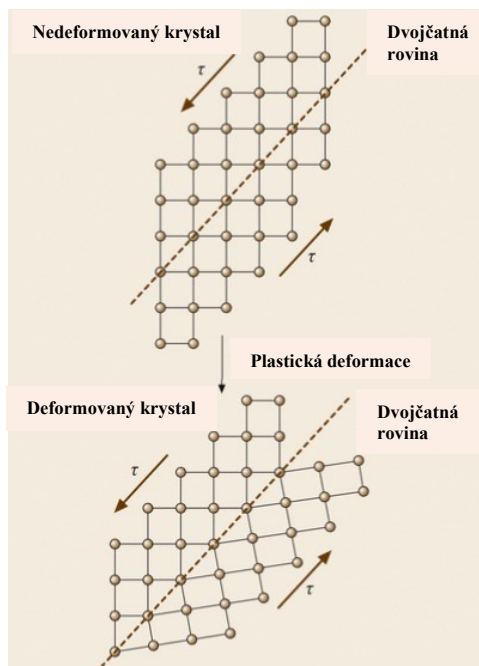
Krystalická struktura mřížek kovových materiálů byla popsána v podkapitole **1.1.1 Tváření za studena**. Pokud je kovový krystal vystaven smykovému napětí, nejprve dochází k elastické deformaci mřížky (viz. obrázek a) 26). Po odstranění smykového napětí se mřížka vrátí do svého původního tvaru. Pokud se smykové napětí zvýší, krystal se bude deformovat

jak elasticky, tak i plasticky, což znamená, že po odstranění napětí se krystal nevrátí úplně do svého původního tvaru (obr. b) 26). Plastické deformace probíhají prostřednictvím pohybu atomových vrstev. Tento pohyb nastává na takzvané skluzových rovinách ve skluzových směrech.[23]



Obrázek 26. Plastická a elastická deformace krystalické mřížky [23]

Druhým mechanismem plastické deformace je dvojčatění (viz. obrázek 26). Během dvojčatění se atomy na jedné straně dvojčatné roviny téměř okamžitě přesunou do zrcadlové polohy na druhé straně roviny.

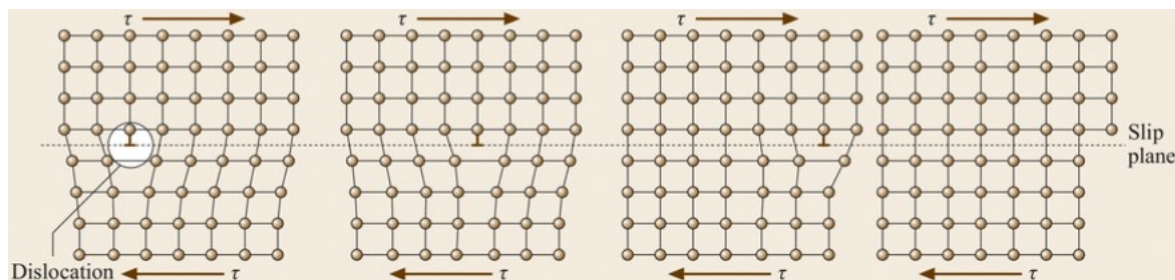


Obrázek 27. Dvojčatění během plastické deformace [23]

Dvojčatění je preferovaným mechanismem plastické deformace u kovů s hexagonální těsně uspořádanou krystalovou mřížkou, jako jsou titan, hořčík a slitiny zinku. U jiných kovů

je dvojčatění výhodné při velmi vysokých deformačních rychlostech, protože plastická deformace dvojčatěním probíhá mnohem rychleji než deformace skluzem.

Reálné kovy obsahují krystalové defekty nazývané dislokace (viz. obrázek 28), které umožňují jiný mechanismus skluzu. Tento smyk způsobený dislokacemi probíhá postupně po smykové rovině, a proto vyžaduje mnohem nižší hodnoty smykového napětí. Dislokace jsou přítomny prakticky v každém kovu, přičemž vznikají již během tuhnutí materiálu.[23]

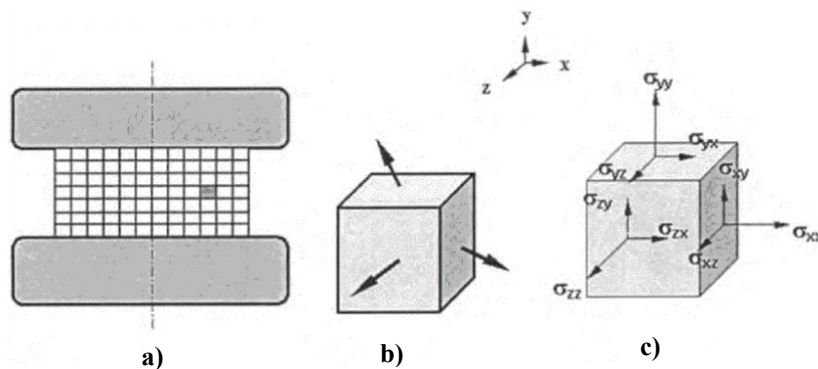


Obrázek 28. Plastická deformace pohybem dislokací [23]

Dislocation – Dislokace, Slip plane – Skluzová rovina

1.5.1 Stav napjatosti

V deformovaném objektu existují různé stavy napjatosti v závislosti na podmínkách zatížení a okrajových omezeních. Když se vezme za příklad proces pěchování válci (viz. obrázek a) 29). Lokální stav napjatosti v deformovaném válci lze vizualizovat rozdělením objektu na malé elementy (viz. obrázek a), b) 29). Stav napjatosti lze také vyjádřit v maticové formě, běžně označované jako tenzor napětí (viz. obrázek c) 29).[24]



Obrázek 29. Působení napětí na jednotlivé elementy [24]

a) Proces pěchování válcem, b) Síly působící na element,

c) Napěťové složky působící na element

2 MATERIÁLY PRO PLOŠNÉ TVÁŘENÍ PLECHŮ

Aplikace tváření mohou zahrnovat vše od jednoduchého ohýbání až po razidla a hluboké tažení složitých tvarů. K dosažení kvalitních dílů je nezbytné znát tvářecí charakteristiky nebo tvářitelnost materiálu plechu za podmínek, za kterých je formován. Tvářitelnost označuje schopnost plechu být deformován do požadovaného tvaru při zachování strukturální integrity bez trhání, pomačkání a vrásek, nadměrného ztenčení a podobně. Nejběžnějšími materiály pro tváření plechu jsou různé typy ocelí (nerezové oceli, hliník a jeho slitiny a slitiny hořčíku). Tato kapitola poskytuje přehled označení a vlastností daných materiálu relevantních pro tváření nízkouhlíkových ocelí, nerezových ocelí, hliníkových a hořčíkových slitin. Jedna z velice důležitých kategorií plechových ocelí jsou pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS), které se používají například pro redukcii hmotnosti v automobilovém průmyslu.[25]

2.1 Kvalita plechů

Výroba plechu zahrnuje několik klíčových procesů, mezi které patří odlévání, válcování a tepelné zpracování. Tenké plechy se získávají válcováním za studena z plechů předem zpracovaných válcováním za tepla. Před zahájením válcování za studena je nutné odstranit z povrchu plechu okuje vytvořené tepelným zpracováním. Samotný proces válcování vede k zpevnění materiálu a způsobuje orientaci struktury ve směru válcování, což způsobuje anizotropii plechu. K eliminaci anizotropie se využívá rekrytalizační žihání. Každý z těchto kroků, včetně parametrů, jako je teplota nebo míra úběru materiálu, ovlivňuje konečnou kvalitu a rozměrovou přesnost plechu.

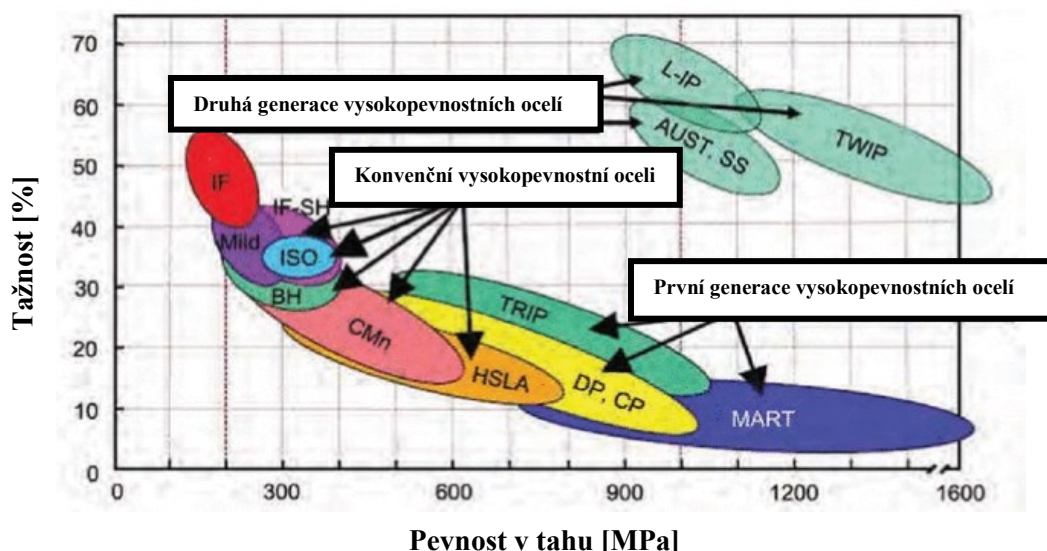
Plech určený pro hluboké tažení by měl mít hladký a čistý povrch, který může být lesklý nebo matný. Na povrchu nesmí být žádné vady (šupiny, trhliny, zaválcované okuje), přičemž kvalitnější plechy nesmí vykazovat zabarvení po tepelném zpracování. Kvalitu tažení ovlivňuje také drsnost povrchu a tvar výstupků, které vytvářejí prostor pro mazivo a tím zlepšují zpracovatelnost materiálu.

Podle tloušťky se plechy dělí na tři kategorie: velmi tenké (do 0,4 mm), tenké (0,4 až 4 mm) a tlusté (nad 4 mm). Každá kategorie má specifické tolerance. U tenkých plechů se pohybují mezi 7 až 10 % jmenovitého rozměru, zatímco u tlustých plechů jsou v rozmezí 3 až 6,5 %.[26]

2.2 Kategorie ocelí

V rámci kategorie ocelí je třeba rozlišovat, zda se jedná o nízkolegované nebo vysokolegované oceli. Hranice 5 % legujících prvků je stanovena jako arbitrární mez mezi těmito dvěma skupinami. Různé prvky se do ocelí přidávají za účelem zlepšení vlastností jako jsou pevnost, odolnost proti korozi, tvářitelnost, svařitelnost a obrobitelnost. Přídavky legujících prvků zvyšují specifické vlastnosti ocelí pro určité aplikace.

Pro proces hlubokého tažení existuje velké množství druhů ocelí. Pro volbu správného druhu oceli se musí vzít v potaz jak samotný proces tažení, tak i požadované kvality výsledného produktu. Na grafu (viz. obrázek 30) lze vidět závislost meze pevnosti na tažnosti u jednotlivých typů ocelí.[27; 28]



Obrázek 30. Závislost pevnosti v tahu na tažnosti různých typů ocelí [27]

Rozdělení ocelí podle metalurgie:

- Nízkopevnostní oceli (LSS) - měkké oceli pro hluboké tažení s kontrolovanou mezí kluzu (LC, IF a Mild oceli).
- Vysokopevnostní oceli (HSS) - běžně používané konvenční oceli (IF-HS, BH, CMN a HSLA oceli).
- Pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS) - speciální oceli s vyšší pevností než HSS, určené pro bezpečnostní a nosné části automobilových konstrukcí (DP, CP, TRIP, TWIP a MS oceli).[29]

2.2.1 Uhlíkové oceli

Uhlíkové oceli jsou nejrozšířeněji používanými kovy, které mají široké spektrum aplikací. Vyznačují se dobrou pevností, tažností a svařitelností. Uhlíkové oceli se klasifikují podle obsahu uhlíku. Nízkouhlíková ocel obsahuje méně než 0,3 % C, středně uhlíková ocel má 0,30 až 0,6 % C a vysokouhlíková ocel obsahuje více než 0,6 % C. Čím vyšší je obsah uhlíku v oceli, tím vyšší je její pevnost a tvrdost, ale zároveň klesá její tažnost, houževnatost a svařitelnost.[27]

Nízkouhlíkové oceli (LC)

Plechové oceli se vyrábějí s různým chemickým složením, avšak většina z nich jsou nelegované nízkouhlíkové oceli používané pro lisování, například při výrobě automobilových karoserií a spotřebičů. Pro tyto hlavní aplikace je typické složení: 0,03 až 0,10 % uhlíku, 0,15 až 0,50 % manganu, maximálně 0,035 % fosforu a maximálně 0,04 % síry. Tyto oceli jsou obvykle válcovány za studena a následně žhánuty. Používají se v karoseriích automobilů a spotřebičích. Nízkouhlíkové oceli jsou nejčastěji používaným materiálem pro plechy díky své nízké ceně a dobré tvářitelnosti. Běžné nízkopevnostní nízkouhlíkové plechy jsou však postupně nahrazovány různými vysokopevnostními nízkolegovanými oceli (HSLA) a pokročilými vysokopevnostními oceli (AHSS).[25]

2.2.2 IF (Interstitial Free) oceli

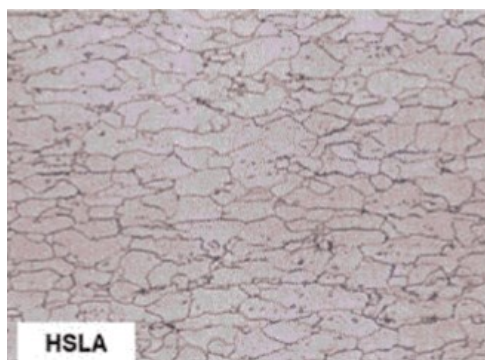
IF oceli jsou oceli bez intersticiálních látek. U ocelí bez intersticiálních látek (IF), které jsou také označovány jako oceli pro extra hluboké tažení, je odstranění intersticiálních látek (uhlíku a dusíku) dosaženo přidáním dostatečného množství prvků tvořících karbidy a nitridy (obvykle titanu nebo niobia), které zcela vážou uhlík a dusík.[25]

2.2.3 BH (Bake Hardenable) oceli

Oceli s možností tvrdnutí při pečení (BH) mají dobrou kombinaci pevnosti a tvářitelnosti. Tato kombinace je činí ideálními pro aplikace, kde je požadována odolnost proti promáčknutí, jako jsou kapoty, dveře a blatníky automobilů. Zvýšení meze kluzu u této třídy ocelí vzniká díky práci (ztvrdnutím) během procesu pečení, který nastává po lisování. Proces tvrdnutí při pečení způsobuje zvýšení meze kluzu v rozmezí od 28 do 56 MPa. Efekt tvrdnutí při pečení je možný pouze tehdy, pokud ocel prošla malou plastickou deformací (<5 %) a byla vystavena teplotě pečení alespoň 150 °C.[27]

2.2.4 HSLA (High Strength Low Alloy) oceli

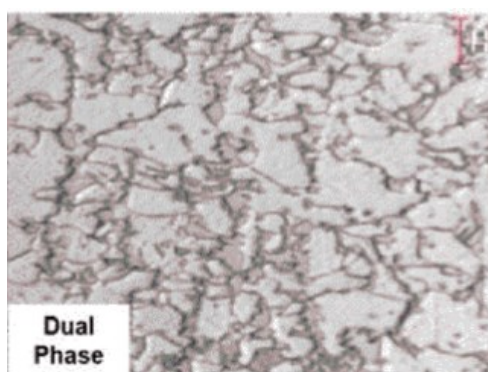
HSLA oceli mají velmi nízký obsah uhlíku a vynikají vysokou plasticitou. Tento typ oceli se vyrábí jak válcováním za studena, tak za tepla. Jejich zpevnění je dosaženo především mikrolegujícími prvky, které vytvářejí nitridy, karbidy a karbonitridy, což přispívá k jemné precipitaci karbidů, zjemnění zrna a zesílení matrice.[29]



Obrázek 31. Typická mikrostruktura HSLA [30]

2.2.5 DP (Dual Phase) oceli

Duplexní mikrostruktura (viz. obrázek 32) DP ocelí se skládá z měkké ferritové matrice a mezi 20 a 70 % objemového podílu martenzitu. Podíl martenzitu určuje úroveň pevnosti této oceli. K dosažení martenzitové fáze se používají speciální tepelné úpravy, které zahrnují kalení a popouštění. Tato mikrostruktura dává DP ocelím jejich vysokou schopnost ztvrdnutí a lepší tvárnost ve srovnání s ocelí HSLA. Dvojfázové oceli jsou navrženy tak, aby poskytovaly konečné pevnosti v tahu od 600 do 1000 MPa.[27]



Obrázek 32. Typická mikrostruktura DP [30]

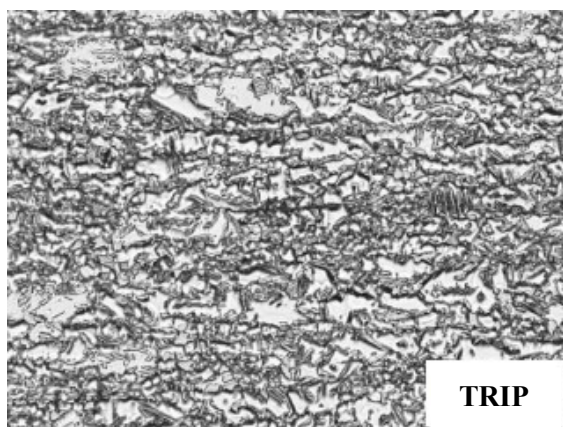
2.2.6 CP (Complex Phase) oceli

Vícefázové oceli obsahují malé množství martenzitu, někdy i zbytkový austenit ve feriticko bainitické matrici. Vysokého zjemnění zrna lze dosáhnout pomalou rekrytalizací. Jednou z výhod CP ocelí je vysoká mez kluzu při zachování pevnosti v tahu. Tyto oceli se používají

pro výrobu automobilových dílů jednoduchých tvarů, kde dochází k minimální deformaci (například dveřní lišty, příruby sedadel).[29]

2.2.7 TRIP (Transformation Induced Plasticity) oceli

Oceli s plasticitou indukovanou transformací se skládají ze dvou fází. Feriticko-bainitické matrice 5 až 20 % objemového podílu metastabilního zadrženého austenitu, který se během plastické deformace postupně transformuje na martenzit. Tato transformace poskytuje významné zpevnění a odolnost proti lokalizované deformaci. Oceli s plasticitou indukovanou transformací se vyznačují vysokými pevnostmi v tahu a vysokými rychlostmi ztvrdnutí. Vynikající tvářitelnost ocelí TRIP v kombinaci s jejich vysokou pevností je činí atraktivními materiály pro aplikace zaměřené na snížení hmotnosti. Oceli TRIP jsou využívány pro aplikace, které vyžadují maximalizaci absorpce energie při nárazu.[27]



Obrázek 33. Typická mikrostruktura TRIP [30]

2.2.8 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

Oceli s plastickým indukovaným dvojčatěním (TWIP) jsou považovány za druhou generaci pokročilých vysokopevnostních ocelí (AHSS), protože byly vyvinuty po první generaci dvoufázových a příbuzných ocelí. Tyto oceli jsou navrženy tak, aby poskytovaly kombinaci velmi vysoké pevnosti v tahu a výjimečné tažnosti, která výrazně převyšuje vlastnosti uhlíkových ocelí aktuálně používaných v automobilovém průmyslu. U nově vyvinutých TWIP ocelí má výsledný materiál pevnost v tahu 1000 MPa a celkové prodloužení přesahující 50 %. Tyto oceli mají dostatečnou tažnost pro formování jakéhokoli tvaru požadovaného průmyslem a větší potřebnou tvářitelnost, než je doopravdy nutné. Bohužel, tato výjimečná tvářitelnost je vykoupena určitými nevýhodami, kvůli nimž mají TWIP oceli značná omezení v praktickém využití. Jednou z nevýhod je například mez kluzu, která se pohybuje mezi 400–500 MPa, což je výrazně méně, než je v průmyslu žádoucí.[30]

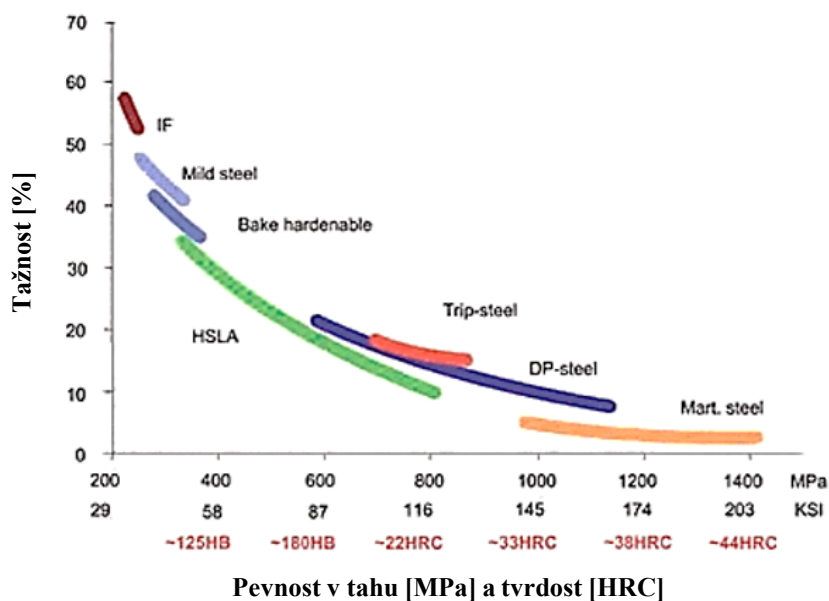
2.3 Shrnutí přehledu ocelí

Shrnutí kategorií ocelí (viz. tabulka 3), kde se uvádí jejich rozsahy pevnosti v tahu a seznam skupin ocelí pro každou kategorii. Z tabulky je patrná extrémně vysoká pevnost a vynikající tažnost druhé generace pokročilých vysokopevnostních ocelí.

