

Optimalizace tvaru plechového dílu a technologie plošného tváření v software AutoForm

Bc. Alois Hradil

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. Alois Hradil
Osobní číslo:	T23301
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Optimalizace tvaru plechového dílu a technologie plošného tváření v software AutoForm

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii pro dané téma.
- Provést 3D konstrukci modelu plechového dílu.
- Vytvořit simulace procesu plošného tváření v software AutoForm.
- Navrhnout optimalizace procesu hlubokého tažení plechového dílu a vyhodnocení jednotlivých variant.

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

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447479.

HU, Ping, Ning MA a Yi-guo ZHU. Theories, methods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming: analysis, simulation and engineering applications. London: Springer, 2013. ISBN 978-1-4471-4098-6.

WANG, Darren, ed. Handbook of metal forming process. New York: NY research press, 2015. ISBN 978-1-63238-253-5.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

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

L.S.

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 a optimalizací plechových dílů vyráběných technologií hlubokého tažení. Cílem je navrhnout vhodnou geometrii dílů a následně analyzovat proces tváření tak, aby vyhovoval stanoveným požadavkům. Simulace procesu jsou prováděny v software AutoForm, přičemž na základě postupné optimalizace jsou vyhodnocovány jednotlivé varianty. Výsledkem práce je návrh finální úpravy výrobního procesu vedoucí ke zlepšení kvality tvářených dílů a zvýšení efektivity výroby.

Klíčová slova: plošné tváření, tvářitelnost, tvarová simulace, tvarová analýza, AutoForm, diagram mezních deformací, plechová optimalizace, výběr plechu, zkoušky plechů

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the design and optimization of sheet metal parts manufactured using the deep drawing process. The aim is to propose the geometry of a suitable part and subsequently analyze the forming process to ensure compliance with the specified requirements. The process simulations are conducted in AutoForm software, where various design variants are evaluated based on a gradual optimization approach. The outcome of this work is a proposal for the final adjustment of the manufacturing process, leading to improved quality of the formed parts and increased production efficiency.

Keywords: sheet forming, formability, forming simulation, forming analysis, AutoForm, forming limit diagram (FLD), sheet metal optimization, sheet selection, sheet metal testing

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytl při tvorbě této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ.....	15
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY V TECHNOLOGII TVÁŘENÍ.....	15
1.1.1 Napětí a deformace	15
1.1.2 Elastická a plastická deformace	17
1.1.3 Tváritelnost plechů.....	17
1.1.4 Deformační zpevnění	17
1.2 PROCES TVÁŘENÍ KOVŮ	18
1.3 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....	19
1.3.1 Hluboké tažení	20
1.3.2 Stříhání	25
1.3.3 Ohýbání	26
1.3.4 Vysekávání a prorážení	27
1.3.5 Válcování	28
1.3.6 Hydroformování	29
1.4 MAZIVA V PROCESU TVÁŘENÍ KOVŮ.....	31
1.4.1 Metody aplikace maziva	32
2 PŘEHLED TVÁŘITELNÝCH MATERIÁLŮ PLECHŮ	33
2.1 VLIV CHEMICKÝCH PRVKŮ NA TVÁŘITELNOST	33
2.2 ROZDĚLENÍ OCELÍ PODLE PEVNOSTI A TAŽNOSTI	34
2.2.1 Konvenční nízkouhlíkové oceli.....	35
2.2.2 Nerezové oceli.....	35
2.2.3 Vysokopevnostní oceli	37
2.3 OSTATNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI PLOŠNÉM TVÁŘENÍ	37
2.3.1 Hliník a hliníkové slitiny.....	37
2.3.2 Hořčíkové slitiny	38
2.4 VZTAH MEZI PRODLOUŽENÍM A ZMENŠENÍM PRŮŘEZU	39
3 TVÁŘENÍ V SOFTWARE AUTOFORM.....	40
3.1 VÝHODY A KLÍČOVÉ FUNKCE	40
3.2 VÝZNAM A POUŽITÍ	41
3.3 VSTUPNÍ DATA	41
3.4 VÝSTUPNÍ DATA	42
3.4.1 Analýza porušení.....	42
3.4.2 Analýza ztenčení	43
3.4.3 Analýza tváritelnosti	43
4 ZKOUŠKY PLECHŮ	44

4.1	MECHANICKÉ ZKOUŠKY PLECHŮ	44
4.1.1	Zkouška pevnosti v tahu.....	44
4.1.2	Tvrdost a zkoušky tvrdosti	45
4.1.3	Zkouška anizotropie plechů.....	47
4.2	TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY TVÁŘITELNOSTI PLECHŮ	48
4.2.1	Hloubení podle Erichsena	48
4.2.2	Zkouška kalíškovací Schmiedtova	49
4.3	EXPERIMENTÁLNÍ TESTY STANOVENÍ FLD	50
4.3.1	Dvojosé testování	50
4.3.2	Zkouška Nakajima.....	51
4.3.3	Hasek test	51
4.3.4	Hydraulická zkouška vyboulení	52
4.3.5	Zkouška Marciniak.....	52
4.3.6	FLD Diagram	53
4.4	NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY PLECHŮ	56
4.4.1	Ultrazvuková zkouška	56
4.4.2	Magnetická prášková zkouška.....	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	58
6	KONSTRUKCE MODELU PLECHOVÉHO DÍLU	59
7	PŘEDBĚŽNÁ SIMULACE PROCESU PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ V SOFTWARE AUTOFORM – POHLEDOVÁ KAPOTA.....	60
7.1	VOLBA MATERIÁLU	60
7.1.1	Materiál EN AW-6181-T4	61
7.1.2	Materiál EN AW-6016-T4P	61
7.1.3	Materiál EN AW-6111-T4P	61
7.2	DISKUZE PŘEDBĚŽNÝCH VÝSLEDKŮ	62
7.2.1	Předběžné výsledky materiálu EN AW-6181-T4_0,8 mm	63
7.2.2	Předběžné výsledky materiálu EN AW-6016-T4P_0,8 mm	64
7.2.3	Předběžné výsledky materiálu EN AW-6111-T4P_0,8 mm	65
7.2.4	Porovnání předběžných výsledků pohledové kapoty	66
8	OPTIMALIZACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ PLECHOVÉHO DÍLU A VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT – POHLEDOVÁ KAPOTA	67
8.1	NASTAVENÍ SIMULACE	67
8.1.1	Sekce Part	68
8.1.2	Sekce Plan	71
8.1.3	Sekce Die Face	72
8.1.4	Sekce Blank	75
8.1.5	Sekce Process	76
8.1.6	Sekce Simulation	78
8.1.7	Sekce Evaluation	79

8.2	VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT	79
8.2.1	Vyhodnocení tvářitelnosti	80
8.2.2	Vyhodnocení porušení	81
8.2.3	Vyhodnocení ztenčení	82
8.2.4	Vyhodnocení zvlnění	83
8.2.5	Porovnání dosažených výsledků	83
9	PŘEDBĚŽNÁ SIMULACE PROCESU PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ V SOFTWARE AUTOFORM – VÝZTUŽNÁ KAPOTA.....	86
9.1	VOLBA MATERIÁLU	86
9.1.1	Materiál DX56D+Z podle EN 10346, číselné označení 1.0963	87
9.1.2	Materiál DC04 podle EN 10130, číselné označení 1.0338	87
9.1.3	Materiál HCT450X+Z podle EN 10346, obchodní název DP450	87
9.2	DISKUZE PŘEDBĚŽNÝCH VÝSLEDKŮ	88
9.2.1	Předběžné výsledky materiálu DX56D+Z_0,8 mm	89
9.2.2	Předběžné výsledky materiálu DC04_1 mm.....	90
9.2.3	Předběžné výsledky materiálu DP450_0,8 mm	91
9.2.4	Porovnání předběžných výsledků výztužné kapoty	92
10	OPTIMALIZACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ PLECHOVÉHO DÍLU A VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT – VÝZTUŽNÁ KAPOTA.....	93
10.1	NASTAVENÍ SIMULACE _S ₁	93
10.1.1	Sekce Part.....	94
10.1.2	Sekce Plan	95
10.1.3	Sekce Die Face	96
10.1.4	Sekce Blank.....	99
10.1.5	Sekce Process	100
10.1.6	Sekce Simulation.....	101
10.1.7	Sekce Evaluation	101
10.2	VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT	101
10.2.1	Vyhodnocení tvářitelnosti	102
10.2.2	Vyhodnocení porušení	103
10.2.3	Vyhodnocení ztenčení	104
10.2.4	Vyhodnocení zvlnění	105
10.2.5	Porovnání dosažených výsledků	105
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	108
11.1	ANALÝZA VÝSLEDKŮ TVÁŘITELNOSTI OPTIMALIZOVANÉ POHLEDOVÉ KAPOTY	108
11.2	ANALÝZA VÝSLEDKŮ DEFORMACÍ OPTIMALIZOVANÉ POHLEDOVÉ KAPOTY	109
11.3	ANALÝZA VÝSLEDKŮ TVÁŘITELNOSTI OPTIMALIZOVANÉ VÝZTUŽNÉ KAPOTY ...	110
11.4	ANALÝZA VÝSLEDKŮ DEFORMACÍ OPTIMALIZOVANÉ VÝZTUŽNÉ KAPOTY	112
	ZÁVĚR	113
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	115

SEZNAM OBRÁZKŮ	120
SEZNAM TABULEK.....	124
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	125
SEZNAM PŘÍLOH.....	127

ÚVOD

Automobilový průmysl se stále více zaměřuje na inovace a efektivitu výrobních procesů. Optimalizace plošného tváření je klíčová pro dosažení vysoké kvality, snížení výrobních nákladů a dosažení požadovaných mechanických vlastností dílů. Pokročilé simulace pomáhají předcházet vadám, jako jsou trhliny, vrásnění nebo nekonzistentní tloušťka. Mezi nejpoužívanější softwarové nástroje pro návrh a simulaci tvářecích operací patří AutoForm, který poskytuje přesné predikce výsledků plošného tváření.

Tato diplomová práce se zaměřuje na optimalizaci tvaru plechového dílu a technologii plošného tváření v software AutoForm. Teoretická část se nejprve zabývá obecným popisem technologie tváření, následně plošným tvářením s konkrétními metodami, jako je hluboké tažení. Další kapitoly zahrnují přehled tvářitelných materiálů v automobilovém průmyslu a přiblížení možností software AutoForm. Součástí je také popis zkoušek plechů, včetně experimentálních metod pro stanovení diagramu mezních deformací (FLD), který je zásadní pro vyhodnocení dosažených výsledků.

Praktická část zahrnuje návrh geometrie plechového dílu, vytvoření simulací procesu plošného tváření a následnou optimalizaci. V simulacích budou analyzovány a upravovány parametry, jako jsou materiál plechu, tloušťka, působící síly při tváření, maziva a další faktory ovlivňující výslednou kvalitu dílu. Na základě těchto analýz bude provedena optimalizace geometrie a parametrů procesu tak, aby bylo dosaženo požadovaného přetvoření a eliminace defektů.

Vybranými díly pro tváření je sestava vnější pohledové a vnitřní výztužné kapoty automobilu, které jsou pevně spojeny. Cílem práce je optimalizovat tloušťku plechu, zvolit vhodný materiál a dosáhnout co nejlepšího přetvoření. Tato práce propojuje dosud získané teoretické znalosti s praktickou aplikací a umožňuje komplexní analýzu od návrhu dílu přes simulace až po finální optimalizaci procesu tváření.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ

Tváření kovů je proces, při kterém dochází ke změně tvaru, povrchu a vlastností obrobku při zachování hmoty a soudržnosti. Technologie využívá plasticitu kovů k výrobě polotovarů a dílů. Spoléhá se na schopnost materiálu snášet deformace podél krystalických skluzných rovin bez narušení soudržnosti. Tento proces šetří materiál, protože dochází ke vzniku minimálního odpadu a často eliminuje potřebu nákladného dokončování. [1]

1.1 Základní pojmy v technologii tváření

Než bude popsána technologie tváření, je nutné uvést základní pojmy, které jsou důležité pro pochopení jejich principů, vlastností materiálů a jednotlivých procesů.