Tabulka 3. Kategorie ocelí s rozsahem pevnosti v tahu, tažnosti a skupinami ocelí [27]

Kategorie	Rozsah pevnosti v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Typ oceli
Měkké oceli	<300	30–45	Nízkouhlíková, IF
Konvenční vysokopevnostní oceli	300–800	10–45	IF-HS, BH, HSLA
Vysokopevnostní oceli (1. generace)	500–1600	5–30	DP, TRIP, CP
Vysokopevnostní oceli (2. generace)	900–1600	45–70	TWIP, AUST SS

Oceli, které se v současnosti používají v automobilovém průmyslu, spadají do prvních tří kategorií uvedených v tabulce. Poslední kategorie je stále ve fázi komerčního vývoje a některé z těchto ocelí byly v automobilových aplikacích využity pouze v omezené míře.[27]

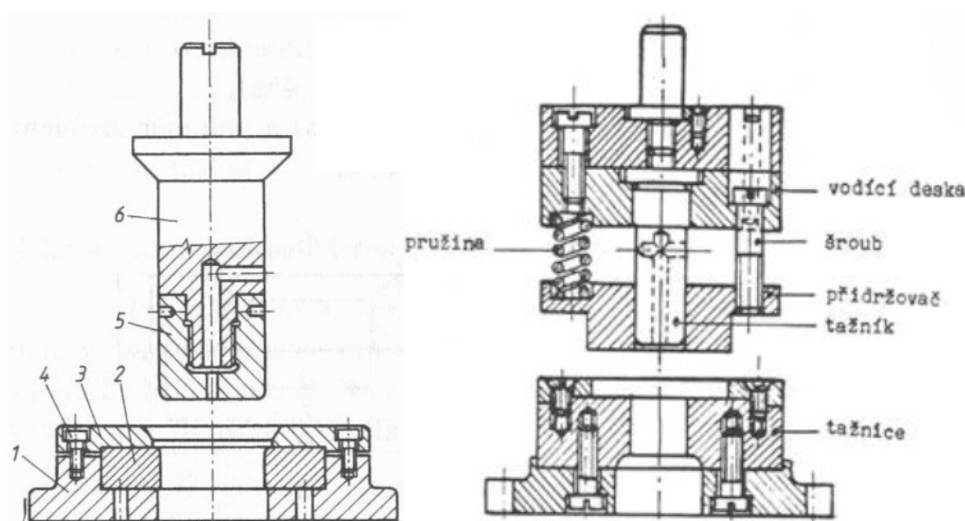


Obrázek 34. Graf prodloužení-pevnosti-tvrdosti pro aktuálně používané oceli [27]

Graf (viz. obrázek 34) ukazuje vztah mezi tažností, pevností a tvrdostí u aktuálně používaných jakostí ocelí v automobilovém průmyslu. S rostoucí pevností a tvrdostí dochází ke snižování tažnosti. Pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS) stále více nahrazují tradiční měkké a HSLA oceli v nových vozidlech.[27]

3 NÁSTROJE PRO TAŽENÍ

Hlavní funkční části tažného nástroje je tažník a tažnice, případně dle nutnosti ještě přidržovač, který zabráňuje zvlnění plechu během tažení. Na základě povahy prováděné operace lze tažné nástroje rozdělit na ty určené pro první tah a na nástroje pro následné tahy. U obou těchto skupin mohou být nástroje jednoduché, sloučené nebo speciální. Dále se tažné nástroje klasifikují podle typu lisu, pro který jsou určeny. Mohou být navrženy pro jednočinné, dvojčinné a trojčinné, neboli postupové lisy. Podle druhu přidržovače se pak dělí na varianty bez přidržovače a na nástroje s přidržovačem, který může být pružinový, pryžový, pneumatický nebo hydraulický.[9]

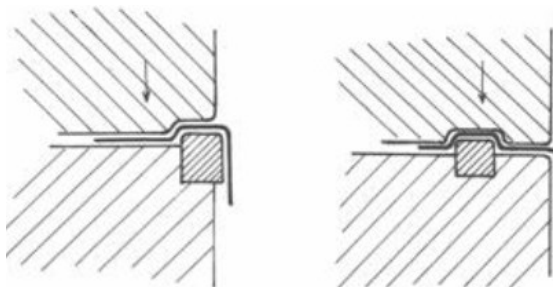


Obrázek 35. Tažný nástroj bez přidržovače a) a s přidržovačem b) [9; 31]

1 - Základová deska, 2 - Tažnice, 3 - Zakládací kroužek, 4 - Šroub,
5 – Tažník, 6 – Držák tažníku

Tažné hrany a brzdící drážky

Tažná hrana je často opatřena vložkami, což usnadňuje výměnu opotřebených částí a umožňuje úpravu tvaru. Pro zvýšení brzdného účinku přidržovače se využívají speciální brzdící lišty.[9]



Obrázek 36. Nalevo zvýšená tažná hrana napravo brzdící lišta [9]

3.1 Konstrukce tažných nástrojů

Při návrhu lisovacího nástroje pro plošné tváření je klíčové analyzovat faktory ovlivňující jeho funkční části, určit jejich význam a na základě těchto poznatků navrhnout konstrukci nástroje. Mezi nejdůležitější vlivy patří:

- Materiálové – Technologické a mechanické vlastnosti jako je mez kluzu a mez pevnosti v tahu.
- Konstrukční – Poloměr zaoblení tažné hrany tažníku, tažné hrany tažnice a tažná mezera.
- Technologické – Tření mezi funkčními částmi nástroje a polotovarem, způsob tažení, vyvinutá rychlost tažení, vliv tlaku přidržovače.
- Přesnost výroby – Převážně závislá na konstrukčních a materiálových vlivech.[31]

3.1.1 Materiály pro nástroje a tvárníky

Nástrojové a tvárníkové oceli jsou speciálně legované oceli navržené pro vysokou pevnost, rázovou houževnatost a odolnost proti opotřebení. Běžně se používají při tváření a obrábění kovů jak při pokojové, tak při zvýšené teplotě.

Ocel určená pro většinu typů nástrojů a tvárníků musí být tepelně zpracovaná, obvykle zakalená a následně popuštěná, aby se dosáhlo požadovaných vlastností pro konkrétní použití. Výběr materiálu nástroje závisí na velikosti výrobní série, náročnosti tváření a druhu tvářeného materiálu. Nástrojové materiály lze rozdělit do tří hlavních kategorií (nemetallické, nezelezné a železné materiály).

Nemetallické materiály

Keramické se používají pro velké série lisovaných dílů (více než 100 000 kusů). Mají velmi vysokou tvrdost, avšak jsou křehké, a proto se nejčastěji využívají jako děrovací trny nebo vložky. Mezi keramické materiály nebo tvrdokovy používané při lisování patří mimo jiné karbid wolframu (WC), oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid zirkoničitý (ZrO_2).

Nezelezné materiály

Slitiny zinku a bizmutu se využívají pro prototypové aplikace a malosériovou výrobu. Použití hliníku není běžné, protože povrch nástroje se může snadno poškrábat. Hliníkový bronz, což je slitina mědi a hliníku, se používá k tváření uhlíkových a nerezových ocelí. Tyto

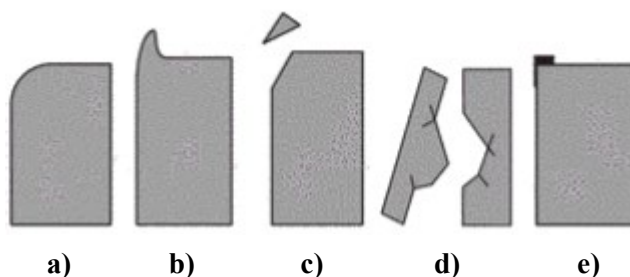
slitiny mají vysokou odolnost proti zadírání, avšak kvůli jejich nízké tvrdosti dochází k jejich rychlému opotřebení.

Železné materiály

Mezi železné nástrojové materiály patří litina, lité oceli nebo nástrojové oceli. Tyto materiály jsou nejběžnějšími nástrojovými materiály v průmyslu tváření plechů a budou podrobněji vysvětleny v následujících kapitolách.[19; 32]

3.1.2 Běžné poruchy nástrojů při tažení

Při tažení může dojít důsledkem působení vlivů k pěti nejběžnějším poruchám (viz. obrázek 37). Patří mezi ně opotřebení, plastická deformace, lámání, praskání a zadření.



Obrázek 37. Poruchy nástrojů [32]

*a) Opatření, b) Plastická deformace, c) Lámání,
d) Praskání, e) Zadrhávání*

Opotřebení

Je poškození pevného povrchu, při němž dochází k ztrátě nebo posunu materiálu. Opatření je způsobeno klouzavým kontaktem mezi obrobkem a nástrojem a lze je rozdělit na dva typy:

- Abrazivní opotřebení je způsobeno tvrdými částicemi, které se pohybují po pevném povrchu.
- Adhezivní opotřebení je definováno jako opotřebení způsobené lokalizovaným spojováním mezi povrchy, což vede k přenosu materiálu mezi těmito povrchy nebo ke ztrátě materiálu z jednoho z povrchů.

Plastická deformace

Může být způsobena vysokým kontaktním tlakem, který přesahuje mez kluzu materiálu nástroje.

Lámání

Tento typ poruchy je způsobený výsledkem vysokých napětí, která přesahují únavovou pevnost materiálu nástroje, k této poruše obvykle dochází na ostrých hranách.

Praskání

Může být způsobeno vysokými napětími, která přesahují houževnatost materiálu tvářecího nástroje.

Zadrhávání

Tato vada je velice podobná jako je vada plastickou deformací. Dochází k plastickému toku a následnému toku, který zaručí přenos materiálu.[32]

4 SIMULACE TVÁŘENÍ

Do nedávné doby byl návrh nástrojů pro tváření kovů většinou založen na znalostech získaných praxí a stanovení optimálního nástroje často vyžadovalo zdlouhavý a nákladný proces pokusů a omylů. Dnes se však simulace tvářecích procesů plechových dílů provádějí metodou konečných prvků již ve fázi návrhu. Hlavním cílem tohoto procesu je ověření vyrobitelnosti plechových dílů a získání cenných informací pro optimální konstrukci nástroje.

V automobilovém průmyslu jsou simulace dnes zpravidla omezeny na procesy tváření plechu, kde dochází k největším změnám tvaru. Mnoho komerčně dostupných programů založených na metodě konečných prvků je dnes schopno spolehlivě předvídat možný vznik trhlin, změny tloušťky plechu i tvarové změny u konvenčních plechových materiálů.

Používají se různé simulační programy pro tváření kovů, a to v závislosti na tom, v jaké fázi výrobního procesu se operace nachází. Tyto programy se liší především v náročnosti na výpočetní čas a uživatelské rozhraní.

Numerická simulace procesů tváření plechu se stala nepostradatelným nástrojem pro návrh dílů a jejich výrobních procesů v odvětvích, jako je automobilový a letecký průmysl. Výrazný přínos virtuálního testování při zkracování doby uvedení výrobku na trh a snižování nákladů na vývoj nových produktů byl hlavním faktorem rozšířeního využití těchto metod. Hlavním numerickým nástrojem používaným v tomto kontextu je metoda konečných prvků (FEM).

Je to především automobilový průmysl, který nadále pohání vývoj numerické simulace tváření plechů, a to díky jasně přísným environmentálním a bezpečnostním normám, které vedly k vývoji materiálů s lepší pevnostní a hmotnostní charakteristikou. Nově zavedené materiály umožňují vyrábět díly z tenčích plechů při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti, což vede ke snížení celkové hmotnosti konstrukce, což je jeden z největších klíčových kroků k naplnění stále přísnějších požadavků na bezpečnost cestujících a emisní limity.

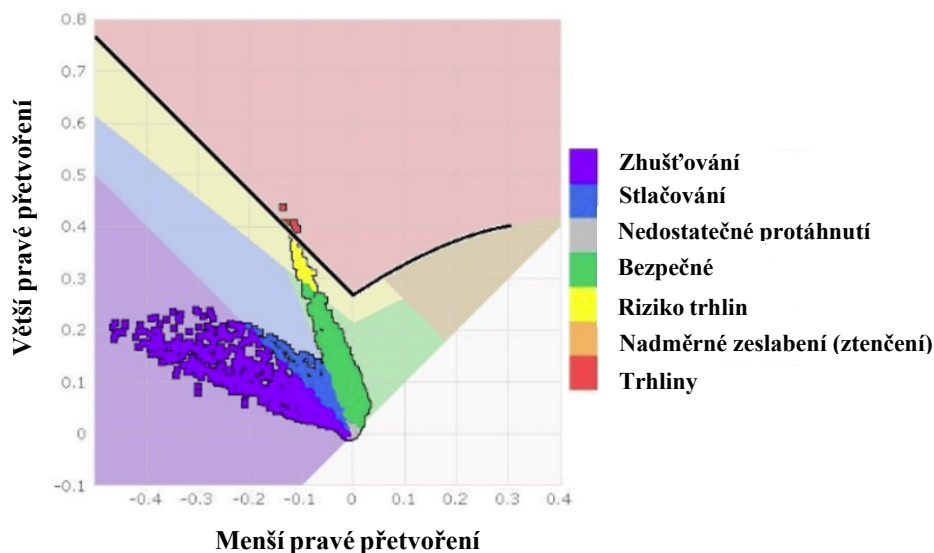
Je však obecně známo, že se zvýšená pevnost kovových materiálů obvykle pojí s poklesem tažnosti (tvárnosti). To přináší nové výzvy v oblasti predikce vad při tváření a vede k hledání alternativ ke konceptu diagramu mezních tvářecích křivek (FLD).[33; 34]

4.1 Diagram mezních tvářecích křivek (FLD)

Je samozřejmé, že hlavním účelem jakékoli simulace tváření je ověřit, jak se materiál chová ještě před samotnou výrobou tvářecího nástroje. Původně byl Forming Limit Diagram (FLD) výsledkem diplomového výzkumného projektu z roku 1965. Jeho cílem bylo zjistit, co způsobuje lokalizované zúžení (necking) a trhání při tváření plechu, a zda lze tyto poruchy předpovědět ještě před jejich skutečným vznikem.

Diagram FLD poskytuje snadno pochopitelný přehled o mnoha možných kritériích porušení najednou, který umožňuje rychle odhalit kritická místa na zadaném dílu. Zejména na začátku tvářecího procesu nejsou tak moc důležité konkrétní detaily, ale spíše jak upravit rozhodující parametry jako je například přídavek nebo tvar přídržovače. Po úpravě tvaru nástroje a nové simulaci pak můžete rychle ověřit, zda změny proces zlepšily, nebo naopak zhoršily.

V programu AutoForm lze vizualizovat deformační stavy všech prvků v diagramu mezních tvářecích křivek (FLD). Barvy znázorněné v FLD diagramu (viz. obrázek 38) se využívají k vyznačení odpovídajícího deformačního stavu plechových prvků. Tento výstupní parametr se nazývá Formability (tvářitelnost).[35; 36]



Obrázek 38. FLD Diagram [36]

4.2 Výsledky simulací

Simulace tváření se stala standardem v automobilovém průmyslu, jelikož se používá pro vývoj a optimalizaci každého plechového dílu.

Pro znázornění procesu tváření kovu je potřeba model reálného procesu. Tento model je v softwaru počítán pomocí metody konečných prvků založené na implicitních nebo

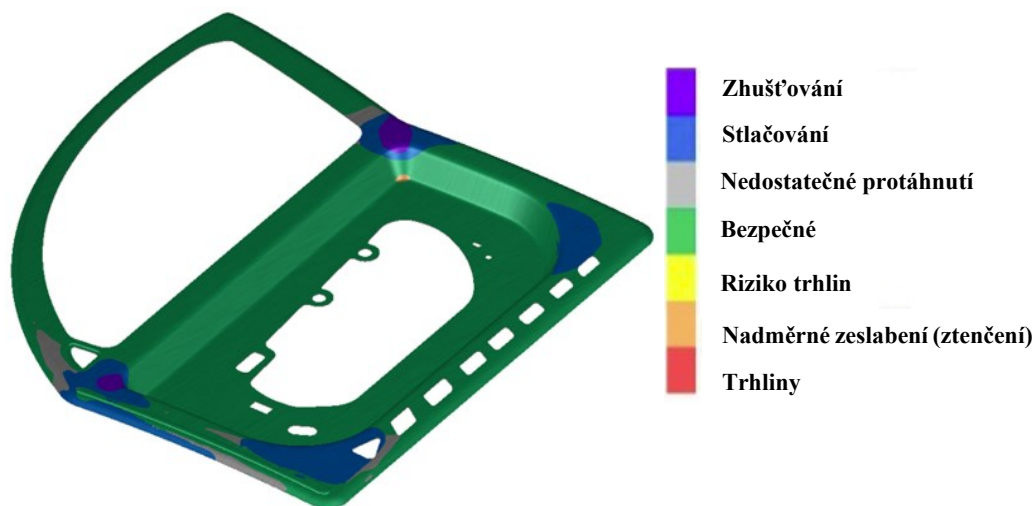
explicitních přírůstkových technikách. Parametry modelu musí co nejpřesněji popisovat reálný proces, aby byly výsledky simulace realistické.

Simulace tváření kovu umožňuje rychlou a přesnou simulaci celého procesu tváření včetně tažení a následných operací, stejně jako pružného návratu (springback). Díky tomu může být součástka kompletně a efektivně vyvinuta.

Typické parametry pro simulaci tváření jsou například geometrie dílu a nástroje, vlastnosti materiálu, lisovací síly a tření. Simulace vypočítává napětí a přetvoření během procesu tváření. Kromě toho umožňují simulace rozpoznat chyby a problémy jakou jsou například vrásky nebo trhliny, stejně jako výsledky pevnosti materiálu a zeslabení materiálu. I pružný návrat, tedy elastické chování materiálu po tváření, lze předpovědět dopředu. Simulace tváření také poskytuje cenné informace o vlivu změn procesu na robustnost lisování.[37]

4.2.1 Simulace tvářitelnosti (Formability)

Tvářitelnost ukazuje, jak se daný díl během procesu přetváří. Cílem hlubokého tažení je dosáhnout co největšího možného přetvoření, jelikož se tím minimalizuje jev odpružení a zároveň se zvyšuje pevnost součásti, což je žádoucí zejména u konstrukčních dílů automobilů. Důležité však je, aby během procesu nevznikaly vady jako je trhání materiálu, nadměrné ztenčení, stlačení nebo zesílení (viz. obrázek 39).[38]

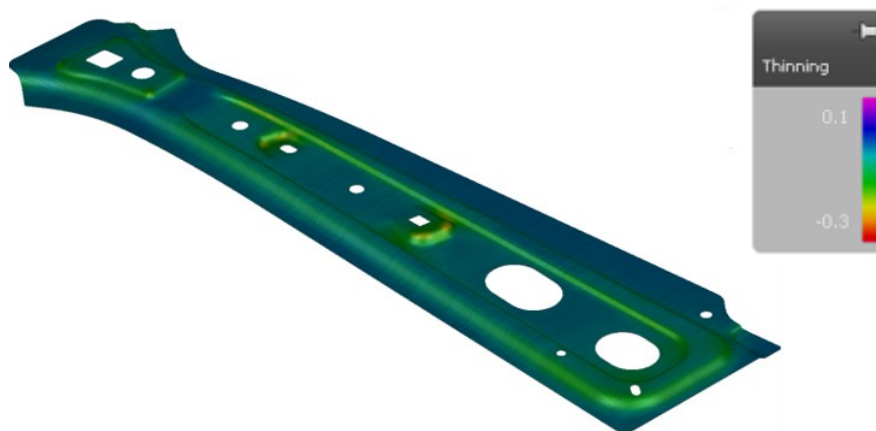


Obrázek 39. Vyhodnocení tvářitelnosti v softwaru Autoform R8

4.2.2 Simulace nadměrného zeslabení (Thinning)

Analýza (nadměrného zeslabení) ukazuje, o kolik procent došlo ke změně tloušťky plechu během tažení. Záporné hodnoty značí ztenčení materiálu, zatímco kladné hodnoty poukazují

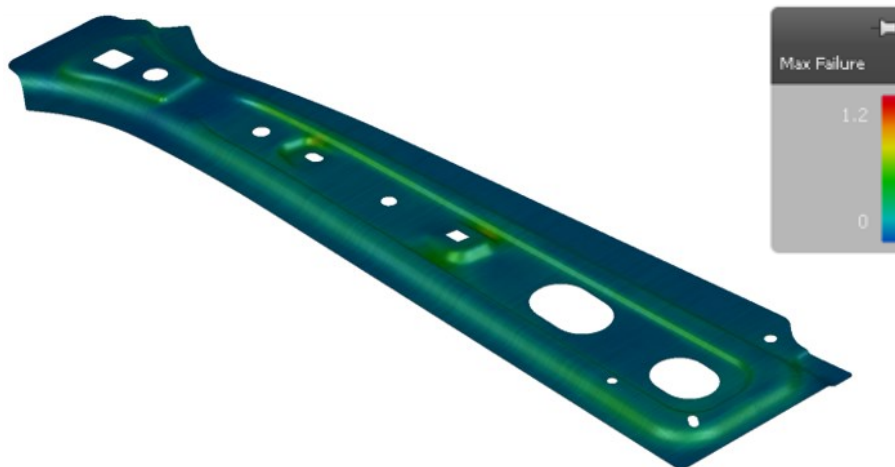
na jeho nahromadění v dané oblasti. Obecně platí, že pokud ztenčení přesáhne 20 %, je vhodné zkontrolovat a případně upravit počáteční podmínky simulace.[38]



Obrázek 40. Vyhodnocení nadměrného zeslabení v softwaru Autoform R8

4.2.3 Simulace porušení (Failure)

Tento typ analýzy slouží k určení oblastí, které jsou nejvíce ohrožené porušením materiálu. Kritická hranice je stanovena na hodnotu 1, přičemž už při hodnotě 0,8 dochází k výraznému nárůstu rizika vzniku trhlin či odtržení.[38]



Obrázek 41. Vyhodnocení porušení v softwaru Autoform R8

4.2.4 Simulace zvlnění (Wrinkling)

Zvlnění vzniká v důsledku nerovnoměrného stlačení materiálu. Mezitím co se materiál při tažení přesouvá směrem ke středu, dochází na některých místech ke ztenčení a jinde k nahromadění, což vede právě ke vzniku zvlnění. U dané součásti je riziko vzniku tohoto jevu velmi nízké (viz. obrázek 41). Za kritickou hodnotu pro rovné plochy se považuje hodnota 0,3.[38]

II PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Všechny hlavní cíle diplomové práce, které musí být zpracovány zní takto:

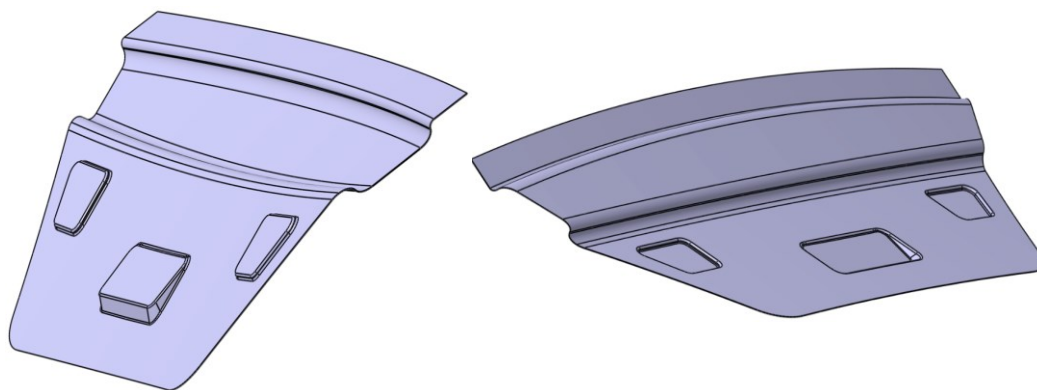
1. Vypracujte literární rešerši zabývající se řešeným tématem.
2. Vytvořte model zadaného plechového dílu.
3. Navrhněte postup tvářecích operací a proveďte analýzu výrobního procesu.
4. Navrhněte koncepci tvářecího nástroje pro výrobu daného dílu.
5. Nakreslete sestavu nástroje spolu s kusovníkem a příčnými pohledy.

V teoretické části je zpracována literární rešerše zaměřená na problematiku, která je celkově rozdělena do čtyř rozsáhlých kapitol. Tyto kapitoly jsou postupně a více směřovány blíže k tématu, kterým se pak zabývá praktická část.

Praktická část obsahuje vytvoření 3D modelu zadaného plechového dílu. Dále návržení postupu tvářecích operací a provedení simulační analýzy výrobního procesu a její následná optimalizace pro co nejlepší dosažení výsledků a splnění všech zadaných požadavků. Na základě výsledků simulační analýzy je navržena koncepce prototypu tvářecího nástroje pro výrobu daného dílu. Nakonec je zpracována výkresová dokumentace sestavy nástroje včetně kusovníku a příslušných pohledů.

6 ZADÁNÍ A STANOVENÍ POŽADAVKŮ

Zadanou součástí je plechový díl, který je součástí pátých dveří automobilu (viz. obrázek 42), která bude zhotovena pomocí technologie hlubokého tažení, pomocí které se vyrobí požadovaná geometrie plechové součásti. Součást se následně z tažného nástroje vyjme a do finálního tvaru se ořeže pomocí laserového paprsku. Geometrie plechové součásti byla vytvořena v softwaru CATIA. Základní rozměry součásti jsou 1112 x 486 x 1 mm (šířka x výška x maximální předpokládaná tloušťka stěny).



Obrázek 42. Model zadané součásti pátých dveří

6.1 Software Autoform R8

AutoForm R8, vyvinutý švýcarskou společností AutoForm Engineering GmbH, představuje pokročilý softwarový nástroj pro simulaci a modelování procesů tváření plechových dílů. Tento program umožňuje s vysokou přesností navrhovat, analyzovat a optimalizovat výrobní procesy v oblasti hlubokého tažení. Díky intuitivnímu a přehlednému uživatelskému rozhraní je práce se softwarem velice efektivní. Celé uživatelské rozhraní je rozděleno do těchto sedmi hlavních karet:

- Parametry součásti (karta Part),
- plánování a nastavení procesních operací (karta Plan),
- definice tažného nástroje (karta Die Face),
- návržení polotovaru (karta Blank),
- procesní podmínky (karta Process),
- simulační výpočty (karta Simulation),
- vyhodnocení výsledků (karta Evaluation).

Jednotlivé funkce těchto karet a možnosti nastavení parametrů budou dále ilustrovány na konkrétních příkladech v dalších krocích praktické části.

6.1.1 Požadované parametry a výsledky simulací

Pomocí využití programu Autoform R8 se provede návrh simulace procesu plošného tváření pro výrobu zadané součásti s ohledem na zadané požadavky (viz. tabulka 4). Součást musí být zhotovena z takového materiálu, který je dostatečně vhodný pro technologii hlubokého tažení a v konečném výsledku si zachová potřebnou pevnost a tuhost. Zároveň by součást měla být navržena tak, aby celková hmotnost konstrukce byla co nejmenší a nejbližší ke splnění nároků na bezpečnost a emisní normy. Výsledky simulací součásti by neměly obsahovat žádné rizika a ani defekty jako je například již zmiňované ztenčení, vlnění, riziko výskytu trhlin a porušení soudržnosti materiálu, které by mohly ohrozit její funkčnost.

Tabulka 4. Přehled zadaných požadavků

Zvolený materiál	Vhodný pro hluboké tažení
Tvářecí lis	Vhodný tvářecí lis
Maximální přípustná tloušťka plechu [mm]	Maximálně 1 mm
Oblast porušení [%]	0,00 %
Oblast ztenčení [%]	Maximálně 0,30 %
Oblast riziková [%]	Maximálně 0,30 %
Oblast bezpečná [%]	Více jak 80 %
Maximální hodnota rizika porušení [-]	Maximální hodnota 1
Maximální hodnota ztenčení [-]	Maximální hodnota 0,3
Vhodná geometrie tažné hrany nástroje	Splněno/Nesplněno

7 PRVNÍ NÁVRH SIMULACE PROCESU

Prvotní návrh by měl být nastavený tak, aby splňoval všechny zadané požadavky maximálně. Návrh simulace je proveden v softwaru Autoform R8, kde dojde k nastavení procesních parametrů v jednotlivých kartách. V případě, že prvotní návrh simulace nebude vyhovující a jeho výsledky nebudou splňovat zadané požadované parametry, je nutné provést optimalizaci tohoto prvotního návrhu. Optimalizace tedy bude muset být provedena tak, aby již vyhověla všem zadaným požadavkům.

7.1 Nastavení parametrů součásti

Zde dochází k základní definici samotné součásti, která má být simulována v procesu hlubokého tváření. Tato karta je výchozím bodem simulace a obsahuje důležité nastavení, bez kterého nelze správně navázat na další kroky.

7.1.1 Vložení součásti (Import)

Geometrie zadané součásti se vložila do programu Autoform R8 a zvolila se vhodná referenční plocha (viz. obrázek 43).



Obrázek 43. Vložení dílu s vybráním referenční plochy

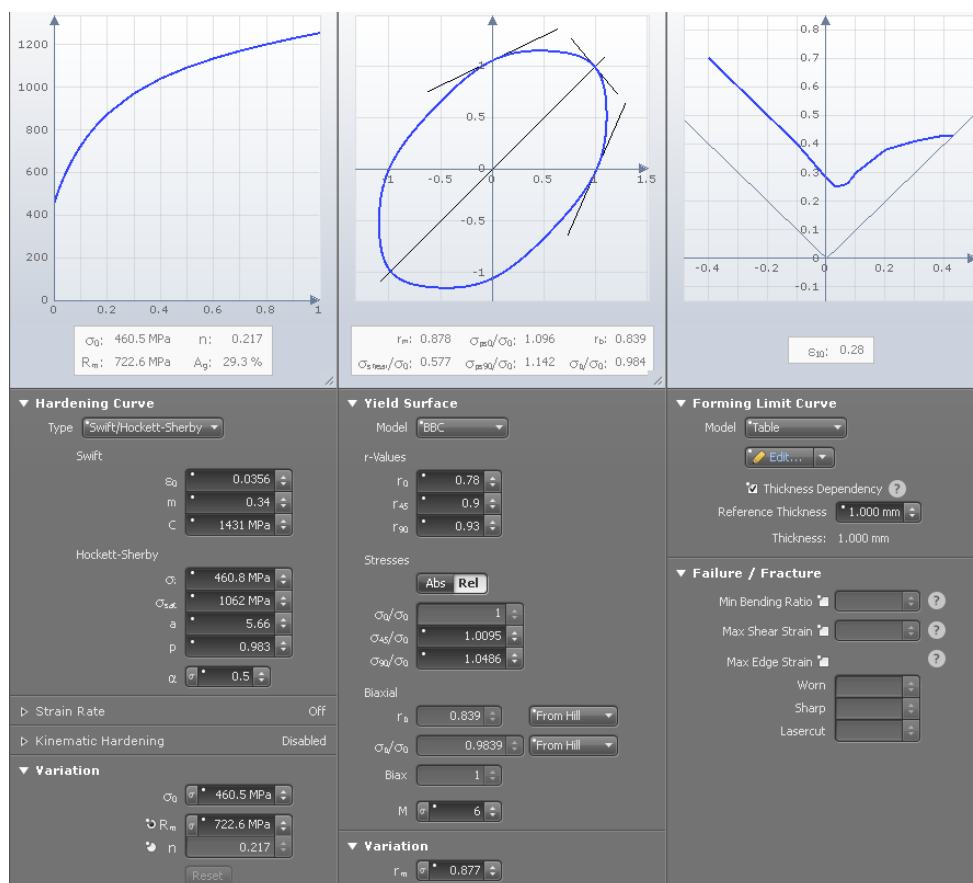
7.1.2 Optimální orientace výtažku (Tipping)

Tato funkce automaticky určuje ideální natočení výtažku (plechové součásti) vůči ose zavírání nástroje, aby bylo tažení co nejefektivnější a bez kolizí. Zjednodušeně najde optimální orientaci výtažku, která minimalizuje:

- Nerovnoměrné přetvoření materiálu
- Odpružení
- Nerovnoměrné rozložení tloušťky

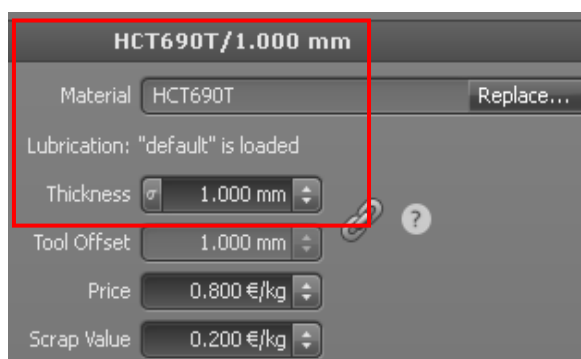
7.1.3 Zvolení vhodného materiálu (Material)

Součástí byl dále přiřazen materiál, kterým měla být podle zadání ocel vhodná pro technologii hlubokého tváření. Zvoleným materiálem je HCT690T, který patří mezi pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS – Advanced High-Strength Steels), konkrétně do skupiny TRIP ocelí. Základní informace o materiálu lze vidět znázorněné v databázi Autoformu R8 (viz. obrázek 44).



Obrázek 44. Parametry materiálu HCT690T z databáze Autoform R8

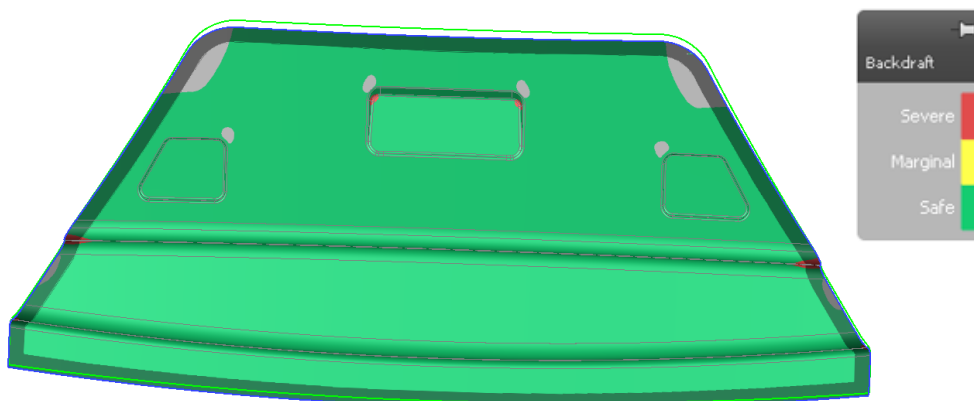
Tloušťka materiálu byla zvolena 1 mm (viz. obrázek 45), která splňuje maximální přípustnou tloušťku. Tato tloušťka byla zvolena s ohledem na maximální efektivitu a minimální dopad na výskyt deformací.



Obrázek 45. Zvolení materiálu HCT690T a volba jeho tloušťky

7.1.4 První kontrola tvarovatelnosti (Formcheck)

Po přiřazení materiálu následoval první Formcheck (viz. obrázek 46), který poskytne prvotní představu o podobě procesu hlubokého tažení a možná rizika v případě zadané součásti ještě před vytvořením tažného nástroje nebo nastavením komplexního procesu.



Obrázek 46. První Formcheck součásti

Červeně – kritická oblast, Žlutě – hraniční oblast, Zeleně – bezpečná oblast

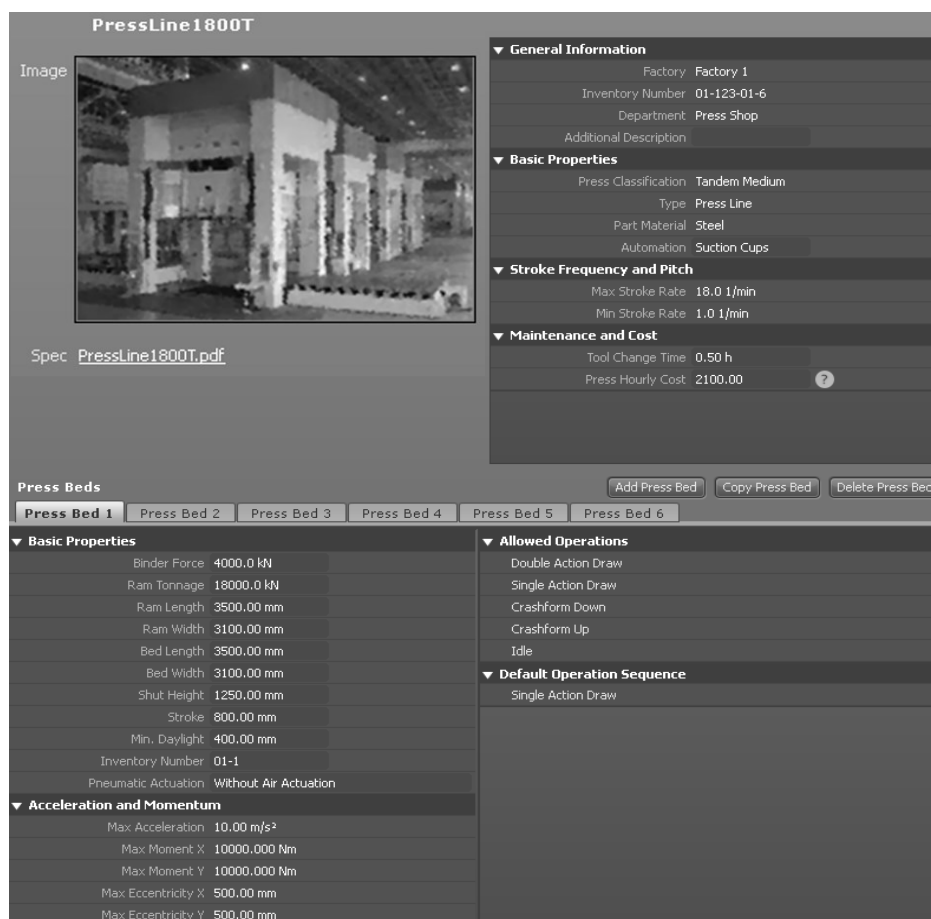
Kromě toho určil také přibližnou potřebnou tvářecí sílu. Přidržovací podmínky na straně součásti byly voleny jako **optimální (Set to optimal = 0750)**. Při hodnotě blízké minimu by hrozilo velké zvýšení tvářecí síly, způsobující porušení výtažku. Příliš vysoká hodnota pak vyvolá vznik nežádoucího zvlnění.



Obrázek 47. Nastavení Formchecku

7.2 Plánování procesních operací

V kartě (Plan) bylo následujícím krokem nastavení jednotlivých operací v celém tvářecím procesu. V prvním kroku byl vybrán vhodný tvářecí stroj (viz. obrázek 48).

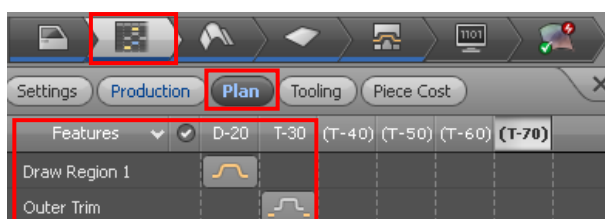


Obrázek 48. Parametry tvářecího lisu PressLine 1800T

7.2.1 Počet a pořadí operací (Plan)

Operace byly rozplánovány do následujících kroků (viz. obrázek 49):

- D20 – Hluboké tažení (Draw Region 1)
- T30 – Ořez vnějšího obvodu (Outer Trim). Tato operace nebude provedena střížným nástrojem, ale laserovým paprskem. Nicméně je nutno mít tuto operaci v plánování kvůli lepšímu vykreslení výsledků a dosažení finálního tvaru.



Obrázek 49. Souhrnný plán operací tváření

- (T-40), (T-50), (T-60), (T-70) - Po sestavení plánu operací zůstaly zbylé možnosti operací stroje nevyužité. V tom případě bylo nutné je přeskočit, jinak by výpočet nemohl proběhnout.

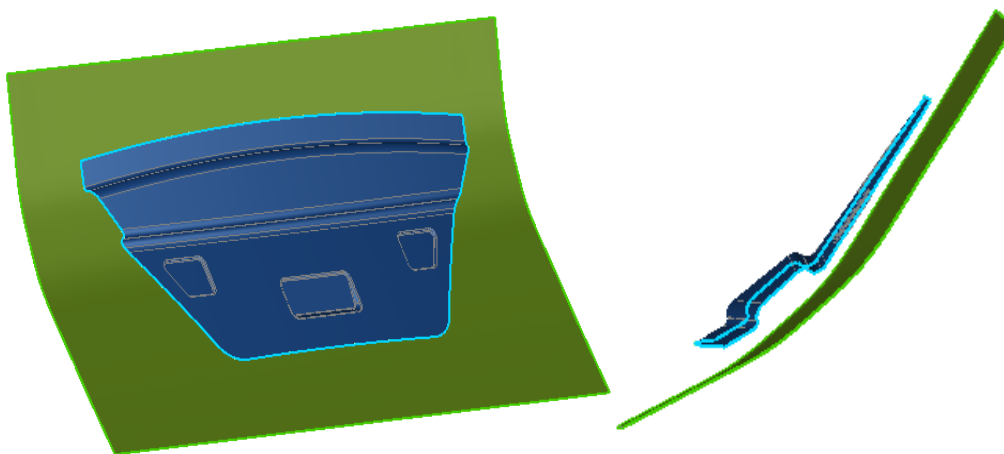
7.3 Definice tažného nástroje

Tato část umožňuje navrhnout a upravit tvar aktivních částí celého tažného nástroje (tažník, tažnice a přidržovače) tak, aby byly vyhovující pro vytažení správné a požadované geometrie. Navrhnuté tvary aktivních částí lze později využít pro následnou konstrukci celého tažného nástroje.

7.3.1 Navržení přidržovače (Automatic Binder)

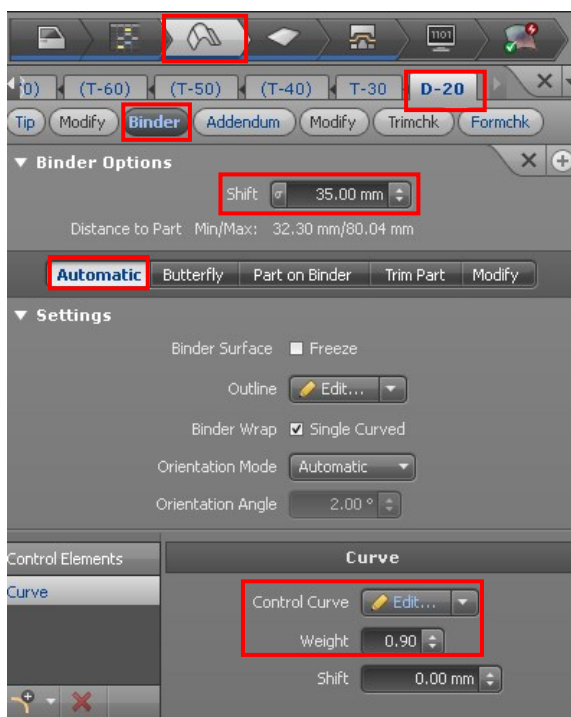
Přidržovač zajišťuje kontrolovaný tok materiálu do dutiny výlisku. Zásadně také ovlivňuje rovnoměrnost deformace, tloušťkové změny a minimalizaci závad, jako jsou:

- Zvlnění – při příliš nízkém tlaku
- Trhliny – při příliš vysokém tlaku



Obrázek 50. Vytvoření přidržovače (zelená geometrie)

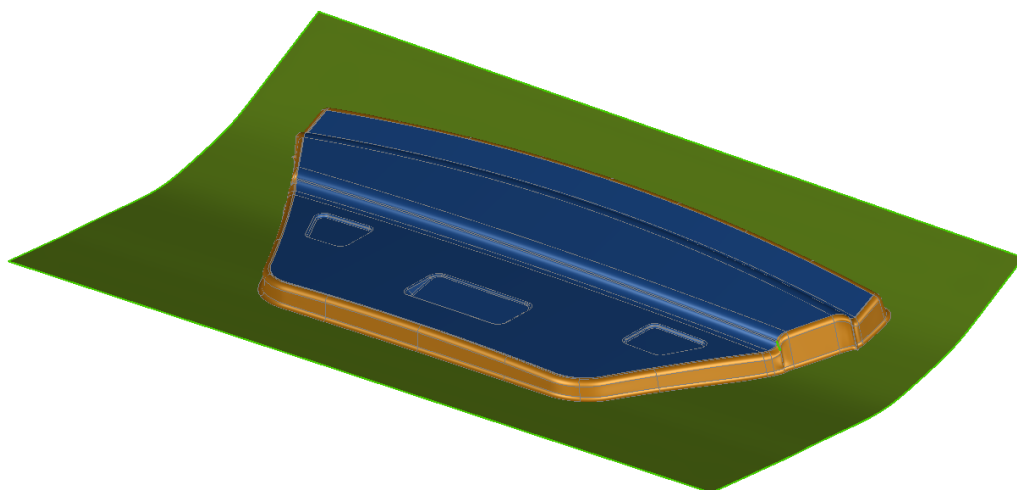
Kontrolní křivkou byla určena hraniční křivka součásti (viz. obrázek 50). S ohledem na tvar součásti bylo nastaveno odsazení přidržovače (Shift) na hodnotu 35 mm. Větší odsazení by mohlo mít dopad na vyšší přetvoření při tažení. Váha kontrolní křivky byla nastavena na hodnotu 0,90. Tento parametr určuje, že přidržovač bude z 90 % kopírovat hraniční křivku součásti (viz. obrázek 50, 51). Tento parametr má také významný vliv na výsledné přetvoření, jelikož s jeho vyšší hodnotou se přetvoření zmenšuje.