1.1.1 Napětí a deformace

Napětí σ je definováno jako intenzita síly v bodě, kde F je síla působící na plochu o velikosti A . [2]

$$\sigma = \partial F / \partial A \text{ při } \partial A \rightarrow 0 \quad (1)$$

Pokud je napětí v tělese všude stejné, platí:

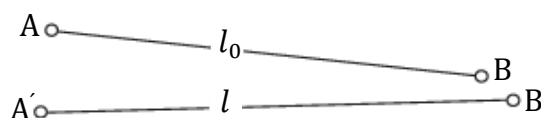
$$\sigma = F / A \quad (2)$$

Napětí obsahuje devět složek. Normálové napětí působí kolmo na rovinu a může být tahové nebo tlakové. Smykové napětí působí rovnoběžně s rovinou. Složky napětí jsou definovány pomocí dvou indexů. První označuje rovinu působící síly, druhý směr síly. [2]

Stav tenzoru napětí druhého řádu v matici je vyjádřen jako:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Deformace popisuje míru změny tvaru v tělese. Když je těleso deformováno, body v tělese se posouvají. Aby byla deformace přesně popsána, je nutné eliminovat vlivy rotace a translace, což zajistí správnou definici změny tvaru. [2]



Obrázek 1 Deformace, translace a rotace linie v materiálu [2]

Deformace může být vyjádřena technickou neboli nominální deformací, označenou jako e :

$$e = (l - l_0)/l_0 \quad (4)$$

Alternativní definicí je pravá neboli logaritmická deformace, označená jako ε :

$$d\varepsilon = dl/l \quad (5)$$

Kde po integraci platí následující vyjádření:

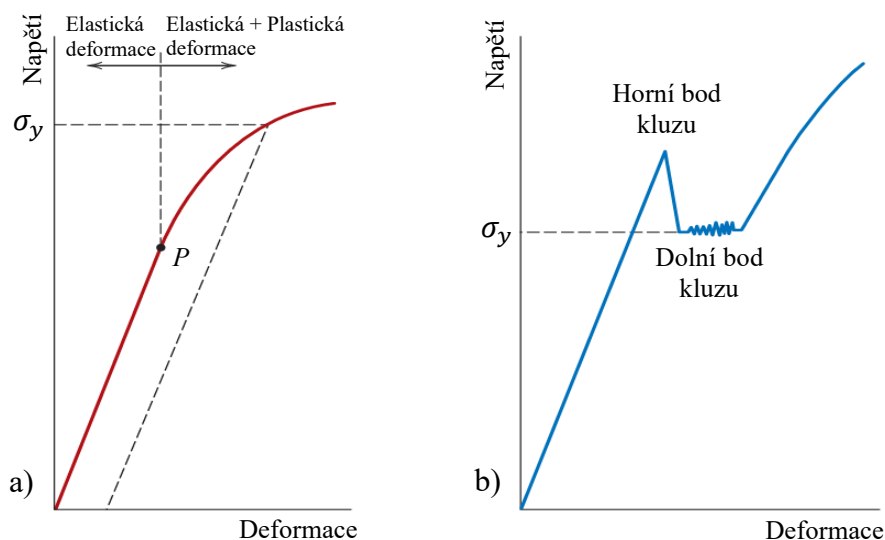
$$\varepsilon = \ln(l/l_0) = \ln(1 + e) \quad (6)$$

Pro malé deformace $e \rightarrow 0$ se definice téměř shodují, ale pro velké deformace je pravá neboli logaritmická deformace přesnější, jelikož zohledňuje nepřetržitou změnu délky. [2]

Chování mezi napětím a deformací popisuje tahový diagram. Na levém obrázku níže je elastická oblast s lineárním vztahem mezi napětím a deformací podle Hookova zákona. Po odstranění zatížení se materiál v elastické oblasti vrací do původního tvaru. [3]

Přechod mezi elastickou a plastickou deformací je vymezen proporcionální mezí P . Ta označuje bod, kde končí lineární chování a začíná plastická deformace, tedy trvalá změna tvaru. Mez kluzu σ_y je určena jako $\varepsilon = 0,002$, což odpovídá 0,2 % trvalé deformace. [3]

U určitých druhů ocelí (typicky nízkouhlíkových) se v tahovém diagramu objevuje jev kluzu (obrázek vpravo), který zahrnuje horní bod kluzu, což je maximální napětí potřebné k zahájení plastické deformace. Následuje dolní bod kluzu, který definuje stabilní fázi plastické deformace při relativně konstantním napětí. [3]



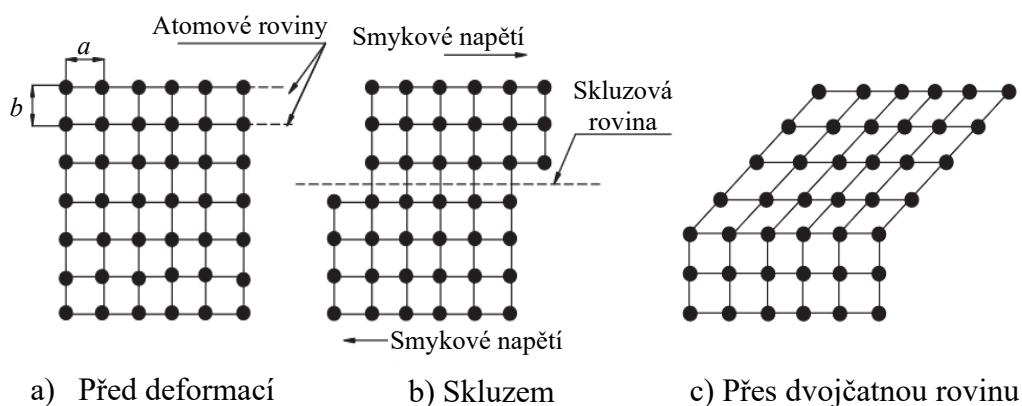
Obrázek 2 Tahové diagramy dvou případů napětí-deformace [3]

1.1.2 Elastická a plastická deformace

Elektrony v kovové vazbě umožňují elastickou deformaci, při níž se atomy pod vlivem vnější síly posunou, ale po jejím odstranění se vrátí do původní polohy. Pokud však síla překročí určitou mez, dochází k plastické deformaci s trvalým posunem atomů. U plastické deformace kovů se rozlišují dva mechanismy, a to skluz a dvojčatění. [2; 4]

Skluz nastává při paralelním pohybu krystalů podél skluzové roviny. Pohyb způsobí vzájemné posunutí obou skupin, které jsou vysunuty o délku jednoho nebo více krystalů. Tento jev se nazývá smykové napětí. [4]

Dvojčatění je pohyb atomů vzhledem ke dvojčatné rovině. Obvykle nastává, pokud je plastická deformace způsobena úderem, zatímco u skluzu se vyskytuje častěji v případě působení statického zatížení. U elastických deformací se mění pouze vzdálenosti mezi atomy, zatímco u plastických i jejich polohy. [4]



Obrázek 3 Mechanismy plastické deformace [4]

1.1.3 Tvářitelnost plechů

Pojem tvářitelnost plechů označuje schopnost plechového materiálu podrobit se plastické deformaci a dosáhnout tak požadovaného tvaru bez vzniku vad. Tato vlastnost je klíčová v procesech plošného tváření. Vzniklé vady je nutné rozlišovat a samostatně posuzovat u základních procesů tváření plechů, jako je hluboké tažení a tažení s roztažením. [4]

1.1.4 Deformační zpevnění

Deformační zpevnění je proces, při kterém materiál získává vyšší pevnost vlivem plastické deformace. Tento jev je způsoben tvorbou krystalových defektů, zejména dislokací, které se během deformace hromadí. Zpevnění dosahuje saturace, když se rychlost tvorby a anihilace těchto defektů vyrovná. Další plastická deformace již nezvyšuje pevnost,

ale může naopak vést k poškození materiálu. Rovnice deformačního zpevnění popisuje vztah mezi napětím a deformací, je vyjádřena jako:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (7)$$

kde koeficient K je mez pevnosti a n je exponent deformačního zpevnění, který určuje, jak rychle roste napětí s rostoucí deformací. Čím vyšší hodnota n , tím větší je schopnost deformačního zpevnění. [5; 6]

1.2 Proces tváření kovů

Tváření je efektivní výrobní proces, který přetváří materiál z jednoho geometrického tvaru na jiný a vytváří požadované geometrie a tvary deformovaných dílů s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Základní klasifikace vychází ze způsobu tváření:

- a) Objemové tváření – kování, protlačování, válcování apod.
- b) Plošné tváření – ohýbání, hluboké tažení apod.
- c) Kombinované – jako je např. kombinace tažení a kalibrace, ohýbání a ražení. [7]

V průmyslovém odvětví lze tuto technologii klasifikovat podle tvářecí teploty:

- a) Tváření za studena, které probíhá pod teplotou krystalizace.
- b) Tváření za tepla, které probíhá nad teplotou rekystalizace. [7]

Teplota má výrazný vliv na kovové materiály, jelikož se většina materiálů při změně teploty chová odlišně. Při tváření za studena se mez kluzu obvykle zvyšuje s rostoucí plastickou deformací. Při tváření za tepla se mez kluzu zvyšuje s rostoucí rychlostí deformace. Pro lepší pochopení tvářecích procesů a jejich klasifikace je vhodné tváření rozdělit podle vstupních a výstupních geometrických parametrů, materiálů a výrobních podmínek. [7; 8]

Složitou geometrii lze vytvořit u objemových i plošných tvářecích procesů stejně dobře tvářením za tepla i za studena. Vzhledem k nižší mezi kluzu deformovaného materiálu při vyšších teplotách jsou relativně menší zatížení nástrojů a strojů u tváření za tepla. Přesnost je obvykle vyšší u dílů tvarovaných za studena. [7; 8]

Navrhování, analýza a optimalizace tvářecích procesů vyžadují znalosti o toku kovů, napětí a přenosu tepla. Klíčové jsou technologické znalosti týkající se mazání, návrhu forem, manipulace s materiálem, ohřevu a chlazení, návrhu a výroby tvářecího zařízení. [7; 8]

1.3 Plošné tváření

Při technologii plošného tváření je jednouchý polotovár (například plech) plasticky deformován mezi nástroji nebo matricemi tak, aby získal požadovaný konečný tvar. Nástroje vyvíjejí tlak na deformovaný materiál prostřednictvím jejich vzájemného kontaktu. Procesy plošného tváření obvykle produkují minimum odpadu a fungují velmi efektivně. [9]

Lisování plechů za studena

Charakteristiky procesu lisování plechů za studena ve srovnání s jinými zpracovatelskými metodami:

- Možnost výroby složitých tvarů, například části skořepin, které je obtížné vyrobit jinými metodami strojního zpracování.
- Výsledná rozměrová přesnost je určena formami, což je výhodné z hlediska rozměrové stability a dobré zaměnitelnosti výrobků.
- Jednoduchá obsluha a nízká náročnost umožňují mechanizaci, automatizaci a vysokou produktivitu.
- Nízké náklady díky efektivnímu využití materiálu, lehkým a odolným obrobkům a nízké spotřebě energie.
- Složitá struktura formy s dlouhým výrobním cyklem a vysokými náklady. Proto se lisování využívá hlavně pro hromadnou výrobu. Pro kusovou a malosériovou výrobu je lisování nevýhodné a omezené. V případě kusové a malosériové výroby se čím dál více vyvíjí jednoduché a kombinované formy na bázi zinkových slitin, které nabízí využití právě pro tyto případy. [9]

Pro splnění tvarových, rozměrových, kvalitativních a množstevních požadavků existuje mnoho typů lisovacích procesů. Pro vytvoření dílu je obvykle potřebný vícestupňový lisovací proces. Zpracování plechů lze rozdělit z hlediska dvou základních procesů:

Oddělovací proces – plech se odděluje předdefinovaným obrysem za účelem získání výlisku s určitým tvarem, velikostí a kvalitou povrchu. Tento proces zahrnuje metody, jako je děrování, prorážení, vysekávání a dělení. [9]

Tvarovací proces – působení plastické deformace za účelem tvarování plechu bez jeho oddělení. Mezi metody tvarování patří ohýbání, hluboké tažení, válcování a lemování. [9]

1.3.1 Hluboké tažení

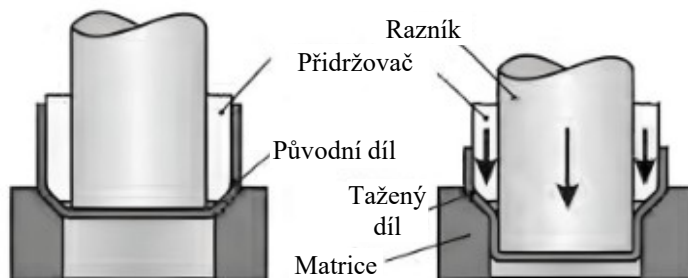
Při hlubokém tažení znázorněném na obrázku a) je plech (za tepla nebo za studena), protlačován razníkem do matrice, aby vznikl hluboký dutý díl s rovnoměrnou tloušťkou stěny odpovídající původní tloušťce plechu. Plech je obvykle přidržován obvodovým tlakem, který je přesně kontrolován. [7; 10]

Prvotním polotovarem bývá zpravidla rovný plech. Při velké změně tvaru při hlubokém tažení je nutné provést více operací, aby byl díl dokončen. V takovém případě je využíván vícenásobný nástroj. Druhá fáze a případné další kroky se nazývají přetahování (b). [7]

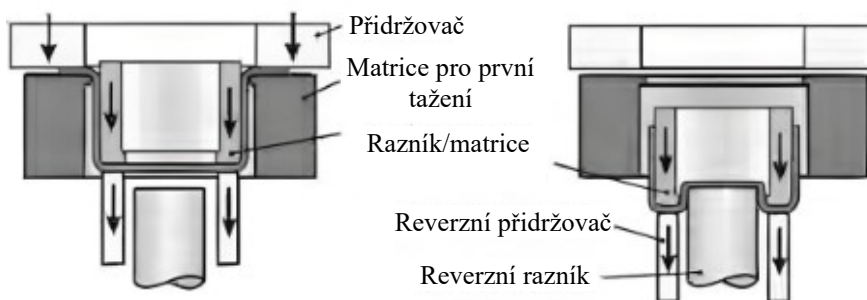
Další související operací je reverzní tažení (c). Při tomto procesu je původně vytvarovaný díl otočen lícem dolů na matrici, čímž druhá tažná operace vytvoří opačně tvarovaný díl. [7]



a) Jednoduché tažení s přidržovačem



b) Přetahování



c) Reverzní tažení

Obrázek 4 Typy procesu hlubokého tažení [7]

Používané zařízení: hydraulické lisy, mechanické lisy, transferové lisy.

Materiály: uhlíkové a legované oceli, hliníkové slitiny, titanové slitiny, vysokopevnostní slitiny.

Variace procesů: hluboké tažení s vícečinným razníkem, tažení s tuhým obrysovým razníkem, gumové tváření s nebo bez upínacího kroužku (Marform proces), tažení proti kapalině (Aquadraw proces), výbušné tváření a hydroforming.

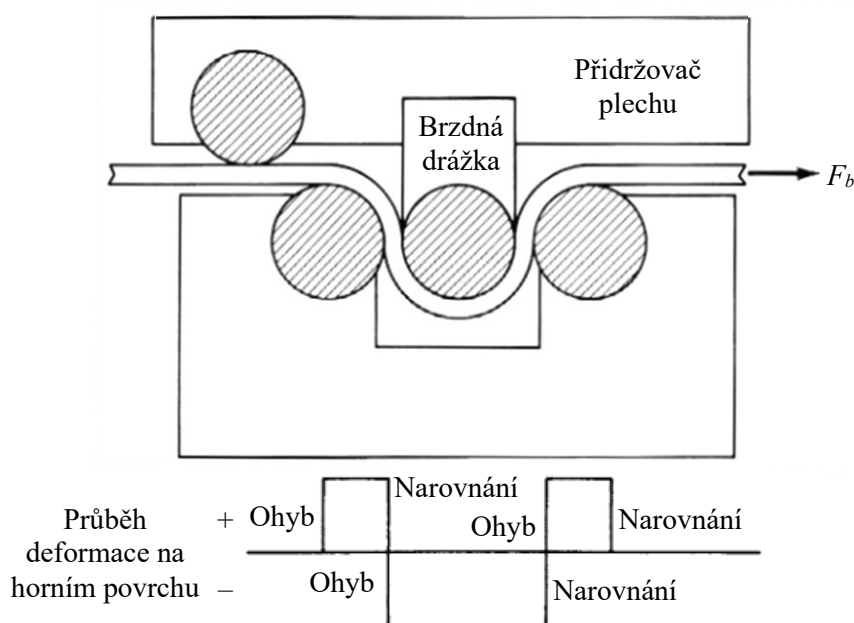
Aplikace: výroba hlubokých a mělkých pohárů, nábojnic, obalů na nápoje, dřezů a chladicích nádob. Tažení nepravidelných zakřivených tvarů, například karosářských panelů automobilů. [7; 11]

Brzdné drážky

Brzdné drážky slouží k vytvoření napětí v plechu během procesu tváření a zabraňují nadměrnému tažení. Během průchodu dochází ke třem ohybům a třem narovnáním, což vyžaduje plastickou deformaci. V každém rádiu působí tření, které přispívá k celkové odporové síle. Tato síla je regulována výškou drážky a vzniká v důsledku ohýbání a tření při tažení plechu přes drážku. Velikost brzdné síly F_b lze vypočítat podle vztahu:

$$F_b = 6 \cdot \frac{dW}{dL} \quad (8)$$

kde W představuje vykonanou práci a L délku pracovního úseku.



Obrázek 5 Schéma brzdné drážky [2]

Vlastnosti ovlivňující konečný tvar produktu vytvořeného hlubokým tažením:

- Vlastnosti materiálu plechu – zahrnují normální anizotropii, plastický deformační poměr r a koeficient deformačního zpevnění n .
- Rozměry nástrojů – nevhodný návrh nástrojů, například razníku a matrice, může vést k tvarovým odchylkám nebo poruchám produktu. Tyto odchylky jsou způsobeny vlivem elastického zpětného pružení po tváření a uvolnění nástrojů.
- Přidržovací síla plechu – reguluje tok materiálu pomocí přidržovací desky, která vytváří tlak. Nedostatečný tlak vede ke vzniku vrásnění na přírubě, jenž se může rozšířit na stěny taženého dílu. Naopak nadměrný tlak a tření mohou způsobit ztenčení stěny nebo praskliny v oblasti příruby, dna či rohů. Doporučuje se nastavit přidržovací tlak na přibližně třetinu maximální síly razníku.
- Tření – ovlivňuje výsledné deformační vzory a závisí na faktorech, jako jsou použité mazivo, povlaky na plechu, drsnost nástrojů, přidržovací síla a rychlost procesu. [12]

Typy lisů pro hluboké tažení

Při výrobě hluboce tažených dílů se běžně používají mechanické lisy a elektro-hydraulické lisy. Lisy se dělí na jednočinné nebo dvojčinné. U jednočinného lisu pohonný mechanismus ovládá pouze hlavní razník, zatímco u dvojčinného lisu mechanismus ovládá i vnější přidržovací prstence, které svírají plech předtím, než razník vtlačí plech do matrice. [13]

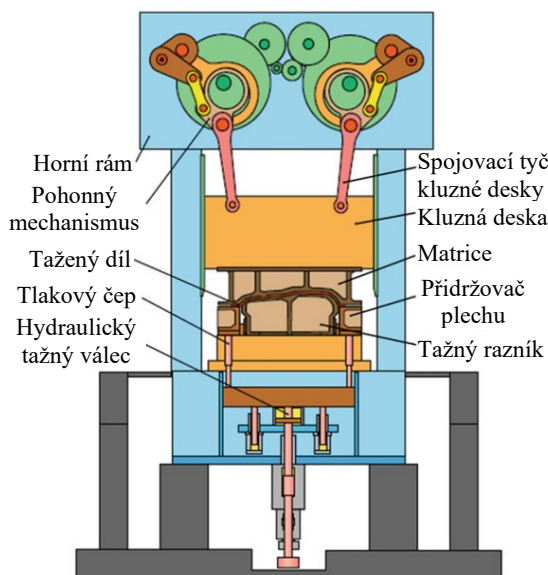
Typická lisovací linka se v provozu skládá z několika lisů v řadě, z nichž každý provádí jednu či více operací na dílu, přičemž automatizace zajišťuje postupný pohyb dílu podél linky. Při procesu tažení musí být razník poháněn mechanismem, který tlačí polotovár do matrice. Dvě hlavní charakteristiky, které ovlivňují proces tváření jsou:

- Lisovací síla – maximální síla, kterou lis působí na plech.
- Průběh lisování – variace rychlosti razníku během tvářecího procesu.

Rychlost lisu, vyjádřena v počtu zdvihů za minutu, určuje jeho produkční kapacitu. Výška uzavření lisu, což je svislá vzdálenost mezi razníkem a plechem v okamžiku nárazu, stanovuje maximální velikost matrice vhodnou pro požadovanou hloubku tažení. [13]

Mechanické lisy

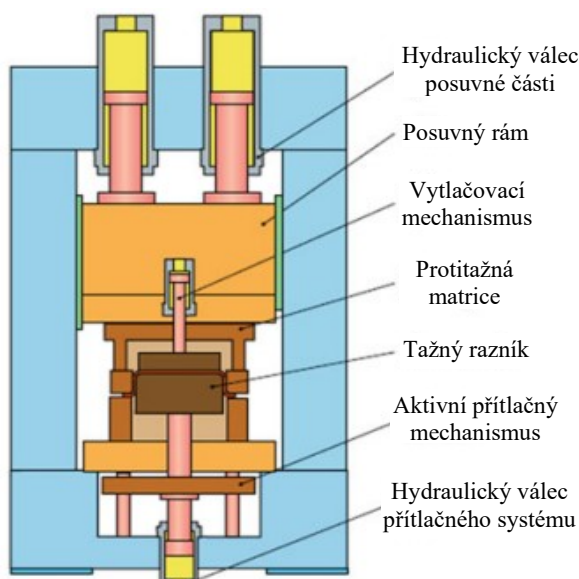
Tyto lisy využívají mechanický pohon napájený elektrickým motorem, který pohání razník. Mechanismus spojky slouží k zapojení či odpojení pohonu, zatímco brzdňý systém zajišťuje zastavení pohybu. Průběh lisování je řízen kinematikou pohonu. [13]



Obrázek 6 Schéma mechanického lisu [13]

Hydraulické lisy

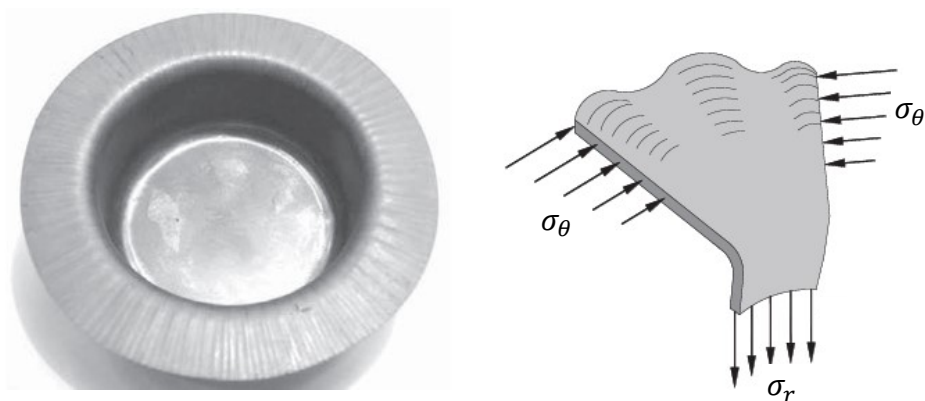
K pohonu razníku se využívají hydraulické válce. Řízení průtoku tlakové hydraulické kapaliny do válců během zdvihu zajišťují servoventily nebo proporcionální ventily. Rychlost razníku je konstantní až do okamžiku, kdy se razník přibližuje ke konci zdvihu a zpomaluje. Moderní lisy již umožňují operátorům programovat požadované průběhy lisování, což zlepšuje kontrolu tvářecího procesu. [13]



Obrázek 7 Schéma hydraulického lisu [13]

Vady hlubokého tažení

Typickou vadou při hlubokém tažení je **vrásnění** a spolu s **praskáním dna** určuje pracovní rozsah procesu. Vrásnění v přírubě je způsobeno tlakovým obvodovým napětím σ_θ , které vzniká při tažení příruby do menšího poloměru, což vede k boulení. Radiální napětí σ_r působí od středu příruby podél jejího poloměru. Tendence ke vzniku vrásnění se zvyšuje s nárůstem nepodepřených ploch plechu, snížením tloušťky a její nerovnoměrností. Vrásnění může být rovněž způsobeno nerovnoměrně rozptýlenými mazivy mezi povrchem plechu a matricí. K potlačení vrásnění slouží přidržovač. Obrázek níže znázorňuje tažený pohárek s vrásněním na přírubě se schématickým znázorněním obvodového napětí. [14]