Obrázek 51. Nastavení parametrů přidržovače

7.3.2 Navržení tažné hrany nástroje (Addendum)

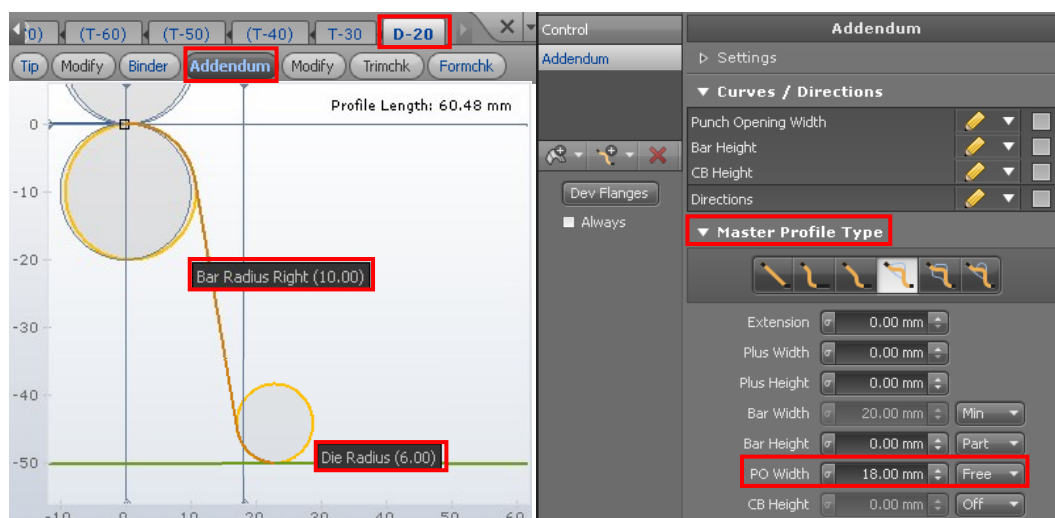
Geometrie profilu tažné hrany tažného nástroje byla vytvořena automaticky (viz. obrázek 52). Nastavení dle hraniční křivky součásti s jemnými přechody. Upravením rádiusů hran tažníku, respektive tažnice, pak lze vhodně korigovat přetvářecí síly a regulovat tak tvárnost součásti. Čím větší jsou rádiusy, tím jednodušší je tažení i riziko porušení stability a výskytu defektů zvlnění, ale zvětšuje se hloubka tažnice, což má za důsledek delší tažnou dráhu. Zvětšením tažné mezery či úhlu tažné hrany nástroje je pak sníženo riziko výskytu kritické deformace.



Obrázek 52. Profil tažné hrany nástroje (oranžová geometrie)

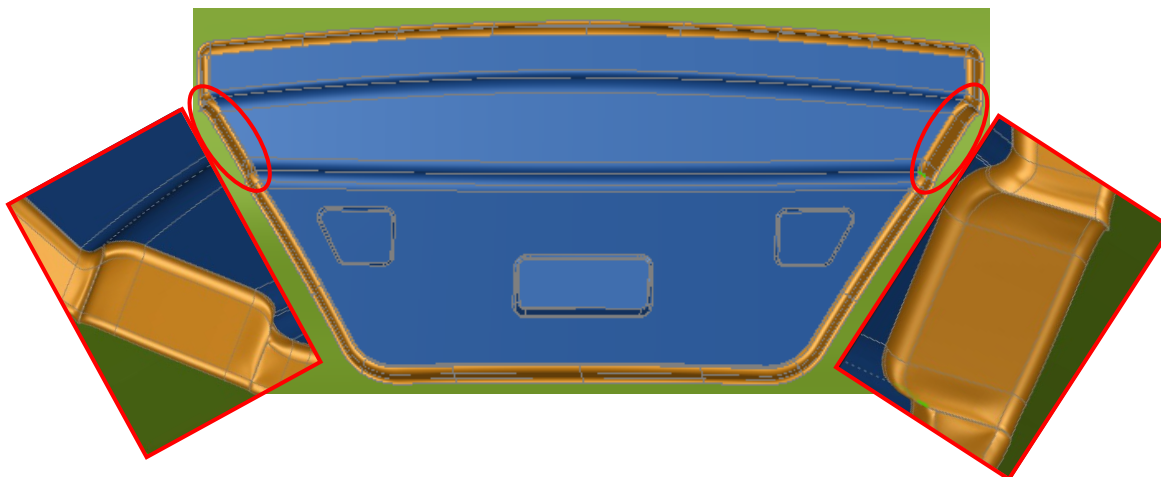
Parametry v záložkách Master Profile Typ byly definovány následovně (viz. obrázek 53).

- PO Width (tažná mezera): 18 mm
- Bar Radius Righ (poloměr zaoblení tažnice): 10 mm,
- Part Radius (poloměr zaoblení součásti): 10 mm
- Die Radius (poloměr zaoblení tažníku): 6 mm
- Wall Angle (úhel tažné hrany): 10 °



Obrázek 53. Nastavení parametrů profilu tažné hrany

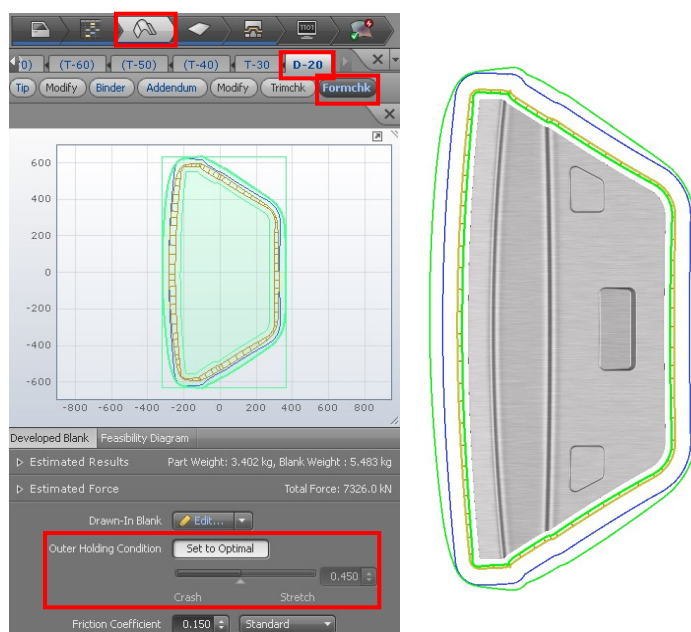
Nakonec bylo nutné provést finální podrobnou kontrolu kvality tažné hrany, abychom zjistili, jestliže nedošlo k nějakým deformacím a nesprávně vygenerovanému profilu. Při této kontrole bylo zjištěno, že automaticky vygenerovaný profil není vzhledem k součásti vhodný a v některých částech nebyl dostatečně definovaný, takže došlo k jeho poškození. Zároveň by tento profil tažné hrany nevyhovoval pro následnou konstrukci a byl by těžce vyrobitelný.



Obrázek 54. Nesprávně vytvořený profil tažné hrany nástroje

7.3.3 Druhá kontrola tvarovatelnosti (Formcheck)

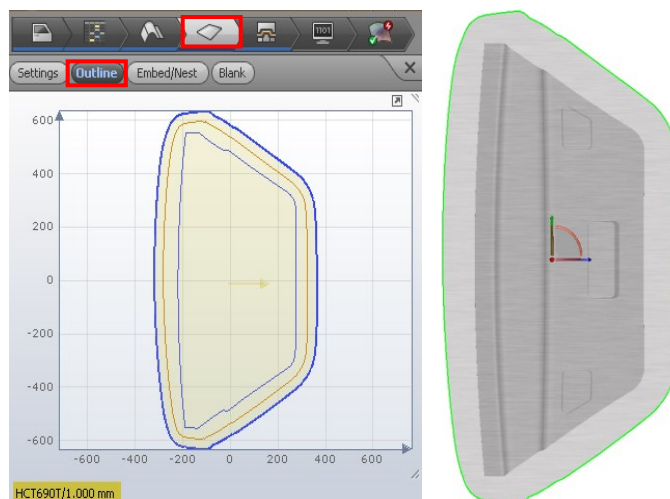
Po nastavení přidržovače a tažné hrany nástroje byl proveden druhý Formcheck (viz. obrázek 55), který poskytnul lepší představu o procesu tažení i výsledné struktuře materiálu po provedení procesu. Přidržovací podmínky byly nastaveny na optimum, které poskytují ideální rovnováhu mezi porušením a protažením plechu. Při hodnotě, jež by byla velmi blízko minimu, by hrozilo poměrně velké zvýšení tvářecí síly, která by mohla způsobit kritické deformace.



Obrázek 55. Nastavení druhého Formchecku

7.4 Navržení polotovaru

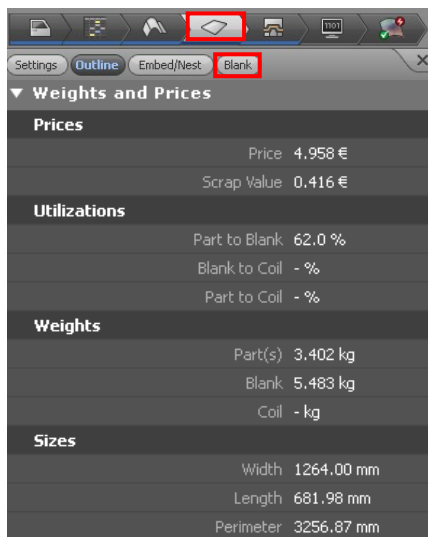
Karta navržení polotovaru (Blank) se využívá pro specifikaci polotovaru, jeho tvaru, rozměrů a jeho orientaci. Pro tvorbu polotovaru byla vybrána křivka blank outline, která definovala vnější rozměry polotovaru (viz. obrázek 56).



Obrázek 56. Geometrie přístřihu polotovaru součásti (modrá a zelená barva)

7.4.1 Základní informace o polotovaru (Blank)

V této záložce nebylo potřeba nic nastavovat. Zde jsou uvedeny informace o polotovaru jako je jeho cena, využitelnost, hmotnost a velikost (viz. obrázek 57).



Weights and Prices	
Prices	
Price	4,958 €
Scrap Value	0,416 €
Utilizations	
Part to Blank	62,0 %
Blank to Coil	- %
Part to Coil	- %
Weights	
Part(s)	3,402 kg
Blank	5,483 kg
Coil	- kg
Sizes	
Width	1264,00 mm
Length	681,98 mm
Perimeter	3256,87 mm

Obrázek 57. Přehled informací o polotovaru součásti

Price – Cena, Utilization – Využití, Weight – Hmotnost, Size – Velikost (Rozměry)

7.5 Simulace

Simulace zajišťuje samotné výpočty metodou konečných prvků. Po nastavení všech parametrů byl spuštěn výpočet kliknutím na tlačítko Start. Jakmile doběhne výpočet je možné zobrazit výsledky simulace návrh.

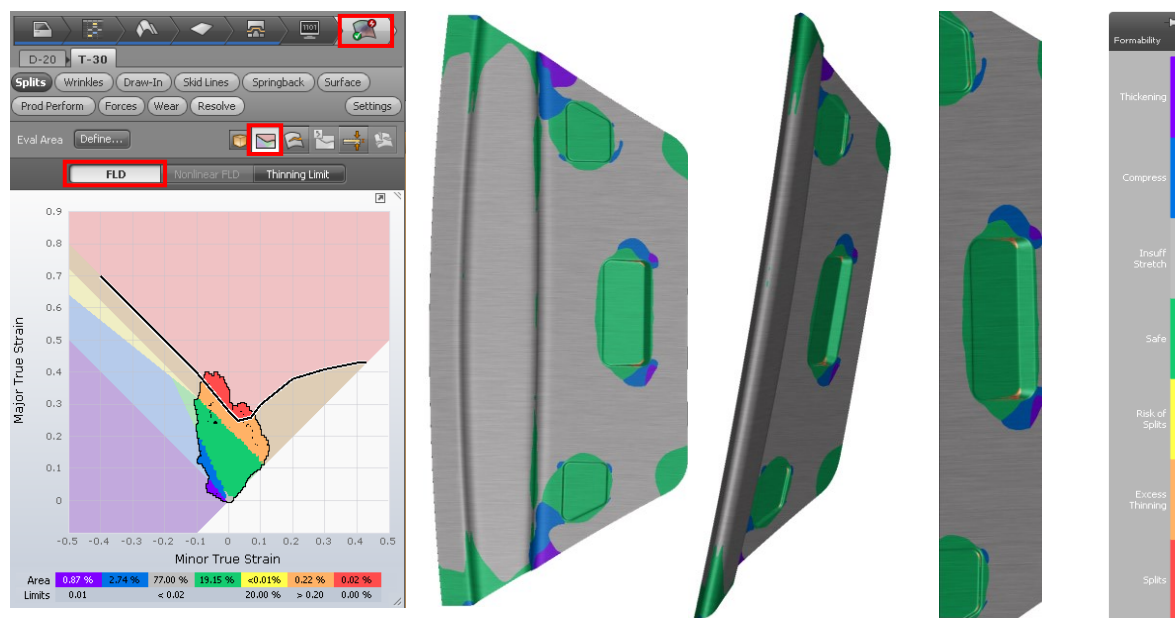
7.6 Výsledky

Poslední karta nabízí možnost vyhodnocení výsledků simulace jako jsou deformace, ztenčení materiálu, vznik trhlin a tvářitelnost.

7.6.1 Výsledek tvářitelnosti (Formability)

Prvním výsledkem je tvářitelnost. Jedná se o hodnoty hlavních přetvoření zanesených do FLD diagramu. S ohledem na jejich rozmístění lze rozeznat místa pěchovaná (fialová) a stlačovaná (modrá), souhrnně označována jako oblast zvlnění. Dále pak místa s nedostatečným protažením (šedá), s rizikem trhlin (žlutá), nadměrným ztenčením (oranžová), bezpečné oblasti tváření (zelená) nebo kritického porušení (červená). Obecně je snahou docílit co největšího přetvoření. Nesmí však docházet k negativním jevům jako je vznik trhlin, nadměrné ztenčení, stlačení nebo pěchování. Výsledek a vyhodnocení tvářitelnosti lze vidět na obrázku (viz. obrázek 58).

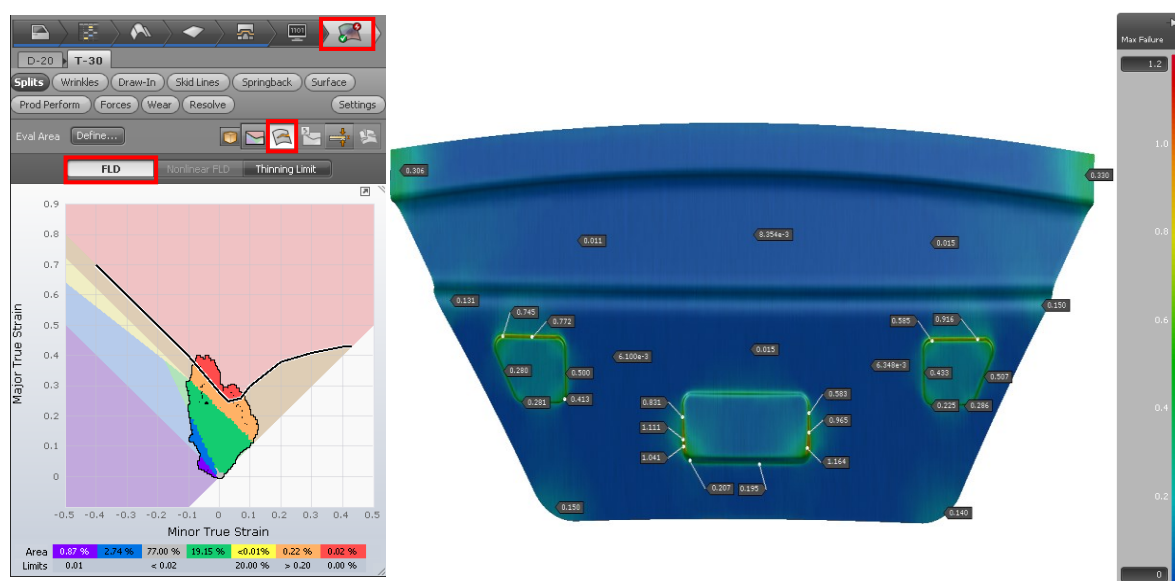
Z obrázku vyplývá, že dochází k téměř všem nežádoucím jevům. Výtažek se objevil ve všech možných oblastech tváření což znamená, že dochází prakticky k neperfektnímu přetvoření a všem nežádoucím jevům. Hodnota bezpečné oblasti je dle FLD diagramu pouze na 19,15 %.



Obrázek 58. Vyhodnocení tvářitelnosti (Formability) součásti

7.6.2 Výsledek maximálního porušení (Max Failure)

Druhým výsledkem je maximální porušení. Tento výsledek, který popisuje nejnáchylnější místa na přetržení materiálu. Zde je hraniční hodnota 1. Výsledek a je jeho vyhodnocení lze vidět na obrázku (viz. obrázek 59).

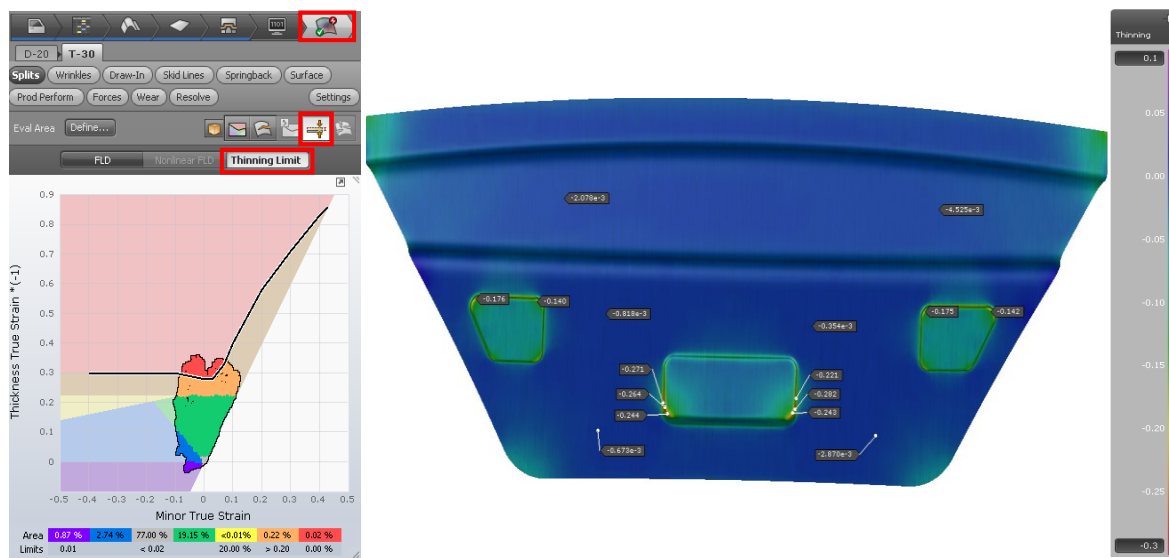


Obrázek 59. Vyhodnocení poškození (Max Failure) součásti

Z obrázku je patrné, že na mnoha místech dochází k porušení. Obvykle dochází k největšímu riziku v místech největšího ohybu, což platí v tomto případě a hraniční hodnota 1 byla překročena. V nejvíce kritickém místě byla zjištěna hodnota 1,164 a ta nesplňuje stanovené požadavky.

7.6.3 Výsledek ztenčení (Thinning)

Třetím výsledkem je ztenčení, který popisuje procentuální ztenčení plechu výtažku. Pokud jsou hodnoty záporné, pak dochází ke ztenčení. V opačném případě naopak dochází k pěchování. Hraniční hodnotou je 0,3. Vyhodnocení výsledku lze vidět na obrázku (viz. obrázek 60).



Obrázek 60. Vyhodnocení ztenčení (Thinning) součásti

Z obrázku je viditelné, že v některých oblastech dochází k významnému ztenčení. Obvykle dochází k největšímu ztenčení kvůli dlouhému profilu tažné hrany nástroje, a to zpravidla v místech malých poloměrů zaoblení. Hraniční hodnota 0,3 nebyla v tomto případě překročena, ale v nejvíce kritickém místě byla zjištěna hodnota -0,282, což je téměř na hranici.

7.7 Souhrn výsledků a porovnání s požadovanými

- Požadované výsledky a parametry

Tabulka 5. Přehled zadaných požadavků

Zvolený materiál	Vhodný pro hluboké tažení
Tvářecí lis	Vhodný tvářecí lis
Maximální přípustná tloušťka plechu [mm]	Maximálně 1 mm
Oblast porušení [%]	0,00 %
Oblast ztenčení [%]	Maximálně 0,30 %
Oblast riziková [%]	Maximálně 0,30 %
Oblast bezpečná [%]	Více jak 80 %
Maximální hodnota rizika porušení [-]	Maximální hodnota 1
Maximální hodnota ztenčení [-]	Maximální hodnota 0,3
Vhodná geometrie tažné hrany nástroje	Splněno/Nesplněno

- Dosažené výsledky a parametry

Tabulka 6. Přehled dosažených výsledků prvního návrh

Zvolený materiál	Pokročilá vysokopevnostní ocel HCT609T
Tvářecí lis	Lis PressLine 1800T
Zvolená tloušťka plechu [mm]	1 mm
Oblast porušení [%]	0,02 %
Oblast ztenčení [%]	0,22 %
Oblast riziková [%]	0,01 %
Oblast bezpečná [%]	19,15 %
Maximální hodnota rizika porušení [-]	1,164
Maximální hodnota ztenčení [-]	-0,282
Vhodná geometrie tažné hrany nástroje	Nesplněno

Výsledky dosažené simulace jsou nevyhovující a nebyly splněny 4 z 10 požadavků, mezi které patří oblast porušení (0,02 %), bezpečná oblast (19,15 %), maximální hodnota rizika porušení (1,164) nebo vhodná geometrie tažné hrany nástroje (nesplněno). Kvůli těmto záporným výsledkům a nesplnění zadaných požadavků je zapotřebí provést optimalizaci prvního návrhu simulace.

8 OPTIMALIZACE NÁVRHU SIMULACE PROCESU

V důsledku nesplnění některých zadaných parametrů u původního procesu je potřeba návrh simulace procesu optimalizovat a změnit zadané hodnoty tak, aby požadované parametry byly splněny. Byly změněny jenom ty hodnoty, které dokážou simulaci procesu vylepšit. Zbylé zadané hodnoty byly ponechány stejně, jako u původního procesu.

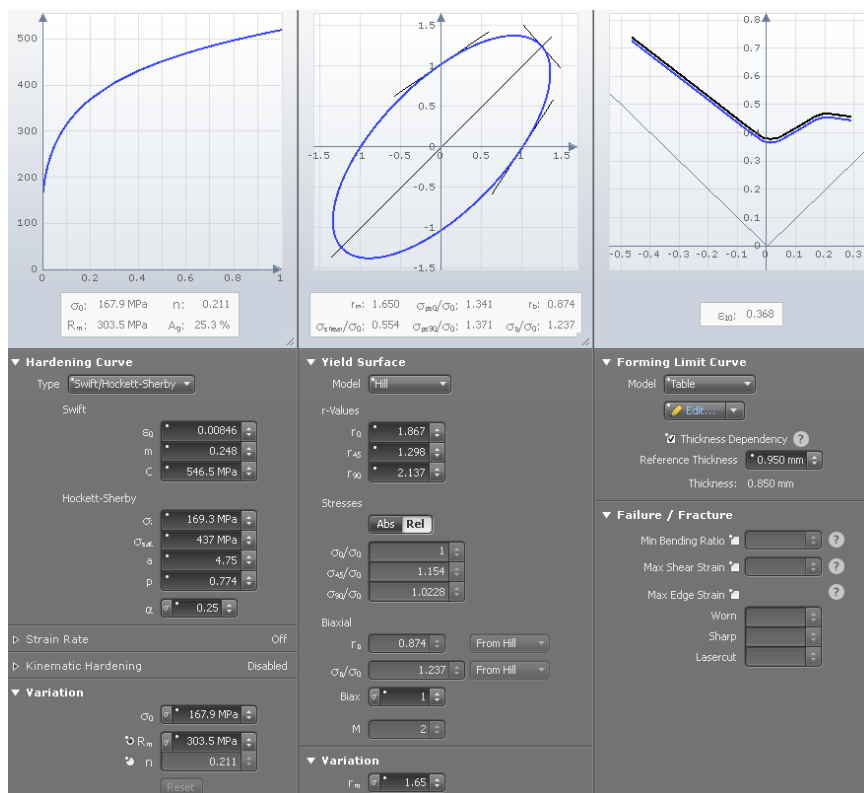
8.1 Optimalizace parametrů součásti

Vložená geometrie součásti (Import) a zvolení vhodné referenční plochy (viz. obrázek 43) byly ponechány ve stejném nastavení.

Nastavená optimální orientace výtažku (Tipping), která určuje ideální natočení výtažku (plechové součásti) vůči ose zavírání nástroje, aby bylo tažení co nejefektivnější a bez kolizí, zůstává také stejné.

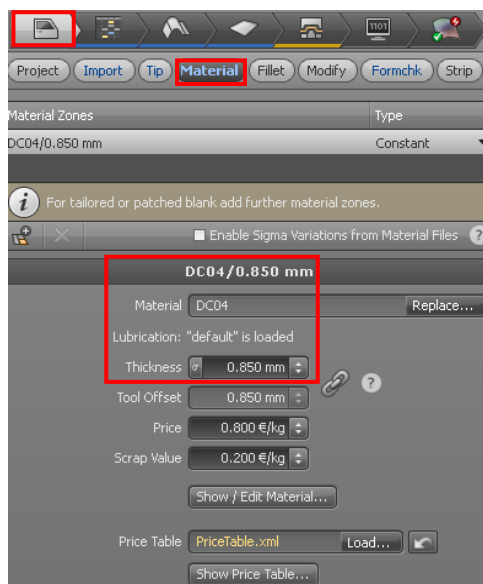
8.1.1 Zvolení materiálu (Material) pro optimalizovaný proces

V optimalizovaném procesu je zapotřebí zvolit jiný materiál, který je ještě o něco vhodnější pro hluboké tažení, než je pokročilá vysokopevnostní ocel HCT690T. Novým zvoleným materiálem je materiál vhodný pro studené tváření - tím je hlubokotažná ocel DC04, která je pro účely hlubokého tažení přívětivější.



Obrázek 61. Parametry materiálu DC04 z databáze Autoform R8

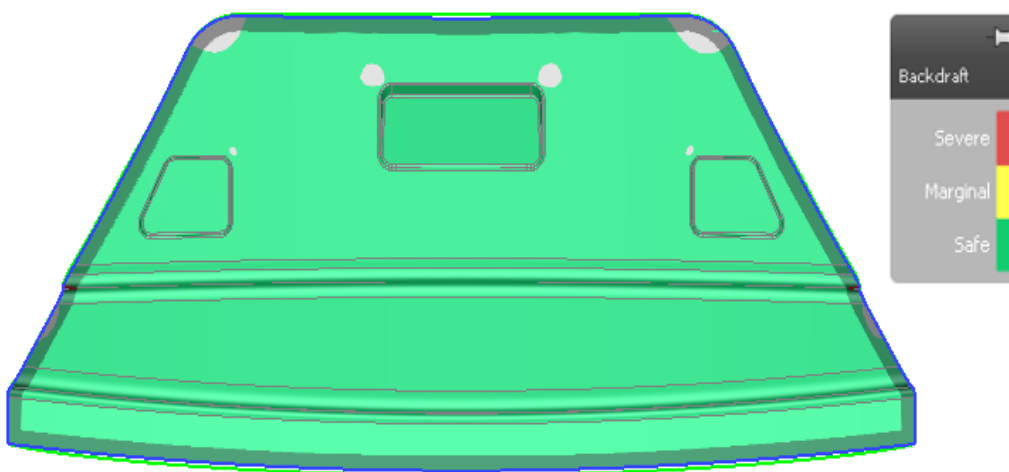
Základní informace o materiálu lze vidět znázorněné v databázi Autoformu R8 (viz. obrázek 61). Tloušťka nově zvoleného materiálu DC04 byla zvolena 0,85 mm (viz. obrázek 62), která splňuje maximální přípustnou tloušťku. Tato tloušťka byla zvolena pro lepší tvarovatelnost a odlehčení hmotnosti součásti.



Obrázek 62. Zvolení materiálu DC04 a volba jeho tloušťky

8.1.2 Optimalizovaná kontrola tvarovatelnosti (Formcheck)

Kvůli nově přiřazenému materiálu následoval opět první Formcheck (viz. obrázek 63), který poskytne prvotní představu o podobě procesu hlubokého tažení a může odhalit možná rizika.



Obrázek 63. První Formcheck součásti optimalizovaného procesu

Červeně – kritická oblast, Žlutě – hraniční oblast, Zeleně – bezpečná oblast

Také se opět určila a vygenerovala přibližná potřebná tvářecí síla. Přidržovací podmínky na straně součásti byly opět voleny jako **optimální (Set to optimal = 0850)**.



Obrázek 64. Nastavení Formchecku optimalizace

8.2 Plánování procesních operací optimalizace

Pro optimalizovaný proces byl zvolený stejný tvářecí stroj PressLine 1800T jako u prvního návrhu simulace (viz. obrázek 48).

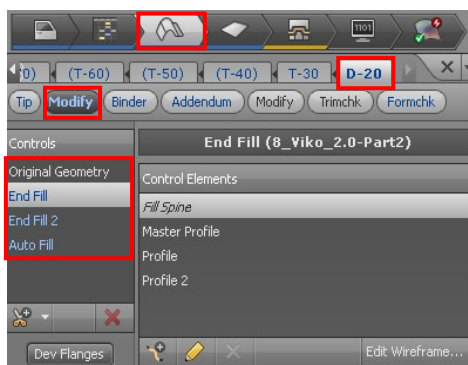
Nastavení počtu a pořadí operací (Plan) bylo taktéž ponecháno z původního návrhu. Nástroj D20 pro hluboké tažení a poté operace T30 pro ořez vnějšího obvodu, který ale nebude, jak již bylo zmíněno proveden střížným nástrojem, ale laserovým paprskem. Operace T30 musí být součástí simulace pro lepší a přehlednější dosažení výsledků.

8.3 Definice tažného nástroje optimalizace

Kvůli špatně navrhnuté geometrii tažné hrany v předchozím návrhu je nutné tuto oblast nastavení simulace optimalizovat. Geometrii tažné hrany v programu Autoform R8 je tedy nutno upravit a pozměnit z důvodu lepšího následujícího procesu a další práci. Optimalizace tažné hrany byla nastavena tak, aby navržená geometrie byla co nejlepší, protože navrhnuté tvary aktivních částí v programu Autoform R8 lze později využít pro následnou konstrukci celého tažného nástroje. Lepší geometrie bude také méně náročná na samotnou výrobu.

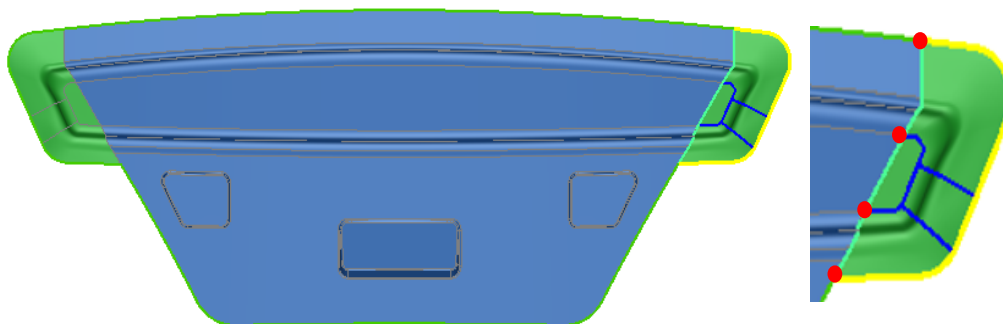
8.3.1 Změna geometrie (Modify)

V této kartě je možnost opravit nebo pozměnit geometrii součásti. Dovoluje možnost vyplnění děr a doplnění geometrie koncového profilu tak, aby bylo možné generovat co nejvěrnější tažnou hranu nástroje a výpočet byl lépe proveditelný a přesný. Geometrie byla upravená pomocí příkazu End Fill a Auto Fill (viz. obrázek 65).



Obrázek 65. Nastavení změny geometrie tažné hrany End Fill + Auto Fill

Využitím příkazu 2x End Fill se vyplní chybějící geometrie. Výběrem čtyř vhodných bodů (červená barva) ležících na křivce součásti byla vhodně doplněna geometrie její levé a pravé části (viz. obrázek 66).



Obrázek 66. Doplnění geometrie koncového profilu End Fill

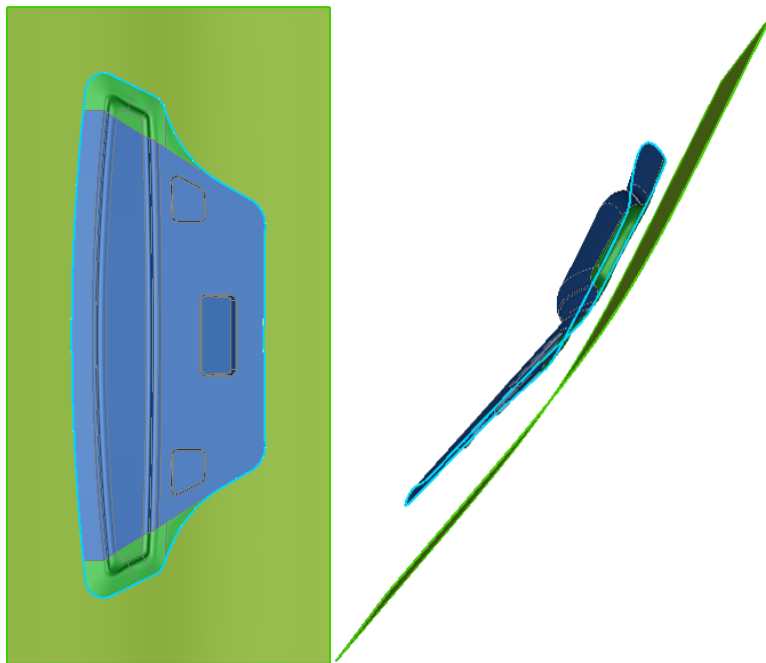
Využitím příkazu Auto Fill se doplní zbylá chybějící geometrie. Automaticky naváže z geometrie součásti na nově vytvořenou geometrii z předchozího kroku End Fill (viz. obrázek 67). Doplnění opět proběhlo na obou stranách – levé i pravé.



Obrázek 67. Doplnění geometrie koncového profilu Auto Fill

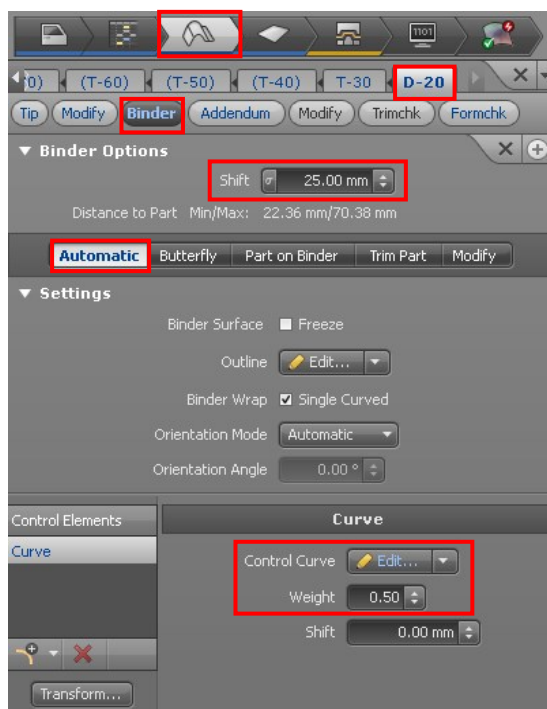
8.3.2 Optimalizace navržení přídržovače (Automatic Binder)

Kvůli úpravě geometrie tažné hrany je nutné znovu nastavit a vypočítat tvar přídržovače (viz. obrázek 68), který funguje zároveň s tažníkem.



Obrázek 68 Optimalizace přídržovače (zelená geometrie)

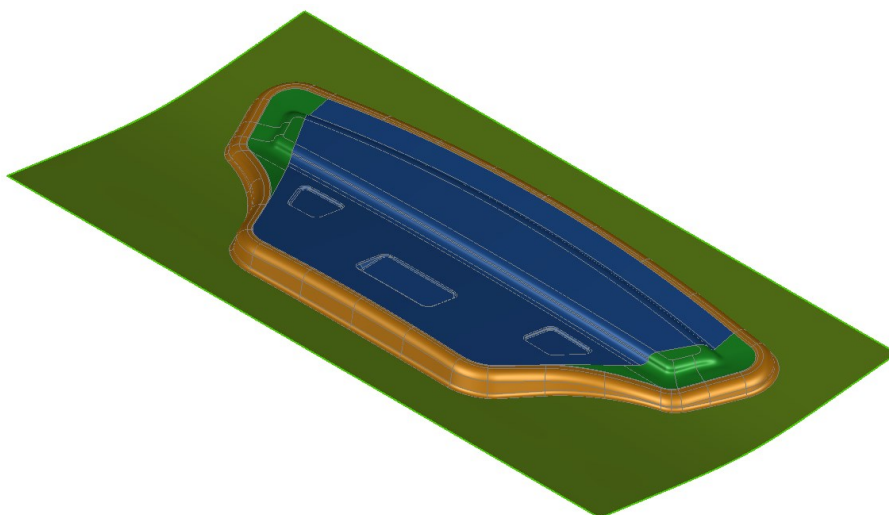
Opět bylo změněno odsazení přídržovače (Shift) na hodnotu 25 mm s ohledem na tvar součásti. Váha kontrolní křivky byla nastavena na hodnotu 0,50. Tento parametr určuje, že přídržovač bude z 50 % kopírovat hraniční křivku součásti (viz. obrázek 68, 69).



Obrázek 69. Optimalizované parametry přídržovače

8.3.3 Nastavení optimalizované tažné hrany nástroje (Addendum)

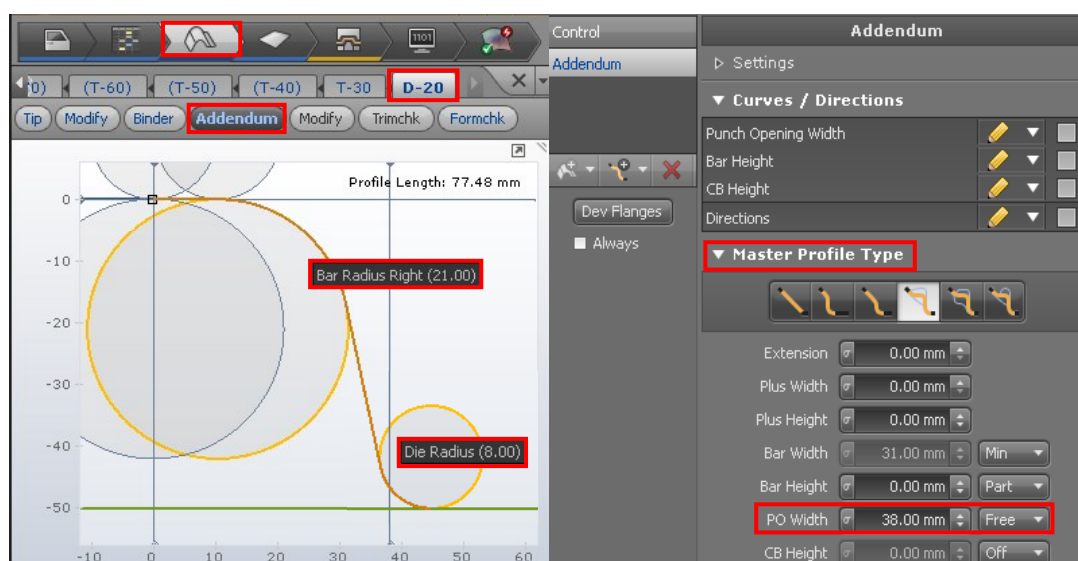
Profil tažné hrany je viditelně pozměněn kvůli změně a přidání geometrii (viz. obrázek 70). Tažná hrana nástroje je tentokrát bez jakéhokoli poškození a nepřesně vydefinovaných geometrií.



Obrázek 70. Optimalizovaná tažná hrana nástroje (oranžová geometrie)

Parametry v záložkách Master Profile Typ byly definovány následovně (viz. obrázek 71).

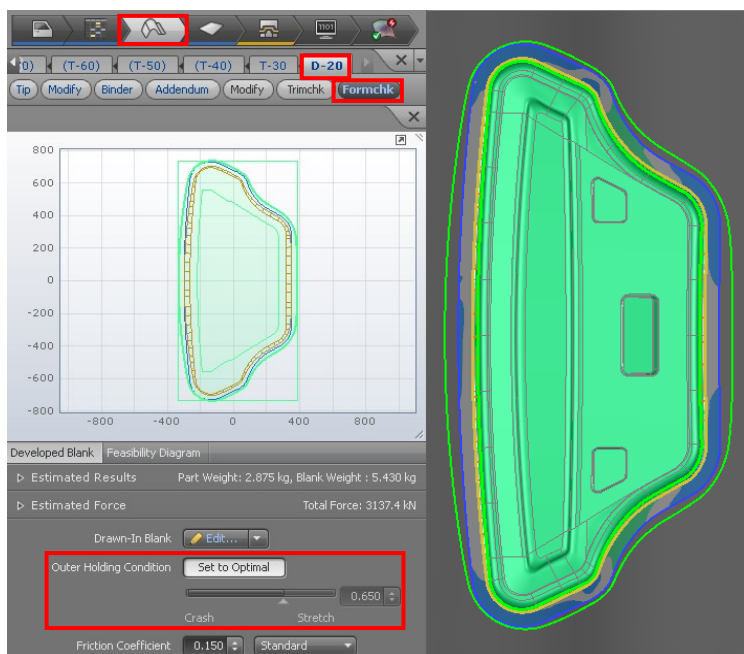
- PO Width (tažná mezera): 38 mm
- Bar Radius Right (poloměr zaoblení tažnice): 21 mm,
- Part Radius (poloměr zaoblení součásti): 10 mm
- Die Radius (poloměr zaoblení tažníku): 8 mm
- Wall Angle (úhel tažné hrany): 12 °



Obrázek 71. Nastavení nových parametrů profilu tažné hrany

8.3.4 Druhá kontrola optimalizovaného návrhu (Formcheck)

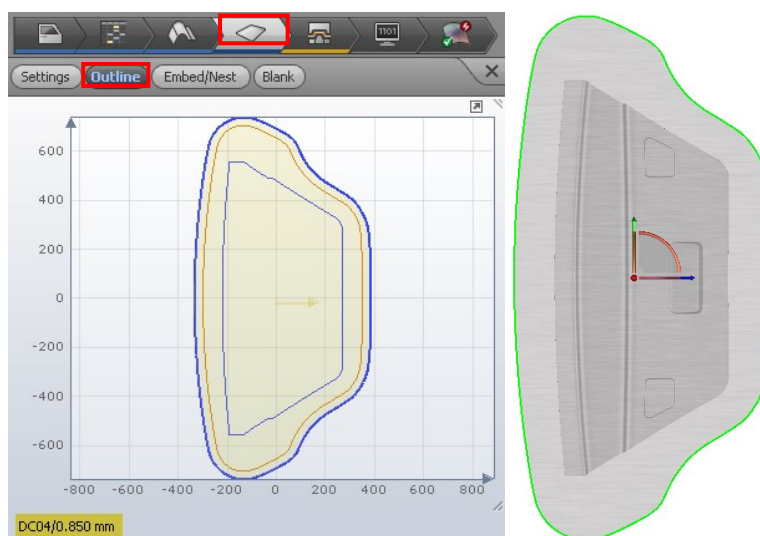
Stejně jako v předchozí simulaci po nastavení přidržovače a tažné hrany nástroje byl proveden druhý Formcheck (viz. obrázek 72). Přidržovací podmínky byly nastaveny opět na optimum, které poskytují ideální rovnováhu mezi porušením a protažením plechu.



Obrázek 72. Nastavení druhého Formchecku po optimalizaci

8.4 Navržení nového polotovaru

Polotovar musí být znovu nastaven a vypočítán. Polotovar se poměrně zvětšil vlivem přidané geometrie. Pro tvorbu polotovaru byla opět vybrána jako výstupní křivka blank outline, která definovala vnější rozměry polotovaru (viz. obrázek 73).



Obrázek 73. Nová geometrie přístřihu polotovaru součásti (modrá a zelená barva)

8.4.1 Základní informace o novém polotovaru (Blank)

Jsou zde uvedeny informace o novém polotovaru jako je jeho cena, využitelnost, hmotnost a velikost (viz. obrázek 74). Využitelnost materiálu o něco klesla, ale to je ve prospěch lepších tažných podmínek. Podařilo se snížit cenu a hmotnost součásti.



Weights and Prices	
Prices	
Price	4.002 €
Scrap Value	0.515 €
Utilizations	
Part to Blank	52.8 %
Blank to Coil	- %
Part to Coil	- %
Weights	
Part(s)	2.875 kg
Blank	5.448 kg
Coil	- kg
Sizes	
Width	1469.31 mm
Length	715.62 mm
Perimeter	3627.30 mm

Obrázek 74. Přehled informací o polotovaru součásti

Price – Cena, Utilization – Využití, Weight – Hmotnost, Size – Velikost (Rozměry)

8.5 Nastavení procesních podmínek

Součástí optimalizace je také nastavení a využití brzdných drážek, které mají velký přínos pro rozšíření bezpečné oblasti (zelená). Ty lze definovat v záložce Beads. Nejprve je však potřeba určit operaci, na kterou se brzdné drážky aplikují. V tomto případě to je D-20.