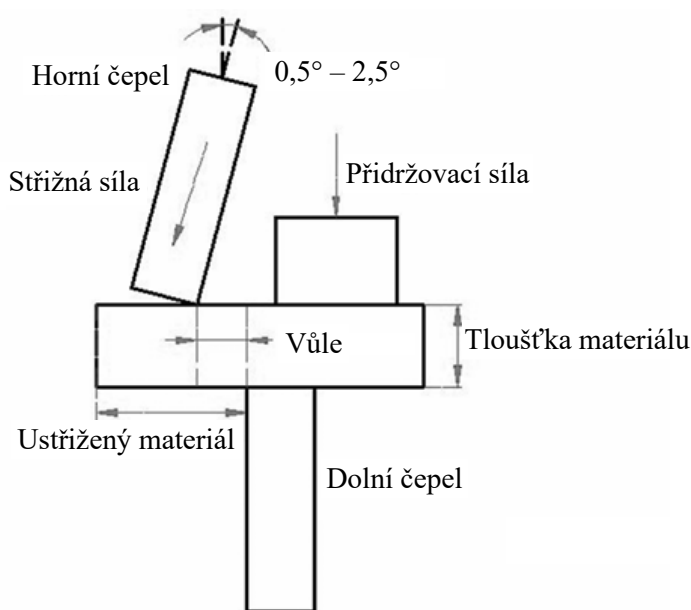
Obrázek 8 Vrásnění při hlubokém tažení [14]

Pružný návrat (springback) je elastická deformace způsobující odchylku konečného tvaru dílu po odstranění zatížení. V závislosti na směru deformace může být kladný či záporný. Kompenzace pružného návratu zahrnuje úpravy modelu tažení pomocí rozdílu mezi ořezanou hranou a původním modelem. Při tvarování lemu se pružný návrat koriguje s ohledem na boční děrování a nevratnou deformaci po ořezávání. Vhodně tvarovaný díl musí splňovat tři hlavní požadavky: mezní podmínky tváření (bez vzniku trhlin), kontrolovanou míru ztenčení materiálu a minimalizovaný pružný návrat odpovídající výrobním specifikacím. [15]

Dalšími vadami při hlubokém tažení jsou **prasknutí stěny výlisku** v důsledku nevhodné vůle mezi nástroji nebo přílišného tření, **poškrábání povrchu** způsobené nečistotami či poškozenými nástroji a **odchylky tvaru** vlivem nesprávně zvolených poloměrů zaoblení razníku a matrice. Příliš malý poloměr zvyšuje riziko prasknutí, zatímco příliš velký vede k nestabilní deformaci. Ke vzniku těchto vad lze předejít optimalizací konstrukce nástroje a procesních parametrů. [16]

1.3.2 Stříhání

Tato technologie slouží k dělení plochých materiálů, například plechů a desek. Nástroji pro stříhání jsou zpravidla různé typy nožů, střížníků a čepelí, které jsou součástí buďto víceúčelových ručních zařízení, nebo strojů, které jsou poháněny mechanickým, hydraulickým nebo pneumatickým pohonem. Při klasickém stříhání se pevně uchycený materiál odděluje pohybem horní čepel vůči pevné dolní čepeli. Horní čepel je obvykle nakloněna v úhlu $0,5^\circ - 2,5^\circ$, což snižuje okamžitou střížnou sílu. [17; 16]

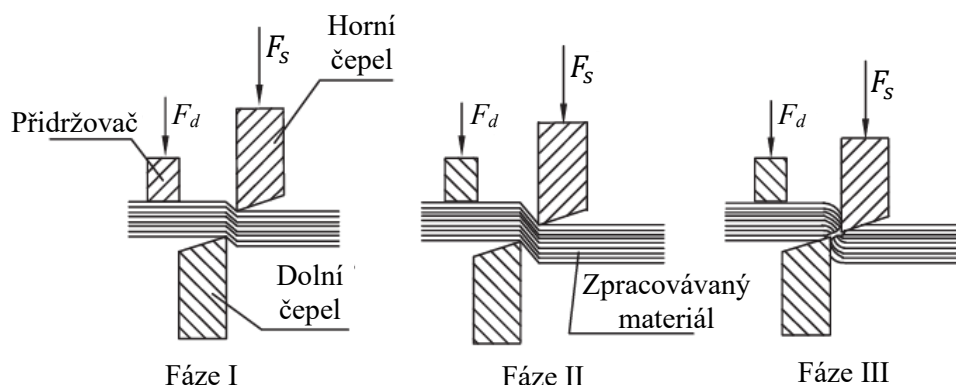


Obrázek 9 Schéma procesu stříhání materiálu [17]

Během procesu stříhání lze rozlišit tři fáze:

1. Fáze – působením střížné síly F_s je napětí v materiálu nižší než mez kluzu ($\tau < \tau_e$). Tato fáze odpovídá elastické deformaci. Stříhaný materiál je přidržován silou F_d .
2. Fáze – napětí v materiálu překračuje mez kluzu, ale je nižší než mez pevnosti, což odpovídá plastické deformaci ($\tau_e < \tau < \tau_m$).
3. Fáze – napětí v materiálu je rovno smykovému napětí ($\tau = \tau_m$). Materiál se začne oddělovat v místě prvních trhlin nebo dojde k lomu podél střížné hrany.

Hloubka proniknutí horní čepel do materiálu závisí na tažnosti a tloušťce zpracovávaného materiálu. U materiálu s větší tloušťkou a křehkostí se trhliny objevují dříve, což urychluje oddělení materiálu. Střížná hrana je hladká v místě stříhu s výrazně hrubší texturou podél roztržené části. [16]

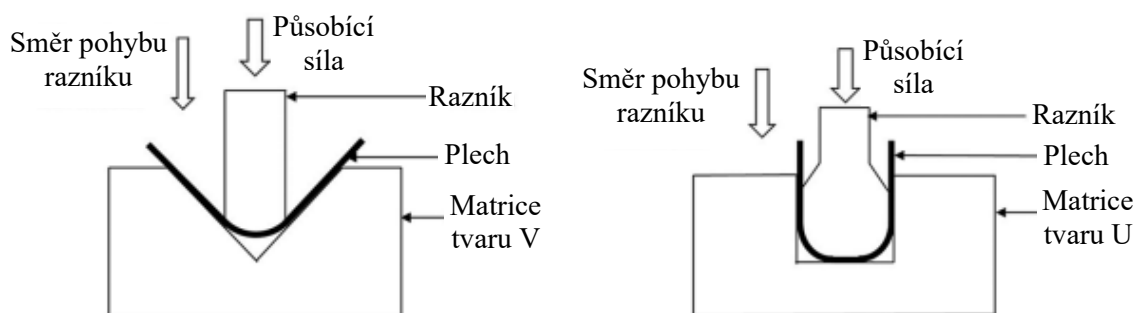


Obrázek 10 Schéma fází procesu stříhání materiálu [16]

1.3.3 Ohýbání

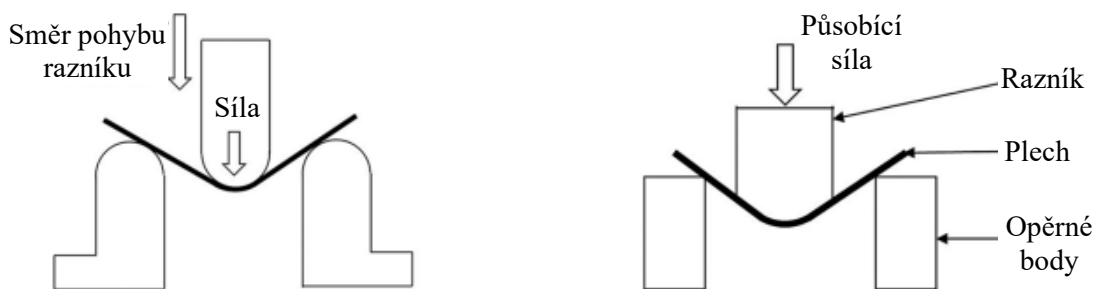
Technologie ohýbání má v průmyslu tváření plechů široké uplatnění. Rozložení napětí přes tloušťku je typické pro procesy, kde převažuje ohýbání. Při ohýbání je vnitřní poloměr plechu vystaven tlaku (komprese), zatímco vnější poloměr je vystaven tahu (prodloužení). Tvárnost při ohýbání se odlišuje od uniaxiálního a biaxiálního tahu a hranici ohýbání nelze určit ze standardního diagramu tváritelnosti (FLD). V zásadě nedochází ke změně tloušťky (výjimky budou zmíněny níže), a tudíž také nedochází k lokálnímu zúžení (necking). Ohýbání je operace, která umožňuje značnou deformaci bez selhání materiálu. [18; 19]

Ohýbání se nejčastěji využívá k vytvoření U nebo V profilů. Plech se ohýbá proti matici požadovaného tvaru pomocí razníku, dokud není dosažen požadovaný úhel ohybu. [19]



Obrázek 11 Schéma ohybu plechu V a U s použitím matrice [19]

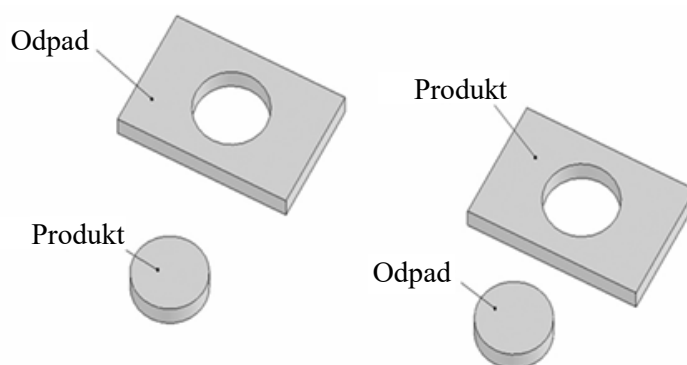
Tříbodový ohyb je alternativní metoda, kde plech není přitlačen k matici. Tato metoda nevyžaduje úpravy nástrojů pro dosažení požadovaného úhlu ohybu. Přesnost tříbodového ohybu je nižší ve srovnání s ohýbáním pomocí matrice. [19]



Obrázek 12 Schéma tříbodového ohybu plechu V a U [19]

1.3.4 Vysekávání a prorážení

Tyto procesy se využívají při stříhání kovových materiálů do přesných tvarů pomocí razníků a matric, které tvoří základní části nástroje. Při vysekávání se odstraněná část materiálu stává výsledným produktem a zbytek představuje odpad. Při prorážení je vystříhnutá část odpadem a zbývající materiál slouží k dalšímu zpracování. Vysekávání a prorážení se využívá téměř ve všech operacích tváření plechů. [17; 16]

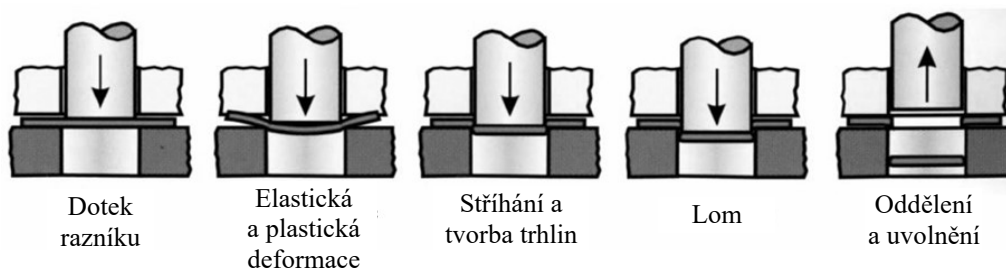


Obrázek 13 Rozdíl mezi vysekáváním (vlevo) a prorážením (vpravo) [17]

Proces vysekávání a prorážení lze znázornit jako sérií fází, při kterých plech prochází deformací a oddělením.

- Kontakt razníku – razník nejprve narazí na pevně uchycený plech, přičemž vzniká tlakové napětí, které se šíří materiálem jako rázová vlna.
- Deformace materiálu – při pronikání razníku do plechu dochází nejprve k elastické deformaci, na kterou navazuje deformace plastická.
- Stříhání a tvorba trhlin – dostatečně velké napětí způsobí stříhání, po kterém následuje zlomení.