8.5.1 Nastavení brzdných drážek (Beads)

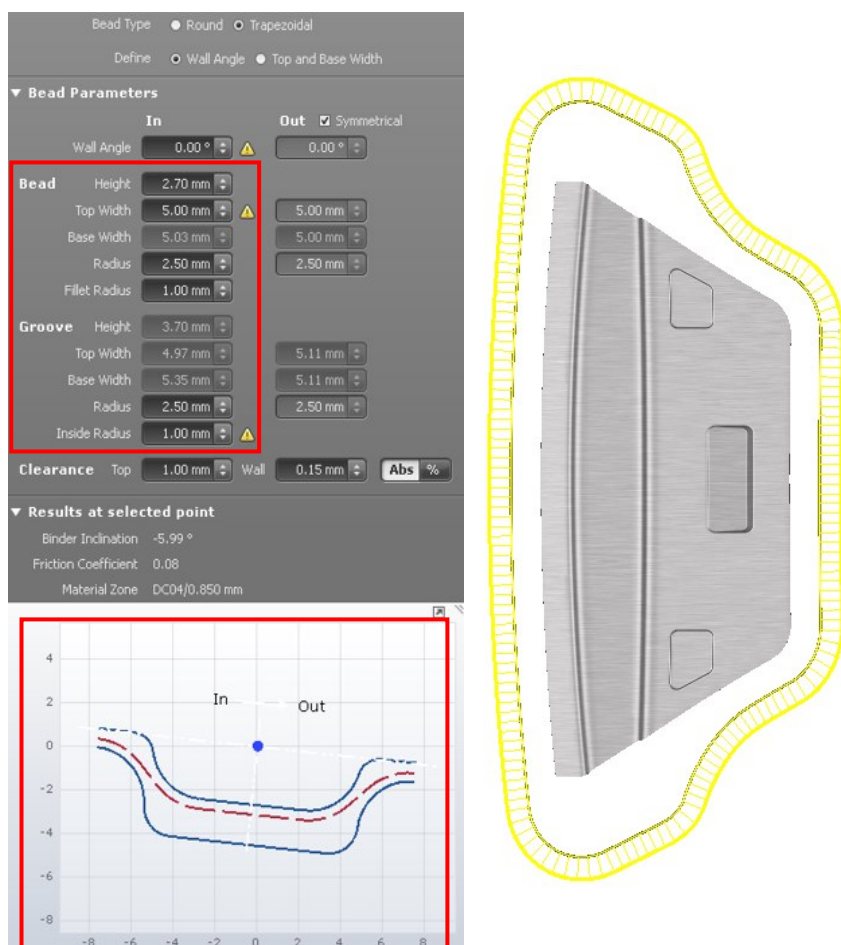
Nejdříve je potřeba definovat vstupní křivku, na které budou umístěny brzdné drážky (Drawbead Curve). Ta byla nastavena jako Die Entry Curve (viz. obrázek 75).



Obrázek 75. Vytvoření brzdné drážky a její trajektorie

Trajektorie drážek byla nastavena do jednoho okruhu po celém obvodu (žlutá barva) s odsazením 15 mm od konce geometrie tažné hrany nástroje (viz. obrázek 75).

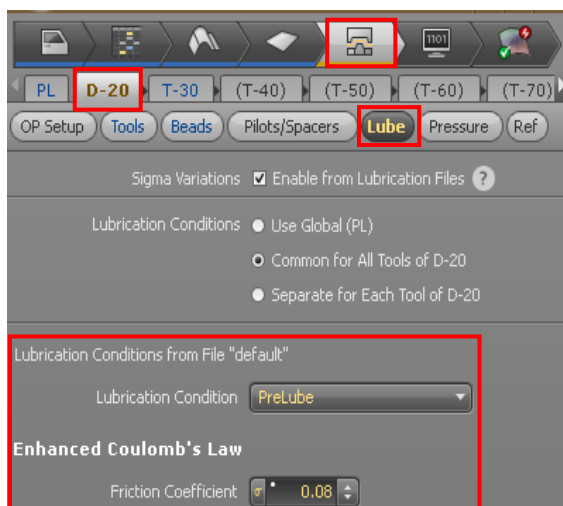
Brzdné drážky byly definovány obdélníkovým průřezem (viz. obrázek 76), protože pro tento obdélníkový typ geometrie se jevil profil nejvhodnějším pro dosažení vyššího přetvoření. Výška drážky byla nastavena na 2,7 mm o šířce 5 mm. Vnější a vnitřní rádius byl nastaven na hodnoty 2,5 a 1 mm. Dráhu a tok plechu, který prochází přes brzdné drážky lze vidět na obrázku (viz obrázek 76).



Obrázek 76. Nastavení průřezu a parametrů brzdné drážky

8.5.2 Nastavení maziva (Lube)

Pro větší přetvoření je vhodné operaci D-20 provádět s použitím maziva, které zvýší třecí koeficient (pokud by však docházelo k trhání a deformacím, pak je naopak nutné použít mazivo s menším třecím koeficientem). V tomto případě je ale ideální volbou lubrikant (PreLube) s třecím koeficientem 0,08 (viz. obrázek 77).



Obrázek 77. Nastavení maziva

8.6 Optimalizovaná simulace

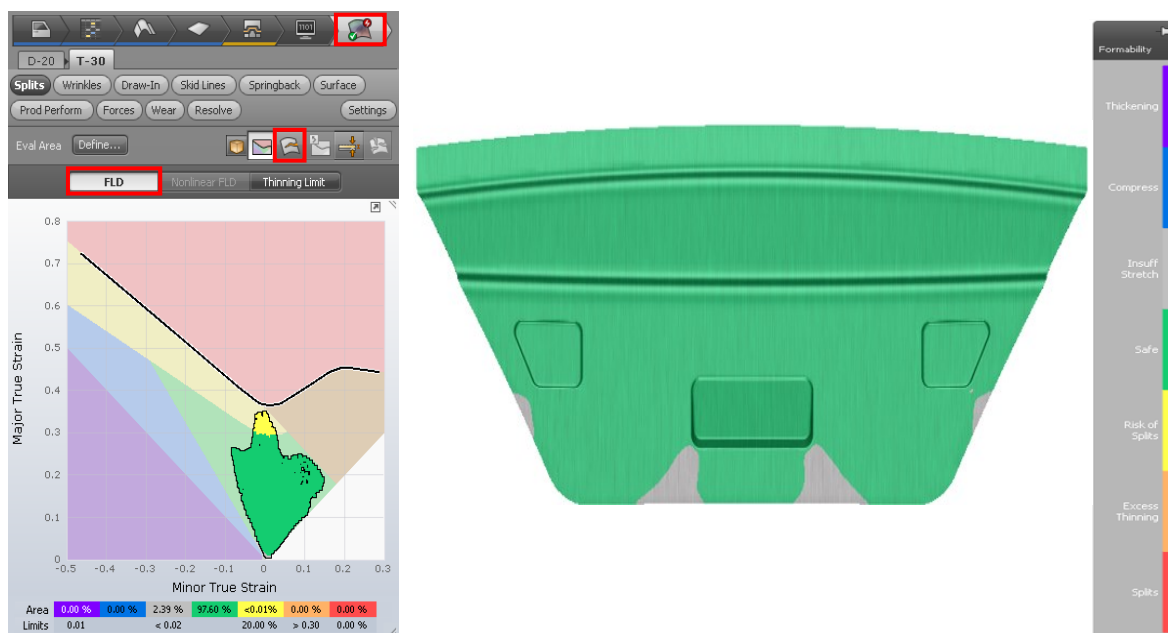
Po optimalizaci celého procesu je nutno znovu spustit výpočet simulace a přepočítat celý první návrh s optimalizovaným nastavením. Po dokončení lze přepnout do karty a zobrazit finální výsledky po optimalizaci.

8.7 Optimalizované výsledky

Po dokončení výpočtu simulace lze zobrazit výsledky nastavené optimalizace, jako je tvářitelnost (Formability), maximální porušení (Max Failure) a ztenčení (Thinning).

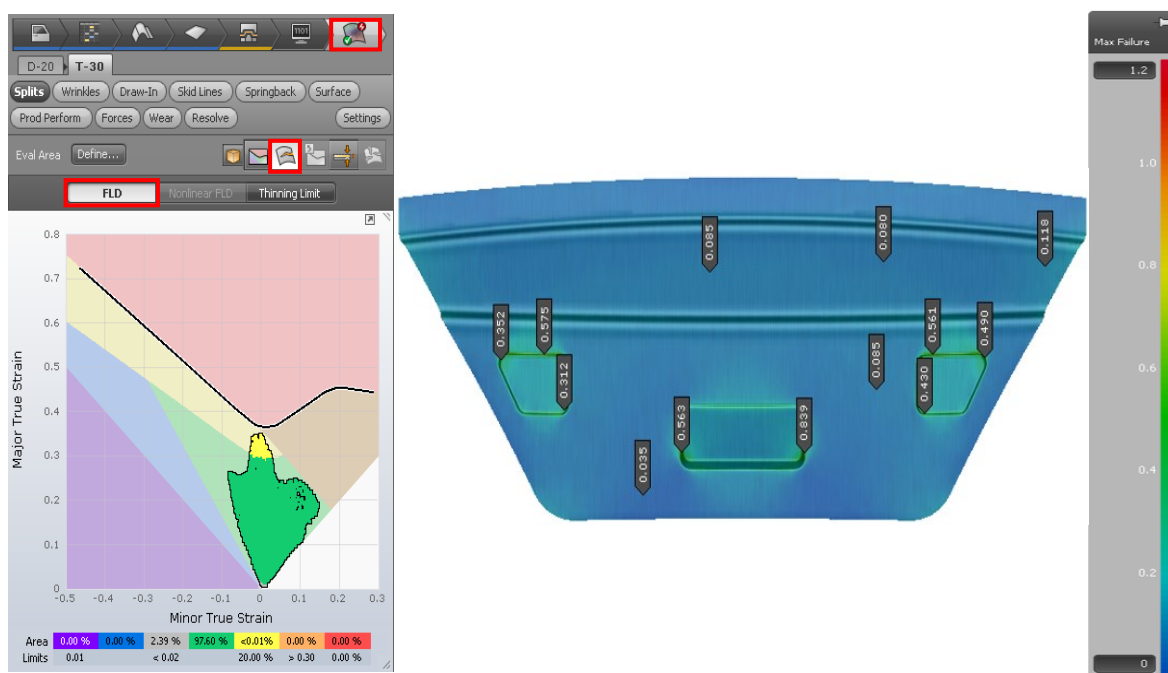
8.7.1 Výsledky tvářitelnosti (Formability) po optimalizaci

Z obrázku vyplývá (viz. obrázek 78), že nedochází téměř k žádným nežádoucím jevům, až na minimální výskyt rizika trhlin 0,01 % (žlutá). Pravděpodobnost výskytu rizika trhlin je tak malá, že výskyt této oblasti je v toleranci (0,3 %) a může být zanedbán. Hodnota bezpečné oblasti je dle FLD diagramu na 97,60 % což je téměř perfektní výsledek.



Obrázek 78. Vyhodnocení optimalizované tvářitelnosti (Formability) součásti

8.7.2 Výsledek maximálního porušení (Max Failure) po optimalizaci

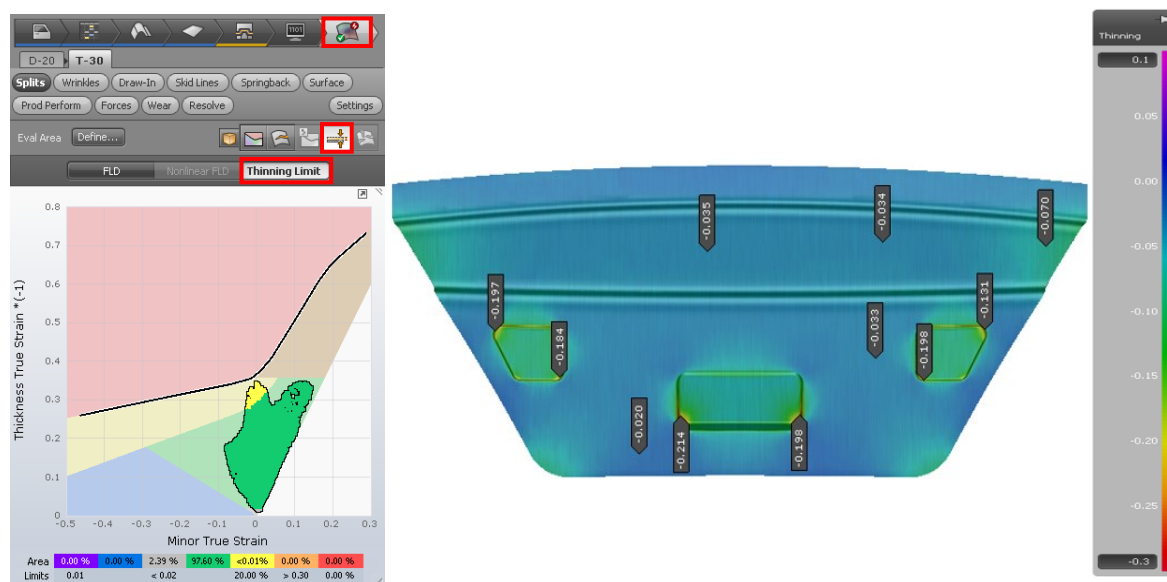


Obrázek 79. Vyhodnocení optimalizovaného poškození (Max Failure) součásti

Z obrázku (viz. obrázek 79) je patrné, že nedochází k žádnému porušení. Obvykle dochází k největšímu riziku v místech největšího ohybu, nicméně v tomto případě nebyla nikde překročena hraniční hodnota 1. V nejvíce kritickém místě byla zjištěna hodnota 0,839, což je v pořádku.

8.7.3 Výsledek ztenčení (Thinning) po optimalizaci

Z obrázku (viz. obrázek 80) je viditelné, že nedochází k významnému ztenčení. Obvykle dochází k největšímu ztenčení kvůli dlouhému profilu tažné hrany nástroje, a to zpravidla na místech malých poloměrů zaoblení. Hraniční hodnota 0,3 nebyla v tomto případě překročena, ale v nejvíce kritickém místě byla zjištěna hodnota -0,214, což je v pořádku a také v toleranci.



Obrázek 80. Vyhodnocení optimalizovaného ztenčení (Thinning) součásti

8.8 Souhrn výsledků optimalizace a porovnání s požadovanými

- Požadované výsledky a parametry

Tabulka 7. Přehled zadaných požadavků

Zvolený materiál	Vhodný pro hluboké tažení
Tvářecí lis	Vhodný tvářecí lis
Maximální přípustná tloušťka plechu [mm]	Maximálně 1 mm
Oblast porušení [%]	0,00 %
Oblast ztenčení [%]	Maximálně 0,30 %
Oblast riziková [%]	Maximálně 0,30 %
Oblast bezpečná [%]	Více jak 80 %
Maximální hodnota rizika porušení [-]	Maximální hodnota 1
Maximální hodnota ztenčení [-]	Maximální hodnota 0,3
Vhodná geometrie tažné hrany nástroje	Splněno/Nesplněno

- Dosažené výsledky a parametry po optimalizaci

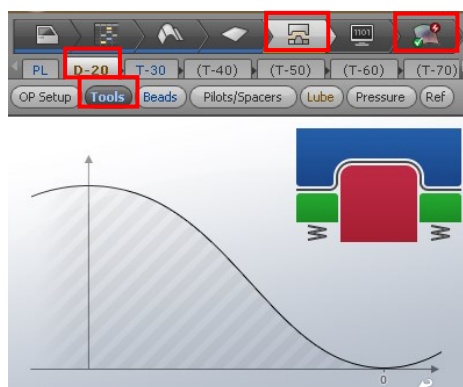
Tabulka 8. Přehled dosažených výsledků optimalizace

Zvolený materiál	Ocel pro studené tváření DC04
Tvářecí lis	Lis PressLine 1800T
Zvolená tloušťka plechu [mm]	0,85 mm
Oblast porušení [%]	0 %
Oblast ztenčení [%]	0 %
Oblast riziková [%]	0,01 %
Oblast bezpečná [%]	97,60 %
Maximální hodnota rizika porušení [-]	0,839
Maximální hodnota ztenčení [-]	-0,214
Vhodná geometrie tažné hrany nástroje	Splněno

Výsledky optimalizace jsou ve své podstatě nejlepší, jak jen mohly, protože jsou splněny 10 z 10 požadavků. Velice pozitivními výsledky této optimalizace je hodnota bezpečné oblasti 97,60 % (zelená) a vhodně navržená geometrie tažné hrany nástroje. Optimalizace byla tedy úspěšná s velice pozitivními výsledky. Tyto výsledky mohou být použity pro návrh konstrukce tažného nástroje.

9 POSTUP PROCESU

Program Autoform R8 poskytuje velice přehlednou vizualizaci procesu tažení optimalizované simulace. Postup procesu technologie hlubokého tažení je v tomto případě rozdělen do čtyř hlavních kroků. Tato kompletní vizualizace je možná zobrazit v kartě výsledky a v kartě proces pod záložkou nástroje (tools).

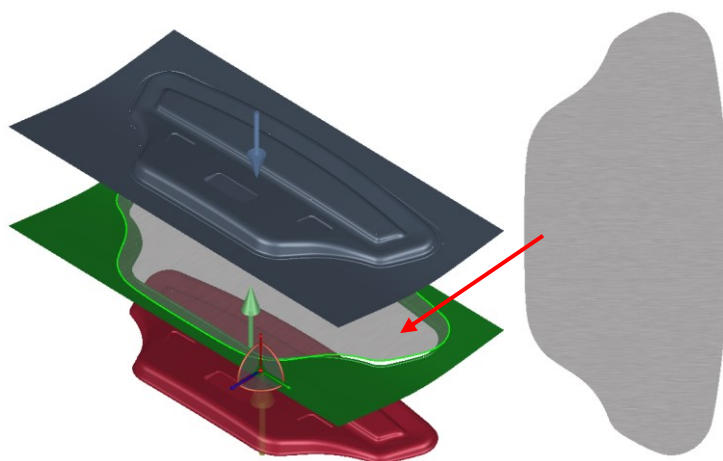
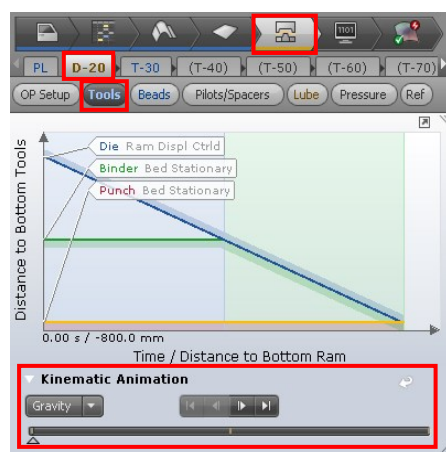


Obrázek 81. Vizualizace procesu

Modrá – Tažnice, Červená – Tažník, Zelená – Přidržovač, Šedá – Plech

9.1 První krok postupu

Jako první krok je vložení přístřihu polotovaru mezi funkční části tažného nástroje (viz. obrázek 81). Polotovar se vkládá hlavně mezi přidržovač (zelená) a tažnici (modrá). Tažník (červená) zastává svou funkci až v následujících krocích. Nástroje jsou nastaveny v počáteční poloze, kde celý proces začíná.

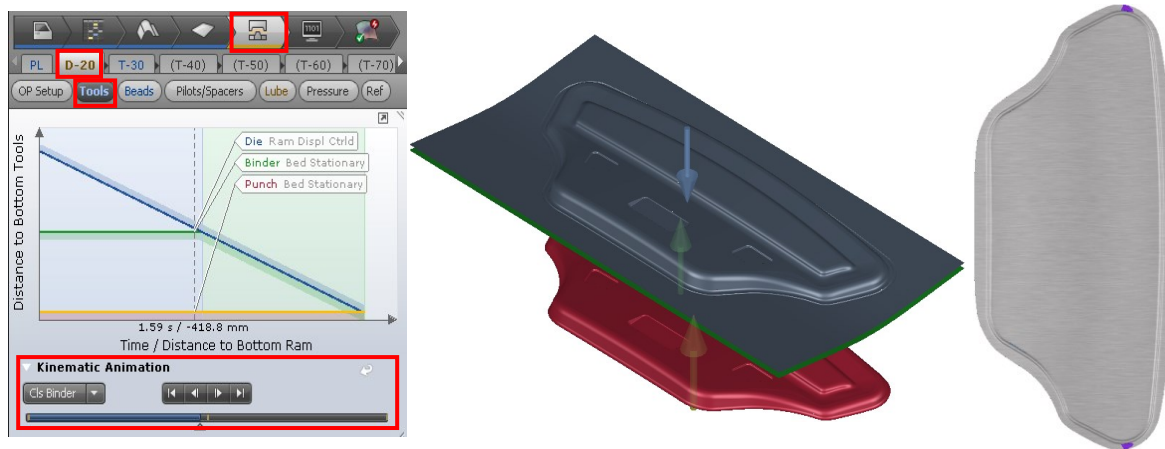


Obrázek 82. Vizualizace prvního kroku

*Pohyb a pozice nástrojů (vlevo), Vyobrazení nástrojů (uprostřed),
Přístřih polotovaru (vpravo)*

9.2 Druhý krok postupu

V tomto kroku se dává do pohybu jako první tažník (červená). Ten vytváří tlak pomocí přitlačných pružin na přidržovač (zelená), který se díky tomuto tlaku dává do pohybu. Tažník posune přidržovač až k samotné tažnici (modrá) a mezi nimi stiskne plechový polotovár. Tažník dále tlačí a díky jeho konstantnímu tlaku, který stále vyvíjí na přidržovač, se mezi tažnicí a přidržovačem začne uplatňovat funkce brzdící drážky. Geometrie brzdné drážky se do polotovaru vytlačí jako první (viz. obrázek 83). Díky tomu plech nebude mít možnost nikam uhnout a ujíždět během tváření, a dojde ke zlepšení přetvoření během finálního tažení.

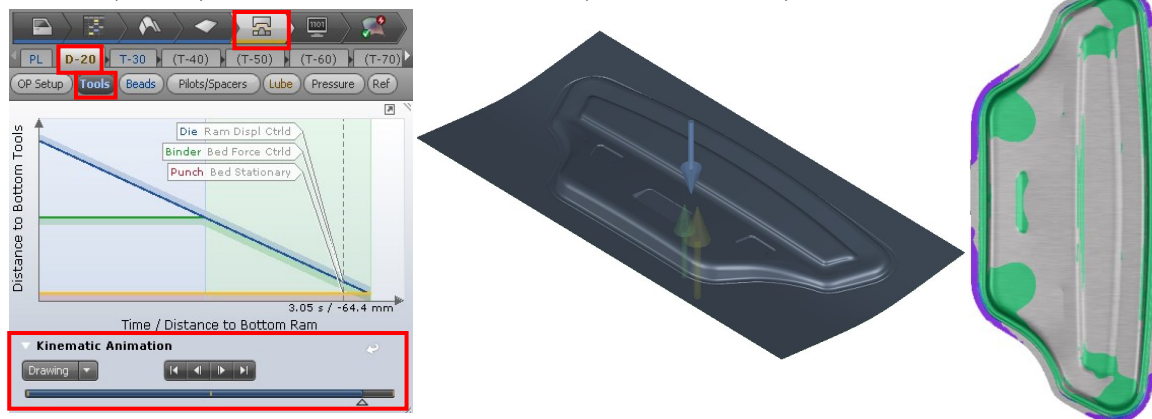


Obrázek 83. Vizualizace druhého kroku

*Pohyb a pozice nástrojů (vlevo), Vyobrazení nástrojů (uprostřed),
Výsledek druhého kroku (vpravo)*

9.3 Třetí krok postupu

U třetího kroku dochází k nejdůležitější části procesu, a to samotnému hlubokému tažení. Tažník (červená) projíždí přidržovačem (zelená) a začíná se postupně vtlačovat do geometrie tažnice (modrá), v tomto bodě začíná tažení (viz. obrázek 84).