- Během lomu se v nástroji ukládají tlakové síly. Při úplném lomu nastane okamžité uvolnění těchto sil, což způsobuje náraz, který může způsobovat prasknutí razníku.
- Razník se pohybuje k dolní úvrati a vytlačuje díl. V dolní úvrati se směr obrací a oddělovač uvolní hotový díl nebo odstraní odpad z razníku. [17]

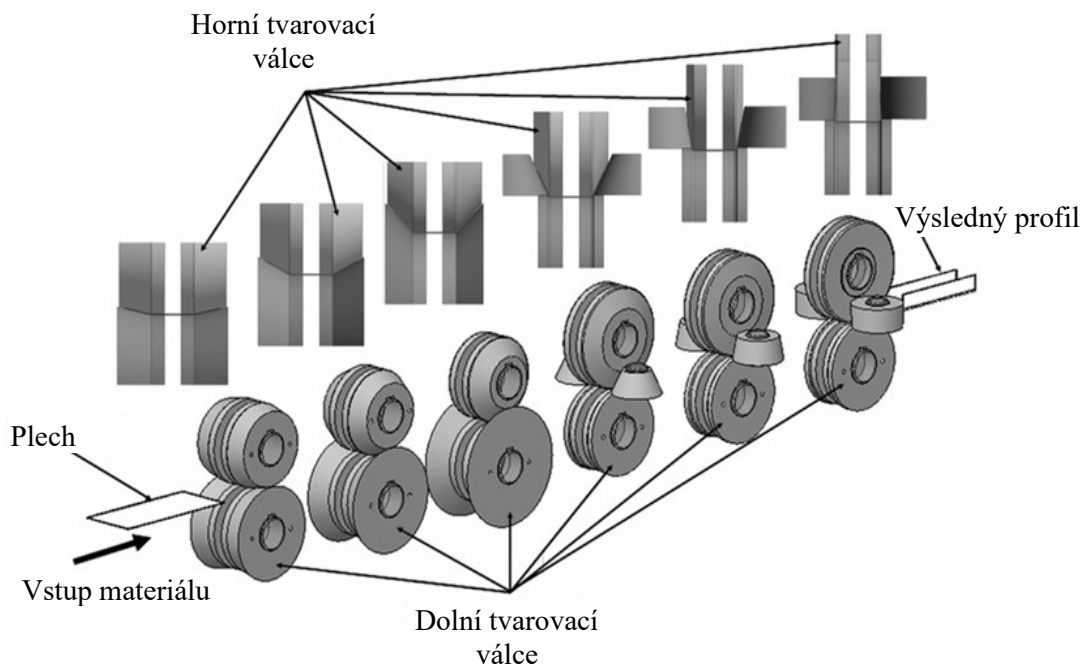


Obrázek 14 Fáze procesu vysekávání a prorážení [17]

1.3.5 Válcování

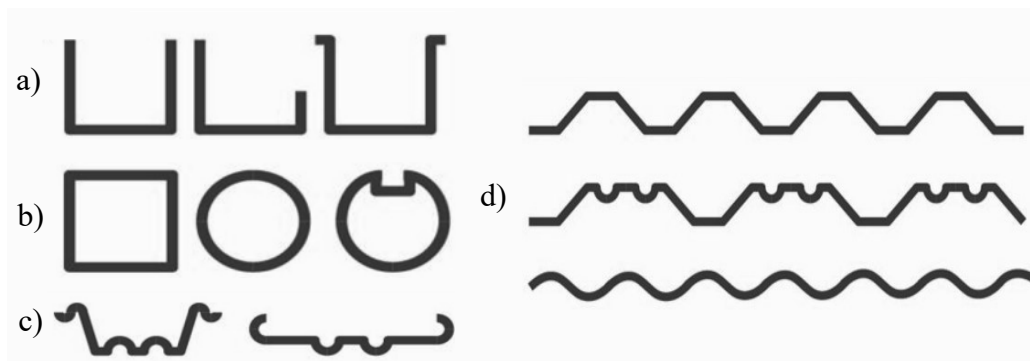
Válcování za studena je proces, při kterém se plochý pás nebo plech s konstantní tloušťkou postupně tvaruje ohýbáním do stran bez změny tloušťky. Výsledkem je výrobek s požadovaným profilem, vytvořený průchodem pásu skrze sérii rotujících válců uspořádaných v tandemu. [17]

Elastický průhyb válců při zatížení způsobuje nerovnoměrnou tloušťku válcovaného plechu. Při elastickém prohnutí válců plech uprostřed zesílí. Sudovitě tvarované válce kompenzují průhyb a zajišťují rovnoměrnou tloušťku plechu při zatížení. [14]



Obrázek 15 Průběh procesu válcování [17]

Válcování za studena umožňuje ekonomickou výrobu široké škály standardních produktů. Tyto produkty se dělí do čtyř hlavních skupin: otevřené profily (a), uzavřené profily (b), široké pásy (c) a úzké pásy (d). [17]



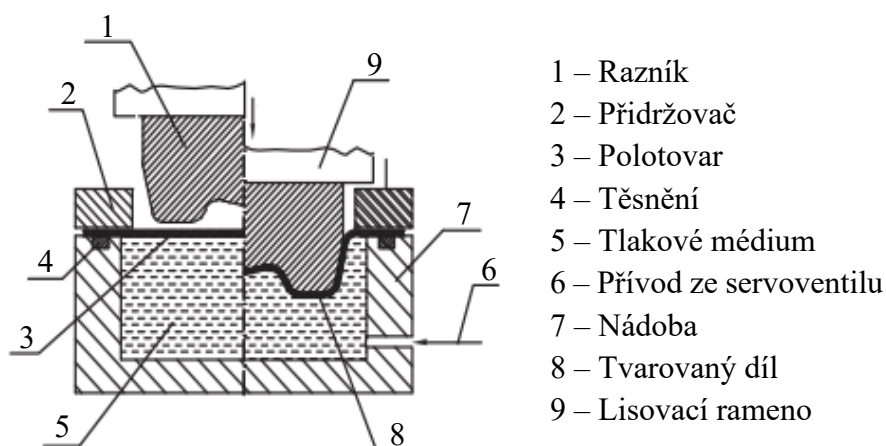
Obrázek 16 Skupiny standardních válcovaných produktů [17]

1.3.6 Hydroformování

Hydroformování je proces tváření kovového polotovaru pomocí tlaku kapaliny. Rozdělujeme se na hydroformování plechů a trubek. Pro výrobu lehkých, energeticky absorbujících a cenově efektivních strukturálních automobilových komponentů je často považováno za nejvhodnější metodu. Proces hydroformování může být:

- Řízen silou (kombinace axiálních sil a vnitřního tlaku).
- Řízen zdvihem (zdvih se přizpůsobuje vnitřnímu tlaku). [20]

Princip **hydroformování plechů pomocí razníku** je znázorněn na obrázku níže. Držák plechu je vybaven těsnícím mechanismem, ve kterém je udržováno tlakové médium (obvykle emulze nebo oleje). Regulace tlaku během procesu je zajišťována prostřednictvím hydraulického servoventilu. Polotovar je tvarován kontrolovaným tlakem vytvořeným pohybem razníku, který jej přitlačuje k držáku plechu. [16]



Obrázek 17 Hydroformování plechu pomocí razníku [16]

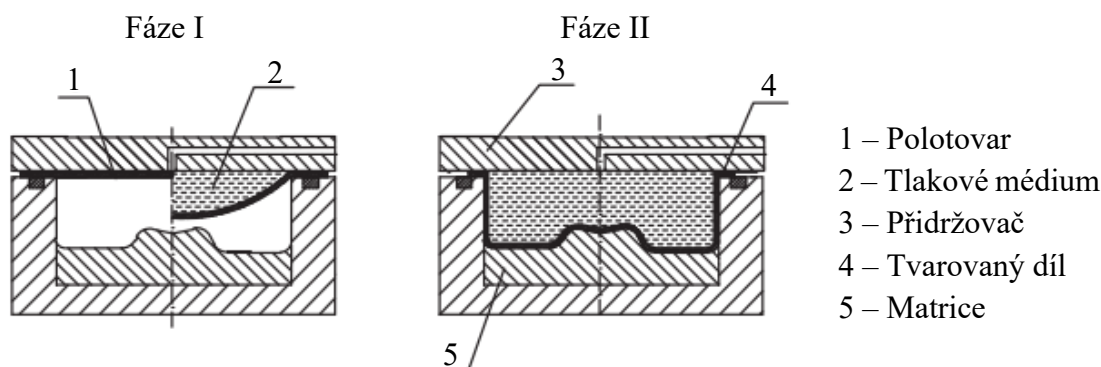
Druhý typ, **hydroformování plechů s použitím matrice**, se skládá ze dvou hlavních fází.

- Fáze I – volné vyklenování.

Plech se volně deformuje do dutiny matrice za působení hydrostatického tlaku. Tento proces zajišťuje rovnoměrné tvarování plechu a minimalizuje riziko vzniku trhlin, dokud nedojde ke kontaktu s povrchem matrice. [16]

- Fáze II – kalibrace.

Tvarovaný díl je přesně kalibrován podle dutiny matrice. Tento krok vyžaduje aplikaci vysokého tlaku kapaliny za účelem dosažení finálního tvaru. [16]



Obrázek 18 Hydroformování plechu pomocí matrice [16]

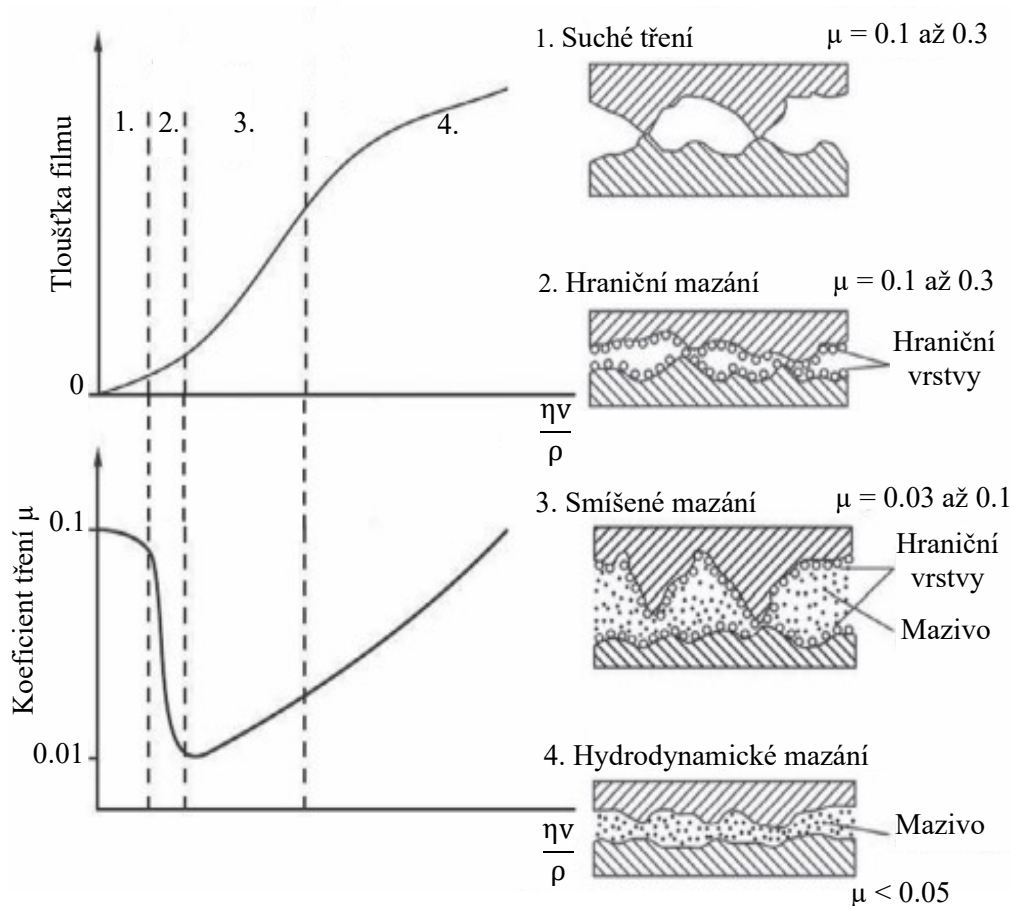
Výhody hydroformování plechů oproti konvenčnímu hlubokému tažení:

- Lze zvýšit poměr hlubokého tažení.
- Snižují se náklady na nástroje.
- Minimální ztenčení materiálu, obvykle méně než 10 %.
- Větší univerzálnost při tvarování složitých tvarů a kontur.
- Vnější povrch výrobku je bez defektů.
- Vyžaduje se méně operací.

Pracovní tlak média v procesu hydroformování se pohybuje v rozmezí 5 až 100 MPa a je upraven podle geometrie a materiálu výrobku. [16]

1.4 Maziva v procesu tváření kovů

Stribeckova křivka, znázorněna na obrázku níže, popisuje závislost mechanismů mazání na viskozitě maziva η , rychlosti posuvu v a normálovém tlaku p . U každého druhu mazání je uveden koeficient tření μ . [21]



Obrázek 19 Mechanismy mazání včetně Stribeckovy křivky [21]

Při výběru vhodného maziva je nutné zohlednit klíčové parametry, jako jsou techniky aplikace, složení přísad, opatření proti korozi, čistota, metody odstranění maziva, kompatibilita s dříve použitými mazivy a oleji, vliv na následné operace a environmentální bezpečnost včetně recyklovatelnosti. [21]

- Oleje – maziva na bázi ropy, která se běžně používají v méně náročných procesech tváření plechů. Do této skupiny patří parafinické a naftenické oleje.
- Rozpustné oleje – obsahují emulgátory, které umožňují ředění vodou, a jsou často označovány jako předem připravené emulze.