Obrázek 84. Vizualizace třetího kroku

*Pohyb a pozice nástrojů (vlevo), Vyobrazení nástrojů (uprostřed),
Začátek tažení (vpravo)*

Tažník je vtlačován do tažnice do té doby, dokud nedojde k celému vytažení plechu do finální podoby (viz. obrázek 85). Nástroj se celý otevře a finálně vytažený plech se poté z nástroje vytáhne a přejde se na poslední čtvrtý krok, kterým je ořez součásti.



Obrázek 85. Výsledek třetího kroku (konec tažení)

9.4 Čtvrtý krok postupu

Posledním krokem celého postupu procesu je ořez výtažku do finálního tvaru (viz. obrázek 86). Je nutno oříznout zbytkový materiál, který zůstal po hlubokém tažení a není součástí tvaru zadané součásti. Tento ořez, jak již bylo zmíněno dříve, bude proveden na laserovém zařízení.



Obrázek 86. Vizualizace čtvrtého kroku (finální ořez)

10 NÁVRH KONCEPCE TAŽNÉHO NÁSTROJE

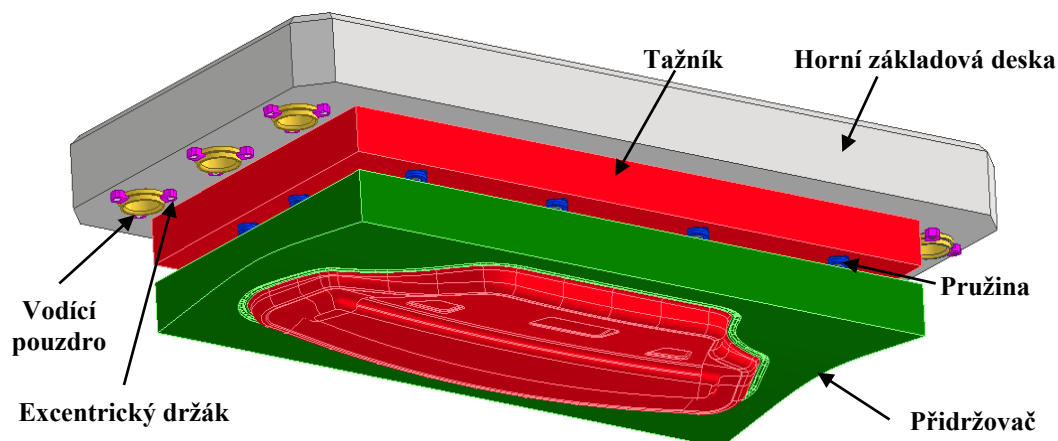
Je nutno zmínit, že se jedná pouze o návrh koncepce a prototyp tažného nástroje. Hlavním cílem je vyhotovení a návrh funkčních částí. Pro využití návrhu nástroje v sériové výrobě by bylo zapotřebí ještě dořešit několik konstrukčních náležitostí. Model navrhnutého tažného nástroje (viz. obrázek 87) byl celý zhotoven v programu pro 3D modelování Autodesk Inventor. Při návrhu konstrukce se vychází z výsledků optimalizovaného návrhu simulace. Pro lepší popsání a zobrazení jednotlivých součástí se rozdělil tažný nástroj na tři části horní (horní deska, tažník a přidržovač), spodní (základová deska a tažnice) a spojovací součásti s vodícími prvky (šrouby, pružiny, vodící sloupky a pouzdra). Nakonec byl vyhotoven výkres sestavy s patřičnými pohledy a kusovníkem, který je k dispozici pro nahlédnutí v příloze P I.



Obrázek 87. Návrh 3D modelu tažného nástroje

10.1 Horní část tažného nástroje

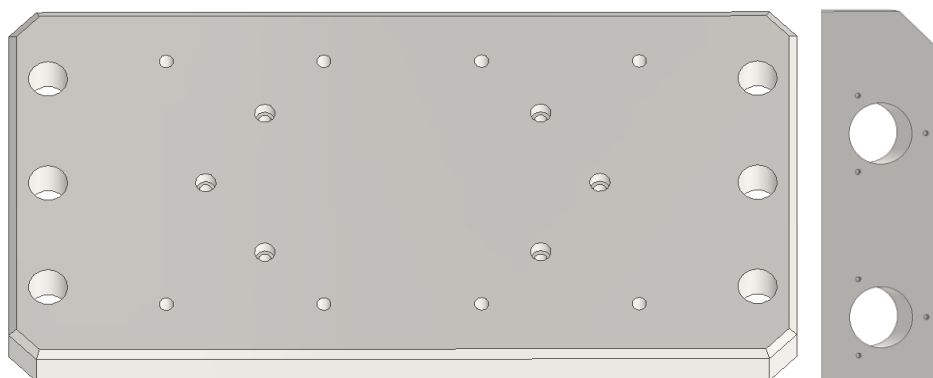
Horní část se skládá ze 3 hlavních částí (viz. obrázek 88) těmi jsou: horní základová deska, tažník a přidržovač. Jedná se o pohyblivou část, která je celá spojena několika šrouby a pro funkci přidržovače obsahuje pružiny. Celá horní část se pohybuje po vodících sloupcích.



Obrázek 88. Horní část nástroje

10.1.1 Horní základová deska

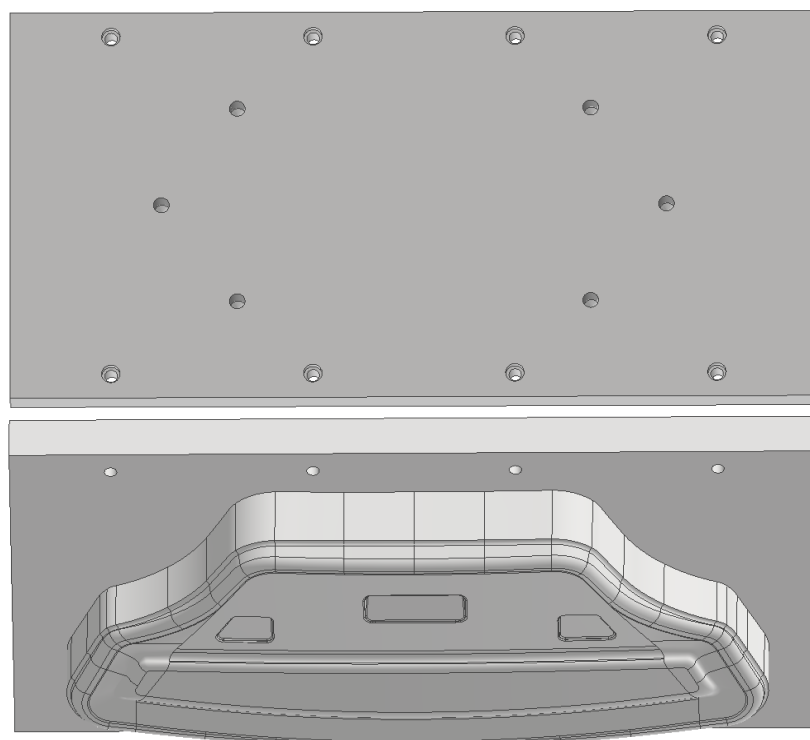
Horní deska (viz. obrázek 89) je součást, na kterou je vyvoláván tlak pomocí lisovacího stroje. Je v ní vyvrtáno 6 zápusťných děr pro šrouby, které spojují desku s tažníkem. Dále je v desce vyhotoveno 14 průchozích děr, z toho mezi ně patří 6 děr pro vodící pouzdra a 8 děr pro další šrouby. Naspodu desky je 18 závitových děr pro uchycení excentrických držáků.



Obrázek 89. Horní základová deska

10.1.2 Tažník

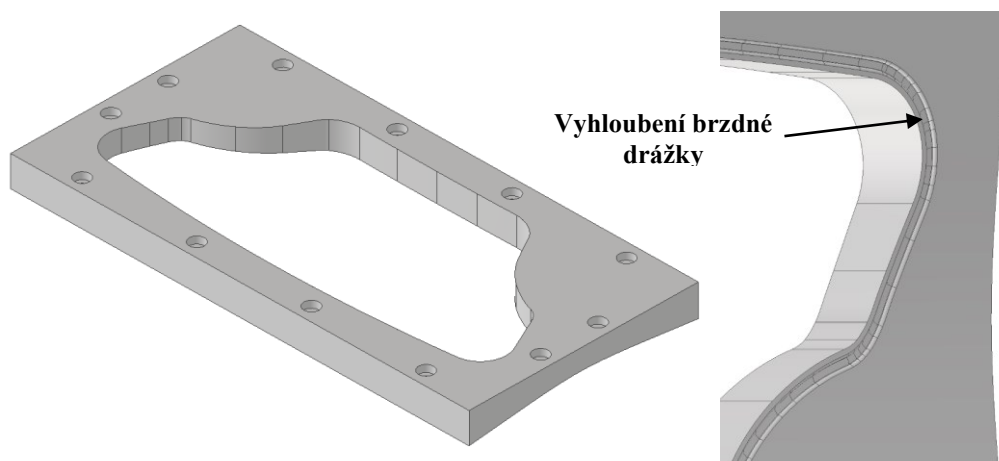
Jedná se jednu ze tří hlavních funkčních částí celého tažného nástroje. Tažník (viz. obrázek 90) je připevněn zespodu k horní základové desce, a proto je v něm vyhotoveno 6 závitových děr. V tažníku je také 8 zápusťných děr, kterými prochází šrouby za účelem propojení tažníku s přidržovačem.



Obrázek 90. Tažník

10.1.3 Přidržovač

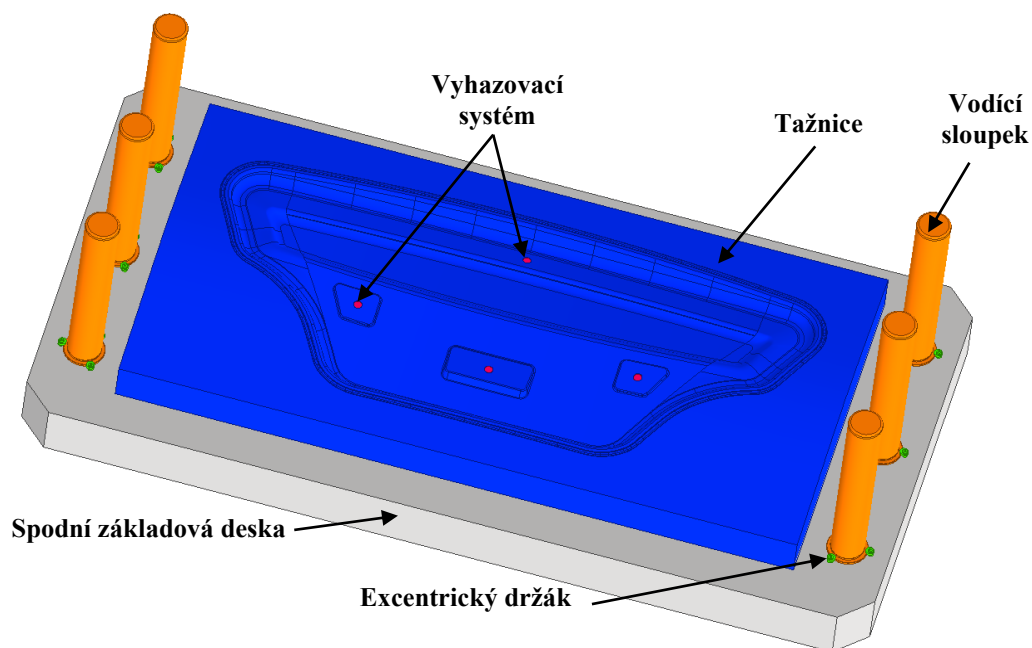
Přidržovač je druhou hlavní funkční částí (viz. obrázek 91). Přidržovač je vzájemně spojen s tažníkem. V přidržovači je vyhotoveno 8 závitových děr pro šrouby a 10 zahluubení pro uložení pružin, aby pružiny neměly tendenci vybočit při stlačení. Vnitřním průměrem pružin také prochází všechny spojovací šrouby. Na přidržovači je také vyhlouben tvar a trajektorie brzdící drážky (viz. obrázek 91).



Obrázek 91. Přidržovač

10.2 Spodní část tažného nástroje

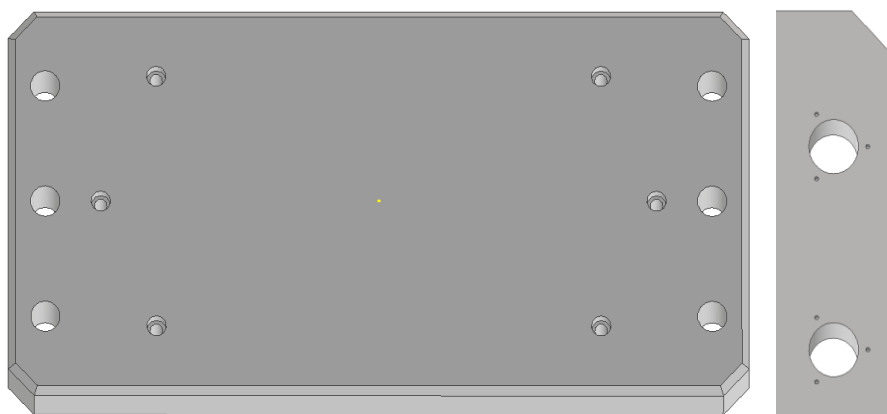
Spodní část se skládá ze 2 hlavních částí (viz. obrázek 92), a to je spodní základová deska a tažnice. Jedná se o část, která je nepohyblivá a je upevněna na pracovním stole lisu. Celá spodní část je opět spojena několika šrouby. Ve spodní části je také uložen jednoduchý vyhazovací systém pro lepší odběr vytaženého plechu, který by jinak zůstal uvnitř tažnice.



Obrázek 92. Spodní část nástroje

10.2.1 Spodní základová deska

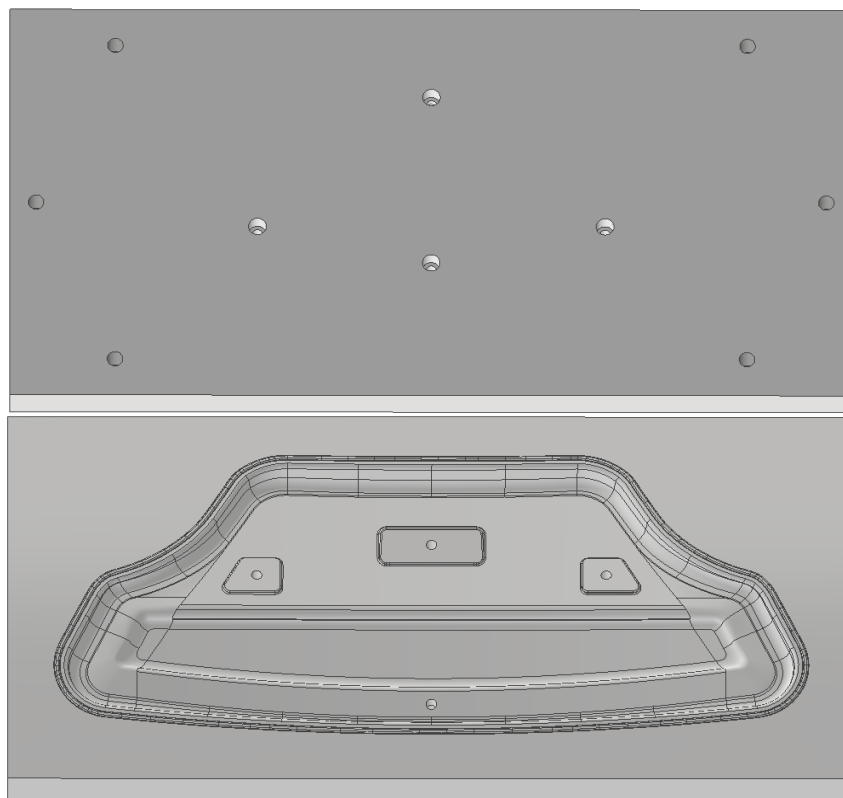
Spodní deska (viz. obrázek 93) je poležena na pracovním stole lisu. Ve spodní desce je stejně jako v horní vyvrtáno 6 zápusťných děr pro pojení spodní základové desky s tažnicí. Pro uložení vodících sloupů bylo třeba do desky vyrobit 9 průchozích otvorů a stejně jako u horní části 18 závitových děr pro uchycení excentrických držáků.



Obrázek 93. Spodní základová deska

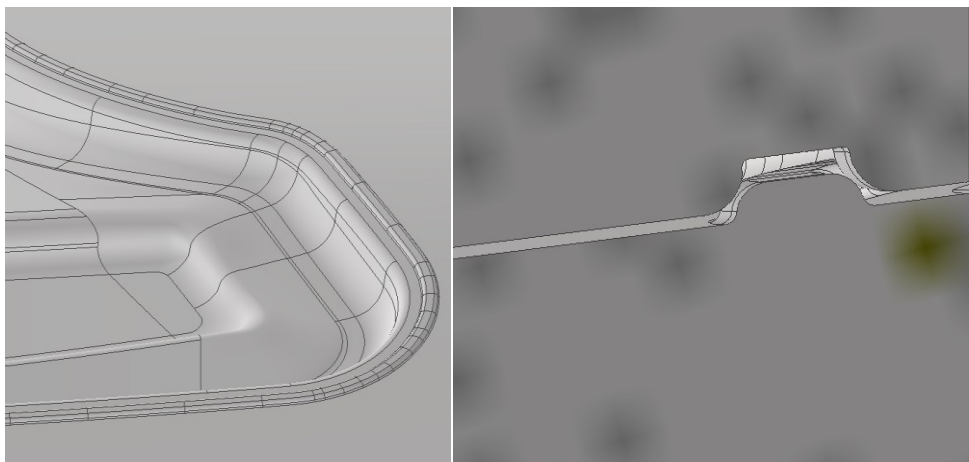
10.2.2 Tažnice

Tažnice je třetí a poslední ze všech tří hlavních funkčních částí celého tažného nástroje (viz. obrázek 94). Zespodu tažnice je vyvrtaných 6 závitových děr pro spojení se spodní základovou deskou. Tažnice obsahuje vyhloubené 4 díry pro uložení vyhazovacího systému.



Obrázek 94. Tažnice

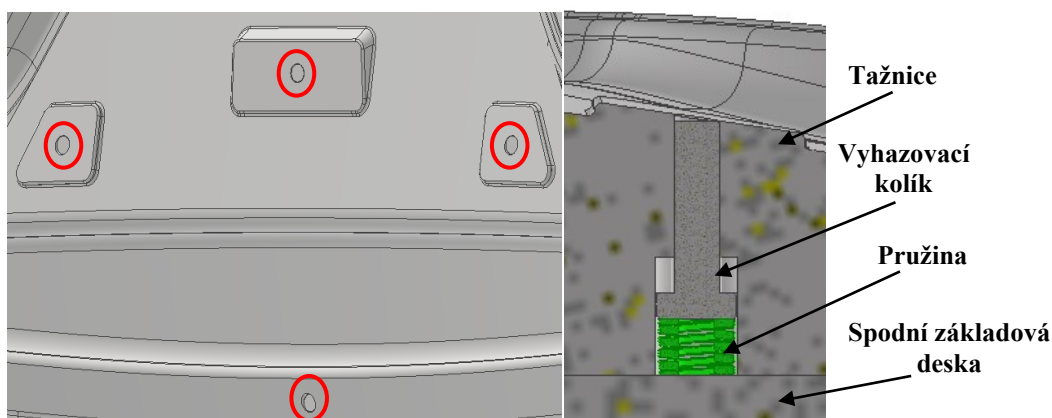
Na povrchu tažnice vyčnívá tvar a trajektorie brzdné drážky, která zapadá a kopíruje tvar vyhloubené drážky na přídržovači (viz. obrázek 95).



Obrázek 95. Brzdná drážka na tažnici (vlevo), Drážka tažnice a přídržovače (vpravo)

10.2.3 Vyhazovací systém

Systém vyhazování plechu funguje na jednoduchém principu pružiny v kombinaci s vyhazovacím kolíkem (viz. obrázek 96). Jak již bylo zmíněno v tažnici je zespod uděláno vyhloubení, kde se pružina s kolíkem uloží.



Obrázek 96. Umístění vyhazovacího systému

Pružina se opírá a odtlačuje od spodní základové desky. Když tažník zajíždí do tažnice a probíhá proces tažení, tak se vyhazovací systém zamáčkne. Jakmile se tažník zvedne, pružina vytlačí kolík směrem nahoru, který projede skrze tažnici a nadzvedne plech.

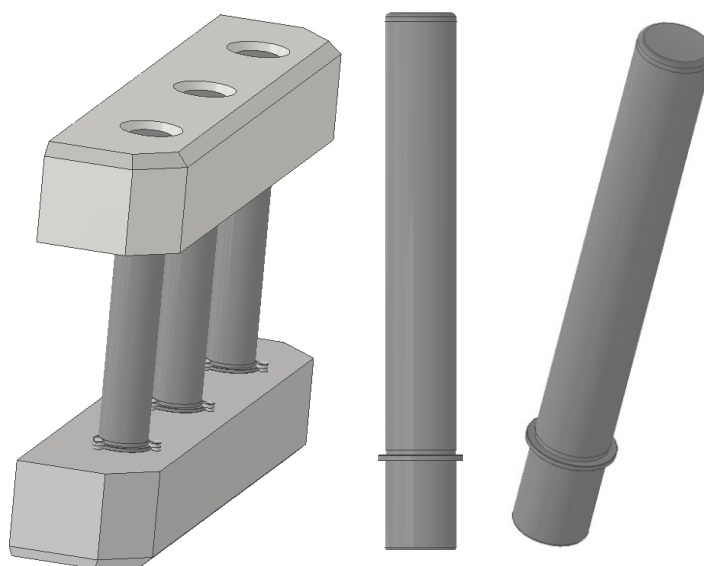
10.3 Potřebné příslušenství

Mezi potřebné součásti patří ty, bez kterých by se tažný nástroj neobešel a jeho funkčnost by byla téměř nulová. Mezi ně patří vodící sloupky s vodicími pouzdry, pružiny, excentrické

držáky a šrouby. Všechny tyto součásti jsou pro funkčnost nástroje velice důležité a nezanedbatelně splňují svou úlohu.

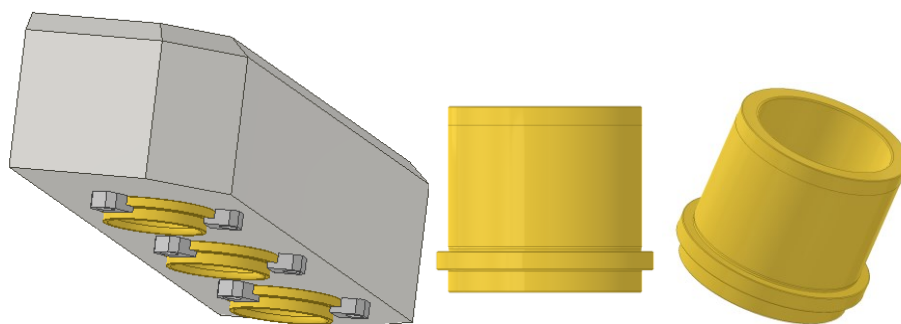
10.3.1 Vodicí sloupky a pouzdra

Sloupek splňuje úlohu vedení pohybu nástroje. Sloupky jsou uloženy ve spodní základové desce a jejich celkem 6 na každé straně tři (viz. obrázek 97). Každý sloupek obsahuje nákrůžek pro lepší uchycení excentrickými držáky k základové desce. Sloupek lze vidět na obrázku (viz. obrázek 97).