- Polosyntetická maziva – maziva mají lepší mísitelnost s vodou než rozpustné oleje, což je dáno nižším obsahem minerálních olejů, který obvykle tvoří méně než 30 % jejich celkového objemu.
- Syntetická maziva – jsou rozděleny jako maziva na bázi uhlovodíků a na vodní bázi. Tato maziva často vykazují mléčný nebo zakalený vzhled.
- Rozpustná a suchá maziva – se aplikují například při válcování plechu, protože dobře přilnou k povrchu plechu a poskytují adekvátní ochranu proti korozi. Suchá maziva nabízejí vynikající mazací vlastnosti a vyšší kompatibilitu, což je činí velmi výhodnými při procesech tváření plechů. Mezi jejich nevýhody patří vyšší cena, složitější aplikace a ekologická omezení. [21]

1.4.1 Metody aplikace maziva

Pro zajištění optimální účinnosti mazání, minimalizaci spotřeby maziva a omezení environmetálních rizik je nezbytné, aby bylo mazivo aplikováno s maximální přesností a pečlivostí. Mezi hlavní techniky aplikace maziva patří:

- Metoda kapání – jednoduchý a nákladově efektivní způsob nanášení maziva na povrch plechového polotovaru. Nevýhodou této metody je obtížné řízení přesného množství aplikovaného maziva.
- Nanášení válečky – mazivo je nanášeno na pohybující se polotovar, který prochází mezi dvěma válci pracujícími pod kontrolovaným tlakem. Tato metoda umožňuje přesnou regulaci množství aplikovaného maziva.
- Elektrodepozice – je vhodná zejména pro aplikace s vysokými výrobními rychlostmi, jelikož minimalizuje spotřebu maziva. Vyžaduje však značné investice do zařízení. Mazivo se nanáší na povrch pomocí elektrického náboje.
- Bezkontaktní stříkání – přestože tato metoda umožňuje velkou přesnost nanášení a nízkou spotřebu maziva, nemusí být vhodná pro maziva s vysokou viskozitou.
- Ruční aplikátory – některé menší lisovny stále využívají své materiály (houby, hadry apod.) z důvodu nákladově efektivní techniky, která však často vede k nadměrnému plýtvání, nedostatečné kontrole distribuce maziva a neuspořádanému pracovnímu prostředí. [21]

2 PŘEHLED TVÁŘITELNÝCH MATERIÁLŮ PLECHŮ

Mezi nejběžnější materiály pro tváření plechů patří různé druhy ocelí včetně nerezových, hliník a jeho slitiny a slitiny hořčíku. [10]

2.1 Vliv chemických prvků na tvářitelnost

Mangan

Zvyšuje pevnost a tvrdost plechů, avšak na úkor houževnatosti. U nízkouhlíkových ocelí je mangan nezbytný, jelikož váže síru na dobře tvářitelné sulfidy manganu. Doporučený obsah manganu je maximálně 0,4 %. [22]

Křemík

V uklidněných ocelích je běžnou součástí, zatímco v neuklidněných se objevuje pouze ve stopovém množství. Křemík zpevňuje materiál, ale zároveň zhoršuje jeho plasticitu. Obsah tohoto prvku by neměl překročit 0,03 %. [22]

Dusík a kyslík

Tyto plyny patří mezi nejškodlivější příměsi v ocelích. Vytvářejí nekovové vměstky (oxidy a nitridy), které negativně ovlivňují plasticitu hlubokotažných plechů. Mezní obsah těchto plynů u běžných ocelových plechů je stanoven na 0,006 %. [22]

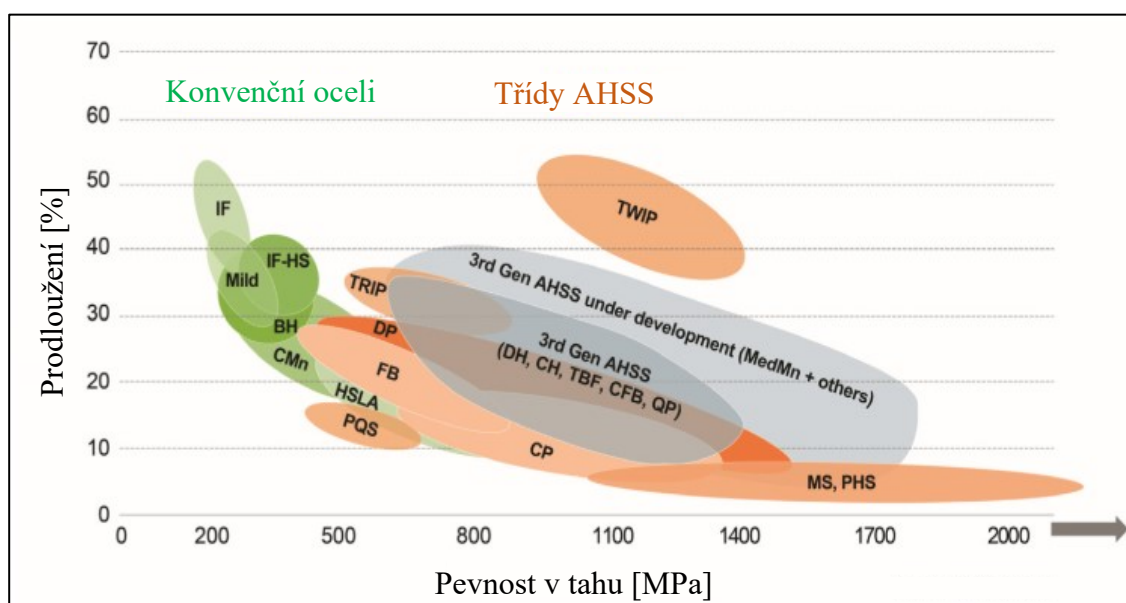
Doprovodné prvky

Měď (max. 0,15 %), chrom (max. 0,03 %) a nikl (max. 0,1 %) se do oceli obvykle dostávají z recyklovaného ocelového odpadu. Ačkoliv zvyšují pevnost, jejich obsah je nutné minimalizovat, zejména u hlubokotažných plechů, které vyžadují vysokou tvářitelnost. [22]

2.2 Rozdělení ocelí podle pevnosti a tažnosti

Tato část se zabývá vztahem mezi pevností v tahu a celkovým prodloužením u různých druhů ocelí. Pokročilé vysokopevnostní oceli umožňují použití tenčích plechů při zachování mechanických vlastností, čímž představují efektivní alternativu k běžným nízkouhlíkovým ocelím. [23]

Na obrázku níže je uveden graf, který znázorňuje charakteristiky ocelí používaných v automobilovém průmyslu a pomáhá při výběru materiálu, který splňuje předem stanovené požadavky na pevnost, tažnost a snížení hmotnosti. [23]



Obrázek 20 Přehled ocelí používaných v automobilovém průmyslu [23]

- Měkké oceli: mají mez pevnosti v tahu nižší než 300 MPa a tažnost (A_{80}) vyšší než 30 %.

(Příklad: IF – Bezintersticiální oceli)

- Konvenční oceli: vyznačují se mezí pevnosti v tahu v rozmezí 300–700 MPa a tažností (A_{80}) mezi 10 % a 30 %.

(Příklady: HS – Vysokopevnostní oceli, BH – Oceli zpevněné tepelným zpracováním, HSLA – Vysocepevné nízkolegované oceli).

- Pokročilé oceli: mají velmi vysokou mez pevnosti v tahu přesahující 700 MPa a tažnost (A_{80}) v rozsahu 5–30 %.

(Příklady: TRIP – Oceli s transformací indukovanou plasticitou, DP – Dvoufázové oceli, CP – Oceli s komplexní fází, MS – Martenzitické oceli). [24]

2.2.1 Konvenční nízkouhlíkové oceli

Nízkouhlíkové oceli jsou dodávány ve formě za studena válcovaných plechů a pásů a jsou vhodné pro hluboké tažení a složité tvářecí operace. Vynikající plastické vlastnosti jsou důsledkem velmi nízkého obsahu uhlíku a dusíku. Výhodou je také velmi dobrá svařitelnost. Mezi nevýhody patří nižší pevnost ve srovnání s ocelí s vyšším obsahem uhlíku a náchylnost ke korozi. Pro lisovací aplikace je typický obsah uhlíku 0,03 až 0,1 %. [24]

Norma EN 10130 specifikuje výrobu válcovaných plechů z nízkouhlíkových ocelí v šesti třídách. Vyšší stupně jsou charakteristické rostoucí tvářitelností a klesajícím obsahem uhlíku. Základní mechanické vlastnosti nízkouhlíkových ocelí pro tváření za studena jsou uvedeny v Tabulce 1. [24]

Tabulka 1 Vlastnosti nízkouhlíkových ocelí válcovaných za studena dle EN 10130 [24]

Třída	Mez kluzu $R_{p0.2}$ (max.) [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Prodloužení A_{50} (min.) [%]
DC01	280	270-410	28
DC03	240	270-370	34
DC04	210	270-350	38
DC05	180	270-330	40
DC06	180	270-350	38
DC07	150	250-310	44

2.2.2 Nerezové oceli

Nerezová ocel obsahuje minimálně 10,5 % chromu, což zabraňuje rezivění díky vrstvě bohaté na oxid chromu. Některé druhy nerezových ocelí jsou odolné i vůči vysokým teplotám. Ve srovnání s uhlíkovými oceli jsou charakteristické tyto vlastnosti:

- Vyšší pevnost.
- Vyšší náchylnost k deformačnímu zpevnění.
- Vyšší mez kluzu, což vede k většímu zpětnému pružení.
- Větší sklon k zadírání na nástrojích.
- Nižší tepelná vodivost omezuje odvod tepla vznikajícího při deformaci a tření. [7]

Nerezové oceli se rozdělují do pěti základních kategorií podle mikrostruktury:

1. Austenitické oceli jsou nejlépe tvářitelné díky své krystalické struktuře typu plošně centrované krychle (FCC). Jsou dražší, protože jejich stabilizace vyžaduje legování niklem. Nabízejí nejvyšší pevnost při vysokých teplotách, obvykle nad 370 °C.
 2. Feritické oceli mají nejnižší obsah legujících prvků a jsou cenově nejdostupnější. Jejich krystalická struktura typu prostorově centrované krychle (BCC) však způsobuje nižší tvářitelnost. Poskytují vysokou odolnost vůči oxidaci při vysokých teplotách, avšak nejsou vhodné pro extrémní teplotní podmínky.
 3. Duplexní oceli kombinují struktury FCC (austenitické) a BCC (feritické), čímž spojují jejich vlastnosti. Míra tvářitelnosti se nachází mezi vlastnostmi obou skupin.
 4. Precipitačně zpevněné oceli se zpracovávají ve změkčeném stavu a následně se kalí. Vyznačují se vysokou pevností a klasifikují se jako plně tvrdé, třičtvrtě tvrdé, polotvrde nebo měkké.
 5. Martenzitické oceli jsou nejčastěji zastoupeny ocelí označenou 420. Tyto oceli se také zpracovávají ve změkčeném stavu před kalením. Martenzitické oceli stejně jako precipitačně zpevněné oceli nejsou vhodné pro prostředí s vysokými teplotami.
- [7]

Tabulka 2 Vlastnosti nerezových ocelí [7]

Typ oceli	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ (max.) [MPa]	Prodloužení [%]
Austenitická nerezová ocel	515	205	40
	480	170	40
	515	205	40
	485	170	40
Feritická ocel	380	205	20
	450	205	20
	450	205	22
Martenzitická ocel	690	–	15

2.2.3 Vysokopevnostní oceli

Použití vysokopevnostních ocelí (AHSS) jev automobilovém průmyslu velmi rozšířené díky svým výjimečným mechanickým vlastnostem, jako jsou vysoká pevnost v tahu, tuhost, schopnost zpevnění při deformaci, nízké náklady, vysoká výkonost a možnost optimalizace hmotnosti při zachování dobré tažnosti. [23]

Vícefázová mikrostruktura a tenčí plechy komplikují procesy tváření, což vyžaduje vyšší tvářecí síly, zvyšuje spotřebu energie a zatěžuje stroje. AHSS mají také větší sklon k tvorbě vrásek kvůli nedostatečnému přidržení materiálu, což vede ke snížení tloušťky plechu. Významnou výzvou je pružení materiálu (springback) a nekonzistentní rozměrová kontrola, což navyšuje požadavky na úpravy nástrojů a zavádění pokročilých kompenzačních technik. Kromě toho variabilita výrobních dávek a složitější návrhy forem dále zvyšují výrobní náklady a požadavky na výrobu. [23]

2.3 Ostatní materiály používané při plošném tváření

V plošném tváření se stále častěji využívají hliníkové a hořčíkové slitiny, zejména díky jejich nízké hmotnosti, dobré tvářitelnosti a odolnosti vůči korozi. Naopak titanové slitiny budou v této podkapitole vynechány, jelikož se používají převážně v aplikacích, jako jsou ojnice, výfukové systémy, rotory turbodmychadel nebo díly podléhající vysokým teplotám a zatížením. Tyto aplikace spíše spadají do oblasti speciálních konstrukčních prvků.

2.3.1 Hliník a hliníkové slitiny

Hliník a jeho slitiny se využívají primárně v leteckém a automobilovém průmyslu, zejména díky jejich nízké hustotě $2\,700\text{ kg/m}^3$, která umožňuje výrazné snížení hmotnosti konstrukcí při zachování pevnosti. Hliníkové slitiny se dělí na dvě hlavní kategorie: odlitkové slitiny a tvářené slitiny. Odlitkové slitiny mohou obsahovat až 30 % legujících prvků, zatímco tvářené slitiny mají zpravidla maximálně 5 % legujících prvků a často se používají ve zpevněném a tepelně zpracovaném stavu. [24]

Dalšími přednostmi jsou odolnost proti korozi a plná recyklovatelnost. Tažnost těchto materiálů není ovlivněna snižující se teplotou, což zajišťuje lepší tvářitelnost oproti oceli za stejných podmínek. [24]

Hliníkové slitiny se dělí do devíti sérií (1xxxx–9xxx) podle chemického složení, jak specifikuje norma EN 573-3:2005. [24]

Slitiny série 5xxx a 6xxx vykazují vynikající tvářitelnost a tažnost. Zejména série 6xxx je široce využívána díky své všestrannosti, která zahrnuje tepelnou zpracovatelnost a možnost svařování, což ji činí ideální pro automobilový průmysl. [24]

Tabulka 3 Rozdělení sérií hliníkových slitin pro tváření [24]

Série slitin	Typ slitiny	Mez pevnosti [MPa]
1xxx	Al (obsah nečistot <1 %)	70-150
2xxx	Al-Cu-Mg; Al-Cu-Mg-Si	170-530
3xxx	Al-Mn	140-280
4xxx	Al-Si	180-360
5xxx	Al-Mg; Al-Mg-Mn	160-350
6xxx	Al-Mg-Si	160-370
7xxx	Al-Zn-Mg; Al-Zn-Mg-Cu	360-610
8xxx	Různé legující prvky (Al-Li, Al-Fe, Al-Li-Cu)	260-650
9xxx	Zn, Cu	Nespecifikováno

2.3.2 Hořčíkové slitiny

Hořčík je šedobílý lehký kov s hustotou $1\,738\text{ kg/m}^3$, o 33 % lehčí jak hliník, 50 % lehčí než titan a 75 % než ocel. Kvůli nevhodným mechanickým vlastnostem se čistý hořčík nepoužívá jako konstrukční materiál. [24]

Hustota hořčíkových slitin je $1400\text{--}1900\text{ kg/m}^3$ a lze je rozdělit do dvou typů na kované a lité. Vlastnosti lze upravit legujícími prvky, kterými jsou hliník (do 10 % hmotnosti), beryllium, cer, měď, lithium, neodym, mangan a vzácné kovy. Vápník zlepšuje jemnost zrna a umožňuje svařování plechů bez praskání. Přídavek 6 % hliníku zvyšuje pevnost, tvrdost a usnadňuje lití. [24]

Lité slitiny zahrnují kombinace jako: Mg-Al, Mg-Al-Mn, Mg-Al-Si, Mg-Zn-Cu apod.

Tři hlavní skupiny kovaných slitin:

- Slitiny s přídavkem hliníku, zinku a manganu (např. Mg-Al-Zn).
- Slitiny obsahující zinek, yttrium, zirkonium a vzácné zeminy (např. Mg-Zn-RE).
- Slitiny obsahující lithium (např. Mg-Li-Al).

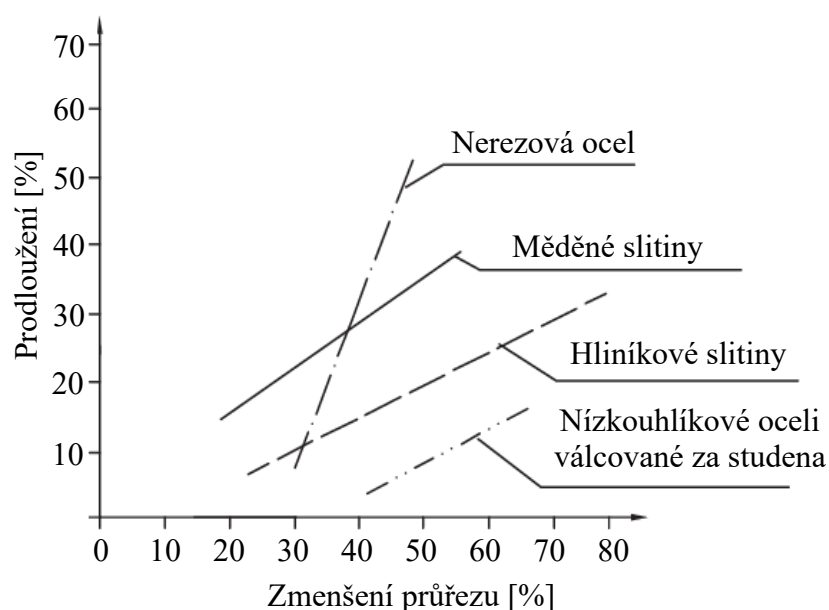
Hořčíkové slitiny ve formě plechů se vyrábějí v omezených typech, jako AZ31B, AZ61, HK31, HM21 a ZM21, zpravidla v žíhaném nebo částečně zakaleném stavu. Tváritelnost plechů z hořčíkových slitin omezuje anizotropie mechanických vlastností, způsobená krystalizací v mřížce typu A3. Plasticitu hořčíkových slitin zlepšují tři faktory: vyšší teplota tváření, zjemnění zrna a přítomnost prvků s nízkým bodem tání (např. lithium nebo zinek). Tvarování za tepla probíhá při teplotách v rozmezí 200–350 °C. [24]

Hořčíkové slitiny mají velký potenciál v automobilovém průmyslu díky nízké hustotě, vysoké pevnosti, rozměrové stabilitě, tepelné vodivosti a tlumení vibrace (60krát vyšší než u oceli, 15krát vyšší než u hliníku). Až 70 % vyrobených hořčíkových slitin se používá v automobilovém průmyslu, hlavně v exteriérech, interiérech, karoseriích a podvozcích. [24]

2.4 Vztah mezi prodloužením a zmenšením průřezu

Zmenšení průřezu je definováno jako procentuální pokles původní průřezové plochy a . Podobně jako procentuální prodloužení se měří po přetržení vzorku. Procentuální prodloužení je primárně ukazatelem deformace vedoucí k začátku zúžení, spíše než měřítkem deformace při přetržení vzorku během tahové zkoušky. Procentuální zmenšení průřezu poskytuje přesnější ukazatel deformace při konečném přetržení. [16]

U většiny materiálů se prodloužení pohybuje v rozmezí 10 % až 60 %, zatímco zmenšení průřezu dosahuje hodnot 20 % až 90 %. Termoplasty a superplastické materiály vykazují výrazně vyšší tažnost, zatímco křehké materiály mají velmi nízkou tažnost. [16]



Obrázek 21 Vztah mezi prodloužením a zmenšením průřezu [16]

3 TVÁŘENÍ V SOFTWARE AUTOFORM

Software AutoForm – FormingSolver umožňuje rychle a přesně simulovat procesy tváření plechů, včetně tažení, střížných operací, lemování apod. Díky software AutoForm lze efektivně navrhovat a optimalizovat lisovací nástroje a geometrii dílu. Proces tváření je kontrolován a upravován ve všech jeho fázích. Výsledky mohou být získány jak v počáteční, průběžné i konečné validační fázi. Pro každou simulaci jsou vždy poskytovány veškeré kompletní výsledky, protože je vybrána konkrétní sada parametrů. [25; 26]

3.1 Výhody a klíčové funkce

Mezi hlavní funkce patří přesná simulace tváření, včetně detekce potenciálních problémů, například vrásnění, trhliny, návrat pružnosti a ztenčení. Simulace umožňuje predikci sil potřebných pro tváření a rozložení tlaku v nástrojích. Hodnocení a vizualizace FLD diagramu umožňuje posoudit, zda je daný návrh realizovatelný. [25]

Výhody a klíčové funkce:

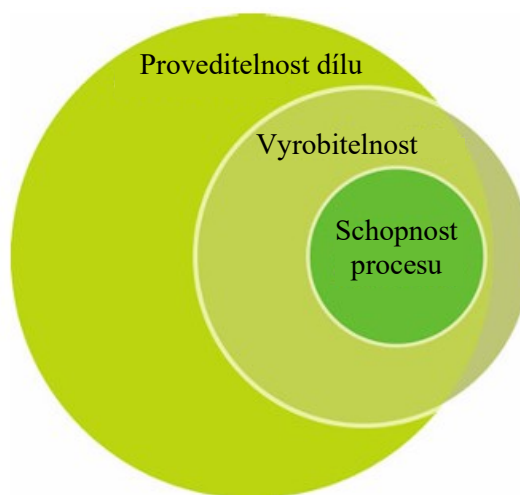
- Detailní přehled všech operací procesu lisování.
- Přesná simulace návratu pružnosti.
- Rychlé ověřování nových konceptů procesů za účelem zlepšení kvality a snížení nákladů.
- Rozšíření výpočtů zahrnutím vlivu tepelných efektů, fázových transformací a zpřesnění tribologie.
- Rychlá a přesná simulace hlubokého tažení, dotváření, prostřihování a ořezávání, ohýbání a lemování.
- Vysoká přesnost simulací založená na pokročilých matematických modelech. [25]

3.2 Význam a použití

Analýza metodou konečných prvků vyžaduje vstupy a okrajové podmínky pro tvorbu matematického modelu. Dostupnost informací a předpokladů určuje důvěryhodnost a užitečnost výsledků simulace. Softwarové kódy nefungují správně při neúplných vstupech. Důležité je zaměřit se na požadované výstupy:

- Proveditelnost dílu – hodnocení geometrie a materiálové specifikace pro splnění funkce produktu.
- Vyrobitelnost – validace nástrojů, procesu a materiálových specifikací.
- Schopnost procesu – stabilita a udržitelnost výroby při výrobních variacích.

Výstupy závisí na vstupních údajích a předpokladech modelu. Širší předpoklady zvyšují riziko odchylek mezi simulací a realitou. V rámci možných výsledků návrhu nelze vždy zaručit jejich proveditelnost. [4]



Obrázek 22 Možné výstupy návrhu procesu při použití AutoForm [4]

Proveditelnost dílu označuje schopnost bezpečné výroby dílu v mezích deformačních limitů materiálu bez ohledu na výrobní proces. Vyrobitelnost určuje, zda lze díl úspěšně vyrobit v přesně definovaném procesu. Schopnost procesu hodnotí, zda proces zvládne vyrábět přijatelné díly při očekávaných variacích výrobního prostředí a specifikace.[4]

3.3 Vstupní data

Minimálními vstupy pro hodnocení proveditelnosti zahrnují 3D CAD data a specifikaci třídy materiálu. Materiálový model zahrnuje zpevňovací křivku, model mezního napětí

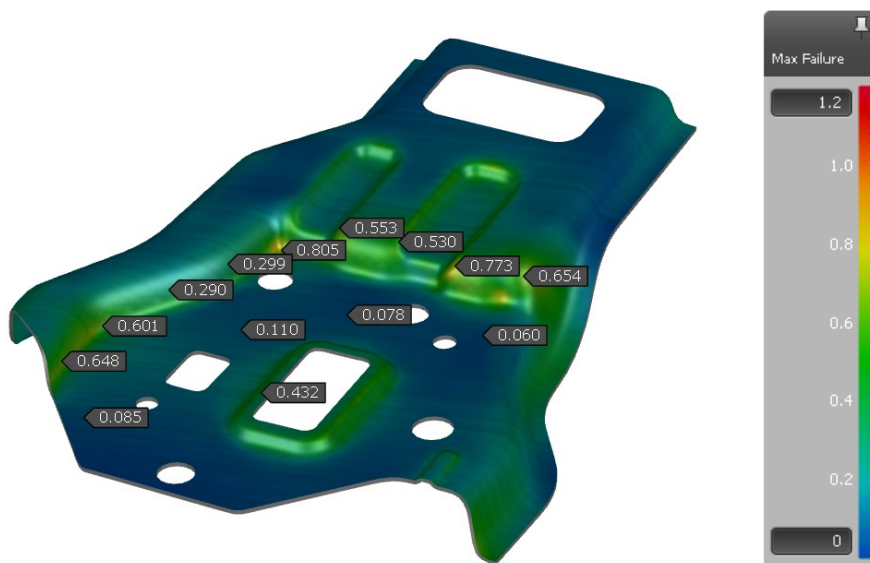
a deformační limit. CAD data musí být aktuální, kompletní a plně dokončená. Mezi volitelné, avšak užitečné vstupy patří výrobní orientace, okrajové podmínky (např. omezení plechu a tření) a přídatky (geometrie rozložení nástroje). Pokročilé řešení proveditelnosti vyžaduje další vstupy, jako je 3D návrh nástroje, aplikované vnější síly a počáteční obrys polotovaru. [4]