Obrázek 97. Vodicí sloupek a jeho uložení

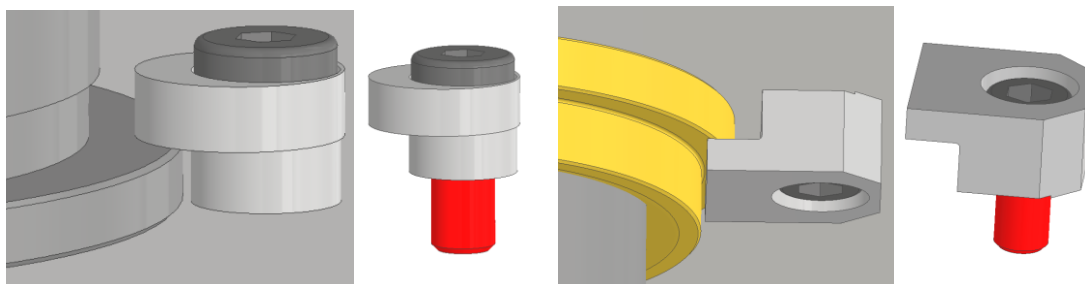
Každý sloupek prochází takzvaně vodicím pouzdrem (viz. obrázek 98). Vodicí pouzdra zajišťují přesné vedení pohyblivé části (horní část nástroje) po vodicích sloupcích. Pouzder je stejný počet jako je počet sloupků. Každé pouzdro je připevněno zespod k horní základové desce taktéž excentrickým držákem (viz. obrázek 98).



Obrázek 98. Vodicí pouzdro a jeho uložení

10.3.2 Excentrické držáky

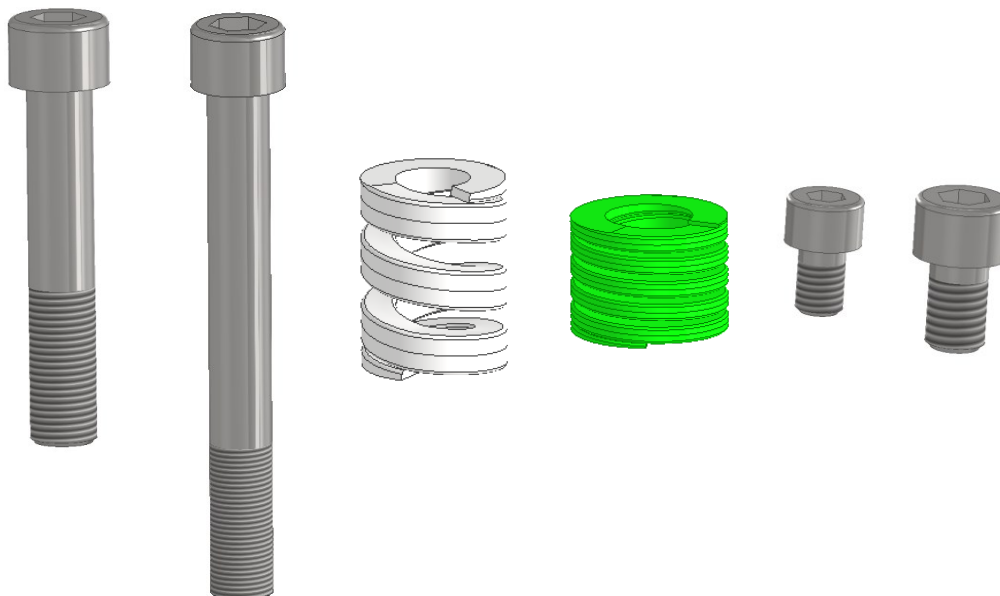
V tomto případě byly použity dva typy excentrických držáků. Jeden pro uchycení a upevnění vodících sloupků ke spodní základové desce (viz. obrázek 99). Druhým typem se uchytily vodící pouzdra k horní základové desce (viz. obrázek 99). Každý excentrický držák obsahuje svůj šroub.



Obrázek 99. Excentrický držák pro sloup (vlevo) a pro pouzdro (vpravo)

10.3.3 Pružiny a šrouby

Sestava obsahuje 12 šroubů M33 propojení tažníku a tažnice se základovými deskami. Pro propojení tažníku s přidržovačem má sestava 8 šroubů M24. Dále 10 systémových tlačných pružin pro extrémní zatížení, které odtlačí přidržovač a 4 pružiny pro funkci vyhazovacího systému. Dále sestava obsahuje mnoho menších šroubů pro excentrické držáky M8x12 (spodní deska) a M10x12 (horní deska).



Obrázek 100. Použité šrouby a pružiny

*Z leva šroub M33, šroub M24, systémová pružina, pružina pro vyhazovač,
šroub M8 a M10*

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala komplexním návrhem procesu tváření plechového dílu, včetně simulační analýzy a návrhu koncepce prototypu tvářecího nástroje. Celá práce byla rozdělena do dvou hlavních částí. Částí – teoretické a praktické.

V teoretické části byla provedena literární rešerše zaměřená na problematiku tváření s postupně bližším zaměřením na proces hlubokého tažení. Dále byly popsány vlastnosti plechových materiálů využívaných při těchto technologiích. Také byla vypracována kapitola, která popisuje nástroje pro technologii hlubokého tažení. Mezi poslední část teorie patří kapitola o základních principech numerických simulací, které jsou dnes nedílnou součástí vývoje v oblasti tvářecích procesů.

V praktické části byl na základě zadání vytvořen 3D model zvoleného plechového dílu. Následně byl navržen postup simulace výrobního procesu, přičemž první návrh vykázal nepříznivý výsledek, a to zejména v oblasti tvářitelnosti a oblasti porušení. Také bezpečná oblast dosáhla jen 19,15 % a navržená geometrie tažné hrany nástroje byla nevyhovující. Z těchto důvodů bylo proto přistoupeno k optimalizaci geometrie i technologických parametrů, což vedlo k pozitivnímu výsledku simulace a splnění všech požadavků. Byl podrobně popsán celý postup procesu hlubokého tažení od nástřihu polotovaru až do dosažení finálního tvaru zadané součásti. Závěrem byl navržen koncept prototypu tažného nástroje ve 3D prostředí softwaru Autodesk Inventor. Výstupem byla nejen samotná 3D sestava, ale také výkresová dokumentace sestavy včetně kusovníku, který obsahuje veškerý přehled všech součástí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] P C, Sharath. Chapter 17 - Multi directional forging: an advanced deforming technique for severe plastic deformation: an advanced deforming technique for severe plastic deformation. In: *Handbooks in Advanced Manufacturing*. Elsevier, 2021, s. 529-556. ISBN 978-0-12-822049-8. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822049-8.00017-7>
- [2] *Tváření* [online]. [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: <https://techstroj.g6.cz/T/T06.pdf>
- [3] LENFELD, Doc. Dr. Ing. Petr. *Technologie II* [online]. [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [4] DANCHENKO, V. N. *METAL FORMING* [online]. National metallurgy academy of Ukraine, 2007, 2007 [cit. 2025-02-15]. ISBN ISBN 996-525-716-1. Dostupné z: <http://metal-forming.org/images/for-books/Danchenko/danchenko-omd-engl.pdf>
- [5] RUFÉ, Philip D. *Fundamentals of Manufacturing (3rd Edition)*. In: . Society of Manufacturing Engineers (SME). ISBN 978-0-87263-870-9. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BKEM24/fundamentals-manufacturing/fundamentals>
- [6] BUSCHOW, K.H. Jürgen, Robert W. CAHN, Merton C. FLEMINGS, Bernhard ILSCHNER, Edward J. KRAMER a Subhash MAHAJAN. *Encyclopedia of Materials - Science and Technology, Volumes 1-11*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-08-043152-9. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B7AAE1/encyclopedia-materials/metal-forming-hot-microstructural>
- [7] DVOŘÁK, CSC., doc. Ing. Milan a Ing. Michaela CÍSAŘOVÁ, PH.D. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ* [online]. Brno, 2021 [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/ctt_technologie_tvareni_sylabus_dvorak_cisarova.pdf. Studijní opory pro kombinované studium I. stupeň, 2. ročník. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.
- [8] SCALLAN, Peter. *Process Planning - The Design/Manufacture Interface*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-7506-5129-5. Dostupné také z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009XA737/process-planning-design/forming-shaping-general-classification>

- [9] LENFELD, Doc. Dr. Ing. Petr. *Technologie II* [online]. [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm
- [10] MASARYKOVA UNIVERZITA. *TVÁŘENÍ Objemové a plošné tváření* [online]. [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2020/TI1008/um/21_tech_tvareni.pdf
- [11] SCHMID, Steven R. *Schey's Tribology in Metalworking - Friction, Lubrication, and Wear*. In: . ASM International. ISBN 978-1-62708-457-4. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt013HRFH1/scheys-tribology-in-metalworking/extrusion-process>
- [12] TRNKA, FILIP. *VÝROBNÍ MOŽNOSTI TVÁŘENÍ ZA STUDENA* [online]. BRNO, 2010 [cit. 2025-02-17]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29966. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. MIROSLAV ŠLAIS.
- [13] CAMPBELL, F.C. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. In: . ASM International. ISBN 978-0-87170-867-0. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00URLT43/elements-metallurgy-engineering/bending>
- [14] MALLICK, P. K. *Materials, Design, and Manufacturing for Lightweight Vehicles (2nd Edition)*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-12-818712-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012LXTP4/materials-design-manufacturing/trimming-shearing>
- [15] OBERG, Erik, Franklin D. JONES, Holbrook L. HORTON, Henry H. RYFFEL a Christopher J. MCCAULEY. *Machinery's Handbook (32nd Edition)*. In: . Industrial Press. ISBN 978-0-8311-3732-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt013SR6P4/machinerys-handbook-32nd/inside-bend-radius>

- [16] TRUMPF. *Ohýbání – postup a metody* [online]. 2025 [cit. 2025-02-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/ohybani/
- [17] HLC. *Lemování plechu|Vysvětlení typů a procesů* [online]. 2024 [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <http://cz.hlc-metalparts.com/news/sheet-metal-hemming-84022168.html>
- [18] KAMENÍK, Bc. TOMÁŠ. *TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ OCELOVÉHO PROFILU* [online]. BRNO, 2013 [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66220. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. MILAN DVOŘÁK, CSc.
- [19] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design (2nd Edition)*. In: . Industrial Press. ISBN 978-0-8311-3492-1. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010V7S02/sheet-metal-forming-processes/analytical-method>
- [20] QIN, Yi. *Micromanufacturing Engineering and Technology (2nd Edition)*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-323-31149-6. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UMDAP5/micromanufacturing-engineering/deep-drawing-sheet-metal>
- [21] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLÉVÁNÍ – TEORETICKÝ ZÁKLAD* [online]. Ostrava 2013 [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/vy_01_004/Technologie%20tv%C3%A1%C5%99en%C3%AD%20a%20sl%C3%A9v%C3%A1n%C3%AD%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/publikovat/kapitoly/6.%20TA%C5%BDEN%C3%8D%20PLECHU.pdf
- [22] BOLJANOVIC, Vukota. *Metal Shaping Processes - Casting and Molding; Particulate Processing; Deformation Processes; and Metal Removal*. In: . Industrial Press. ISBN 978-0-8311-3380-1. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009XJQI3/metal-shaping-processes/mechanics-deep-drawing>

- [23] GROTE, Karl-Heinrich a Hamid HEFAZI. *Springer Handbook of Mechanical Engineering (2nd Edition)*. In: . Springer Nature. ISBN 978-3-030-47034-0. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt013OEB41/springer-handbook-mechanical/mechanisms-plastic-deformation>
- [24] ALTAN, Taylan, Gracious NGAILE a Gangshu SHEN. *Cold and Hot Forging - Fundamentals and Applications*. In: . ASM International. ISBN 978-0-87170-805-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00URF0Y2/cold-hot-forging-fundamentals/state-of-stress>
- [25] ALTAN, Tayla a A. Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming - Fundamentals*. In: . ASM International. ISBN 978-1-61503-842-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AEAXM3/sheet-metal-forming-fundamentals/low-carbon-sheet-steels>
- [26] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN isbn9788021447479.
- [27] DEMERI, Mahmoud Y. *Advanced High-Strength Steels - Science, Technology, and Applications*. In: . ASM International. ISBN 978-1-62708-005-7. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U5KN89/advanced-high-strength/categories-austenitic>
- [28] SOLEIMANI, Maryam, Alireza KALHOR a Hamed MIRZADEH. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review: A review. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, **795**, 140023. ISSN 0921-5093. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140023](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140023)
- [29] MM SPEKTRUM. *Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie* [online]. 2017 [cit. 2025-02-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>
- [30] MALLICK, P. K. *Materials, Design, and Manufacturing for Lightweight Vehicles (2nd Edition)*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-12-818712-8. Dostupné také z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012LXPC3/materials-design-manufacturing/dual-phase-steels>

- [31] ING. KUBÍČEK MIROSLAV. *Tváření a Konstrukce tažných nástrojů* [online]. [cit. 2025-02-24]. Dostupné z: https://www.sokolska.cz/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_20-16.pdf
- [32] ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming - Processes and Applications*. In: . ASM International. ISBN 978-1-61503-844-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AD2DQ2/sheet-metal-forming-processes-2/tool-materials>
- [33] ROLL, Prof. Dr. Ing. Karl. *Simulation of Sheet Metal Forming - Necessary Developments in the Future* [online]. 59-68 [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum08/dokumente/A-I-06.pdf>
- [34] OLIVEIRA, Marta C. a José V. FERNANDES. Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes. *Metals* [online]. 2019, 9(12) [cit. 2025-04-19]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9121356
- [35] AVERMANN, Markus. FORMINGWORLD SHEET FORMING SIMULATION NEWS. Why do we still need Forming Limit Diagrams (FLDs)? *FormingWorld Sheet forming Simulation NEWS* [online]. 2020, 30.06.2020 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://formingworld.com/forming-limit-diagram/>
- [36] STAMPINGSIMULATION. *What is The Non-Linear Forming Limit Diagram?* [online]. [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://stampingsimulation.com/forming-limit-diagram/>
- [37] TAWARE, Rahul a Vidyadhar RAJMANE. Design and Forming Analysis of BIW Sheet Metal Component Using Autoform Simulation Software. *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Topics*. 2021/05/19, 2(4), 194-201. Dostupné také z: <https://journals.ijramt.com/index.php/ijramt/article/view/721>
- [38] BLAŽEK, Bc. Miroslav. *URČENÍ TECHNOLOGIE LISOVÁNÍ PLECHOVÉHO DÍLU* [online]. Brno, 2010 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: https://theses.cz/id/ha6v7f/Blaek_Miroslav_-

_Uren_technologie_lisovn_plechovho_dlu.pdf. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Základní rozdělení tváření a výsledné produkty s názvy operací [2].....	15
Obrázek 2. Rozdělení procesů tváření podle teploty [3]	16
Obrázek 3 Typy mřížek u kovů [4].....	17
Obrázek 4. Změna struktury zrn v důsledku tváření [3]	17
Obrázek 5. Změny v struktuře před a po tváření za tepla [6]	19
Obrázek 6. Teplotní rozsah pro kovy tvářené za tepla s rozdílným obsahem uhlíku [2]	19
Obrázek 7. Proces válcování [9]	22
Obrázek 8. Kovací diagram [9].....	22
Obrázek 9. Volné kování [8].....	23
Obrázek 10. Zápustka s výkovkem [10]	23
Obrázek 11. Strojní zařízení se znázorněním kovacího procesu [8].....	24
Obrázek 12. Dopředné protlačování [12].....	25
Obrázek 13. Radiální protlačování [12].....	26
Obrázek 14. Postup procesu stříhání [12]	27
Obrázek 15. Schématické zobrazení terminologie během procesu ohýbání [15].....	28
Obrázek 16. Znázornění rozložení a růstu napětí v materiálu [12]	28
Obrázek 17. Rovnání tlakem mezi rovnými deskami [12]	29
Obrázek 18. Volné ohýbání [16].....	29
Obrázek 19. Proces lemování a typy lemů [16; 17].....	30
Obrázek 20. Proces zakružování [18]	30
Obrázek 21. Schématické znázornění procesu hlubokého tažení [19]	32
Obrázek 22. Rozdělení procesů tažení [21]	33
Obrázek 23. Znázornění toku kovu při tažení [22]	34
Obrázek 24. Praskliny pohárku při hlubokém tažení [22]	34
Obrázek 25. Defekty vzniklé během tažení [20]	35
Obrázek 26. Plastická a elastická deformace krystalické mřížky [23]	37
Obrázek 27. Dvojčatění během plastické deformace [23]	37
Obrázek 28. Plastická deformace pohybem dislokací [23].....	38
Obrázek 29. Působení napětí na jednotlivé elementy [24]	38
Obrázek 30. Závislost pevnosti v tahu na tažnosti různých typů ocelí [27]	40
Obrázek 31. Typická mikrostruktura HSLA [30]	42
Obrázek 32. Typická mikrostruktura DP [30]	42
Obrázek 33. Typická mikrostruktura TRIP [30].....	43
Obrázek 34. Graf prodloužení-pevnosti-tvrdosti pro aktuálně používané oceli [27]	44

Obrázek 35. Tažný nástroj bez přidržovače a) a s přidržovačem b) [9; 31]	46
Obrázek 36. Nalevo zvýšená tažná hrana napravo brzdící lišta [9]	46
Obrázek 37. Poruchy nástrojů [32]	48
Obrázek 38. FLD Diagram [36]	51
Obrázek 39. Vyhodnocení tvářitelnosti v softwaru Autoform R8	52
Obrázek 40. Vyhodnocení nadměrného zeslabení v softwaru Autoform R8	53
Obrázek 41. Vyhodnocení porušení v softwaru Autoform R8	53
Obrázek 42. Model zadané součásti pátých dveří	56
Obrázek 43. Vložení dílu s vybráním referenční plochy	58
Obrázek 44. Parametry materiálu HCT690T z databáze Autoform R8	59
Obrázek 45. Zvolení materiálu HCT690T a volba jeho tloušťky	59
Obrázek 46. První Formcheck součásti	60
Obrázek 47. Nastavení Formchecku	60
Obrázek 48. Parametry tvářecího lisu PressLine 1800T	61
Obrázek 49. Souhrnný plán operací tváření	61
Obrázek 50. Vytvoření přidržovače (zelená geometrie)	62
Obrázek 51. Nastavení parametrů přidržovače	63
Obrázek 52. Profil tažné hrany nástroje (oranžová geometrie)	63
Obrázek 53. Nastavení parametrů profilu tažné hrany	64
Obrázek 54. Nesprávně vytvořený profil tažné hrany nástroje	64
Obrázek 55. Nastavení druhého Formchecku	65
Obrázek 56. Geometrie přístřihu polotovaru součásti (modrá a zelená barva)	65
Obrázek 57. Přehled informací o polotovaru součásti	66
Obrázek 58. Vyhodnocení tvářitelnosti (Formability) součásti	67
Obrázek 59. Vyhodnocení poškození (Max Failure) součásti	67
Obrázek 60. Vyhodnocení ztenčení (Thinning) součásti	68
Obrázek 61. Parametry materiálu DC04 z databáze Autoform R8	70
Obrázek 62. Zvolení materiálu DC04 a volba jeho tloušťky	71
Obrázek 63. První Formcheck součásti optimalizovaného procesu	71
Obrázek 64. Nastavení Formchecku optimalizace	72
Obrázek 65. Nastavení změny geometrie tažné hrany End Fill + Auto Fill	73
Obrázek 66. Doplnění geometrie koncového profilu End Fill	73
Obrázek 67. Doplnění geometrie koncového profilu Auto Fill	73
Obrázek 68. Optimalizace přidržovače (zelená geometrie)	74
Obrázek 69. Optimalizované parametry přidržovače	74

Obrázek 70. Optimalizovaná tažná hrana nástroje (oranžová geometrie)	75
Obrázek 71. Nastavení nových parametrů profilu tažné hrany	75
Obrázek 72. Nastavení druhého Formchecku po optimalizaci	76
Obrázek 73. Nová geometrie přístřihu polotovaru součásti (modrá a zelená barva).....	76
Obrázek 74. Přehled informací o polotovaru součásti	77
Obrázek 75. Vytvoření brzdné drážky a její trajektorie.....	77
Obrázek 76. Nastavení průřezu a parametrů brzdné drážky	78
Obrázek 77. Nastavení maziva	79
Obrázek 78. Vyhodnocení optimalizované tváritelnosti (Formability) součásti	80
Obrázek 79. Vyhodnocení optimalizovaného poškození (Max Failure) součásti	80
Obrázek 80. Vyhodnocení optimalizovaného ztenčení (Thinning) součásti	81
Obrázek 81. Vizualizace procesu.....	83
Obrázek 82. Vizualizace prvního kroku	83
Obrázek 83. Vizualizace druhého kroku.....	84
Obrázek 84. Vizualizace třetího kroku	84
Obrázek 85. Výsledek třetího kroku (konec tažení)	85
Obrázek 86. Vizualizace čtvrtého kroku (finální ořez).....	85
Obrázek 87. Návrh 3D modelu tažného nástroje.....	86
Obrázek 88. Horní část nástroje.....	86
Obrázek 89. Horní základová deska	87
Obrázek 90. Tažník.....	87
Obrázek 91. Přidržovač.....	88
Obrázek 92. Spodní část nástroje.....	88
Obrázek 93. Spodní základová deska	89
Obrázek 94. Tažnice	89
Obrázek 95. Brzdná drážka na tažnici (vlevo), Drážka tažnice a přidržovače (vpravo)	90
Obrázek 96. Umístění vyhazovacího systému	90
Obrázek 97. Vodící sloupek a jeho uložení	91
Obrázek 98. Vodící pouzdro a jeho uložení	91
Obrázek 99. Excentrický držák pro sloup (vlevo) a pro pouzdro (vpravo)	92
Obrázek 100. Použité šrouby a pružiny	92

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Srovnání hlavních technologií tváření za studena a za tepla [5; 7].....	20
Tabulka 2. Přehled maziv používaných při tažení [19]	36
Tabulka 3. Kategorie ocelí s rozsahem pevnosti v tahu, tažnosti a skupinami ocelí [27] ...	44
Tabulka 4. Přehled zadaných požadavků	57
Tabulka 5. Přehled zadaných požadavků	69
Tabulka 6. Přehled dosažených výsledků prvního návrh.....	69
Tabulka 7. Přehled zadaných požadavků	82
Tabulka 8. Přehled dosažených výsledků optimalizace	82

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I:	Sestava s kusovníkem	01 000 DP K0VI1
--------------	----------------------	-----------------

Příloha P II:	CD disk:	- Výkres sestavy s kusovníkem
		- 3D model sestavy tažného nástroje
		- 3D model zadané součásti
		- Simulace z programu Autoform R8