3.4 Výstupní data

Rozpoznání kritických problémů je snadné díky výstupu z FLD (diagramu mezních deformací), který identifikuje režimy tváření a riziko selhání. Grafy tvarovatelnosti, které zobrazují rozdělení rizik a režimů tváření, jsou běžně dostupné v softwaru pro inverzní jedno-krokové výpočty. Tendence tváření dílu, jako jsou bezpečné, hraniční, selhání štěpením, stlačení, zvrásnění nebo nedostatečné protažení, bývají na simulační síti zvýrazněny různými barvami pro snadné rozpoznání. [4]

3.4.1 Analýza porušení

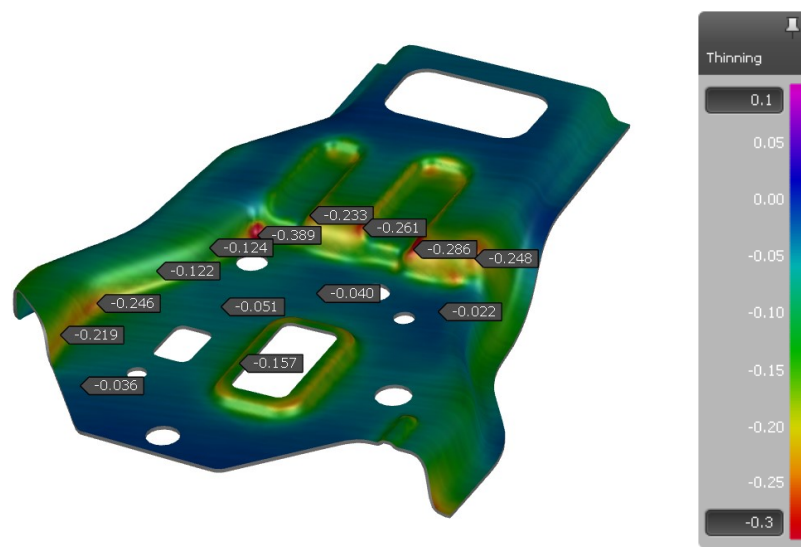
Analýza porušení (Max Failure) identifikuje oblasti výtažku, které jsou nejvíce náchylné k porušení. Pomocí označení konkrétní oblasti lze zobrazit přesnou hodnotu deformace. Dosažení hodnoty 1 (odpovídající hodnotě 100 %) by znamenalo, že výsledek leží na křivce mezních deformací v FLD diagramu, což by vedlo k porušení. V praxi by neměla tato hodnota přesáhnout 0,8, což odpovídá 80 % využití plasticity materiálu. [27]



Obrázek 23 Identifikace rizikových oblastí deformace

3.4.2 Analýza ztenčení

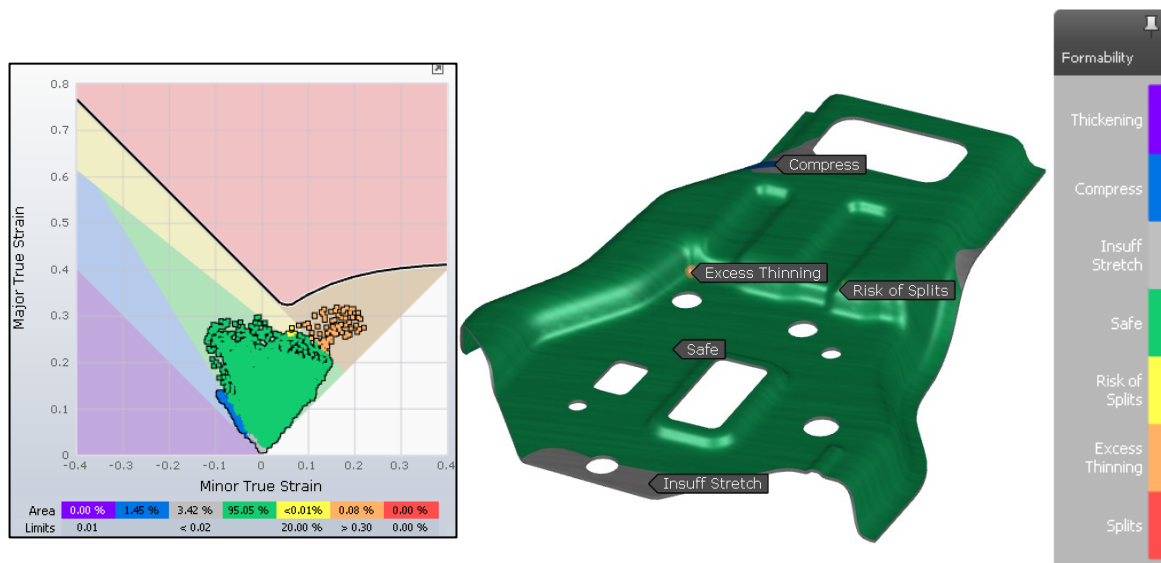
Analýza ztenčení (Thinning) ukazuje, o kolik procent došlo ke ztenčení nebo napěchování materiálu. V praxi se stanovuje maximální přípustná hodnota ztenčení, která obvykle činí 25 %. Překročení této hodnoty výrazně snižuje stabilitu výtažku. Při ztenčení nad 30 % se výsledek považuje za nevyhovující. Výsledná data lze zobrazit jako desetinná čísla, která je nutné převést na procenta pro snadnější interpretaci. [26; 27]



Obrázek 24 Identifikace rizikových oblastí ztenčení

3.4.3 Analýza tvářitelnosti

Analýzy tvářitelnosti (Formability) hodnotí deformace daného výtažku. Cílem je dosáhnout co nejvyššího stupně deformace při splnění všech podmínek simulace. Větší deformace zajišťují lepší vlastnosti výtažku. Při lisování za studena dochází ke snížení plasticity kovu, který bez porušení snese pouze určitou mezní deformaci. [27]



Obrázek 25 Zobrazení oblastí tvářitelnosti dílu

4 ZKOUŠKY PLECHŮ

Testování plechových materiálů je v této kapitole uspořádáno tak, aby postupně zahrnovalo mechanické testy, technologické testy, zkoušky pro určení FLD a nedestruktivní metody. Takové uspořádání zajišťuje přehledné a systematické popsání jednotlivých metod.

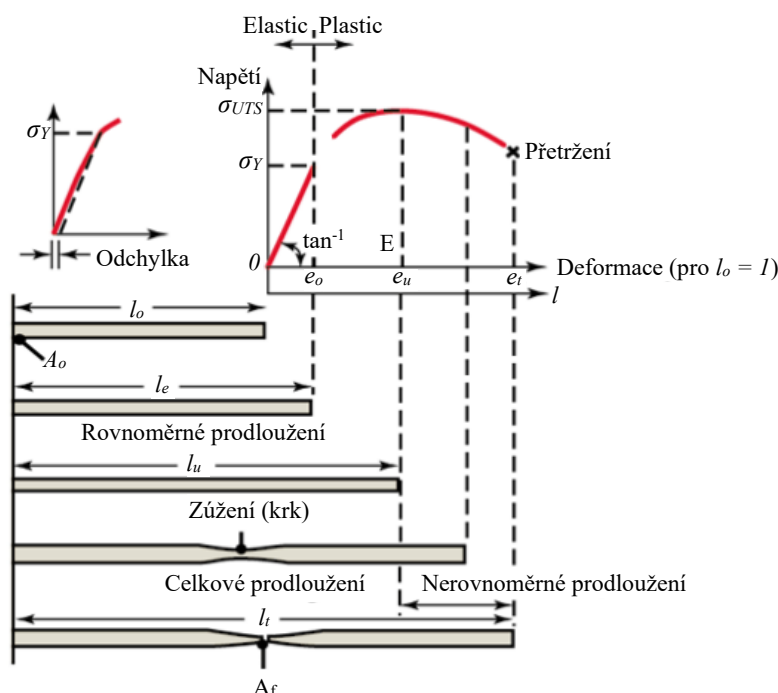
4.1 Mechanické zkoušky plechů

Mezi mechanické zkoušky plechů patří zejména zkouška tahem, která umožňuje hodnocení meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m , kontrakce Z a tažnosti A . Dalšími důležitými charakteristikami jsou zkoušky tvrdosti, normálová a plošná anizotropie. [22]

4.1.1 Zkouška pevnosti v tahu

Při zkoušce tahem se zkušební těleso vyřízne z plechu a pomalu táhne až do přetržení. Těleso je uchyceno přípravky, které drží rozšířené konce bez ovlivnění deformace a zajišťují, že těleso zůstává během zkoušky rovné. Tyto držáky jsou upevněny k pohyblivé a pevné příčné liště zařízení. Extenzometr je připevněn ke zkušebnímu tělesu a měří prodloužení vzhledem k původní délce l_0 . [7]

Během zkoušky se pohybuje příčná lišta vedená sloupy, čímž se zkušební těleso natahuje podél své délky a vyvolává tahové zatížení. Po celou dobu se v reálném čase zaznamenávají hodnoty zatížení, posun lišty a prodloužení měřené extenzometrem. [7]



Obrázek 26 Tahová křivka a prodloužení [7]

Křivky inženýrského napětí-deformace jsou užitečné pro určení několika základních mechanických vlastností materiálů:

- Mez kluzu (R_e nebo σ_Y): označuje začátek plastické deformace.
- Pevnost v tahu (R_m nebo σ_{UTS}): maximální inženýrské napětí při zkoušce tahem. Tato hodnota označuje konec rovnoměrného prodloužení a začátek lokalizovaného zúžení, což označuje plastickou nestabilitu.
- Modul pružnosti (E , Youngův modul): sklon elastické části křivky inženýrského napětí-deformace, udávající tuhost materiálu.
- Rovnoměrné prodloužení (e_u): prodloužení při maximálním zatížení.
- Celkové prodloužení (e_t): celkové prodloužení zkušebního tělesa při přetržení, zahrnující rovnoměrné i lokalizované prodloužení.
- Redukce plochy (A_r): procentuální snížení průřezu plochy, vypočítané jako rozdíl mezi původní průřezovou plochou (A_0) a průřezovou plochou po přetržení (A_f). [7]

4.1.2 Tvrdost a zkoušky tvrdosti

Tvrdost je materiálová vlastnost vyjadřující jeho odolnost vůči plastické deformaci, vniknutí a opotřebení. Tvrdost materiálu lze testovat různými metodami, nicméně v průmyslu zpracování kovů se používají tři hlavní typy zkoušek. [16]

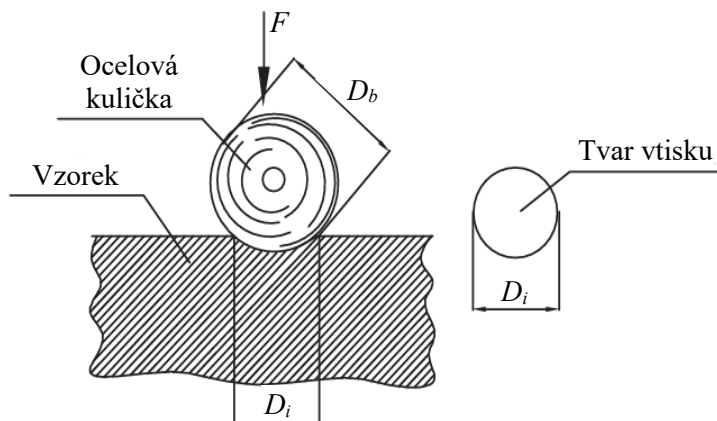
Zkouška tvrdosti podle Brinella

Jedná se o jednu z nejstarší standardizovaných metod měření tvrdosti měkkých až středně tvrdých kovů. Tvrdost se měří zatlačením ocelové nebo cementované karbidové kuličky o průměru 10 mm do zkoušeného materiálu. Zatížení je stanoveno na základě typu materiálu. Měkké kovy, jako je měď, mosaz nebo tenké plechy, se testují zatížením 500 kg. Hliníkové odlitky se testují při zatížení 1 500 kg, zatímco středně tvrdé kovy, jako je ocel, až při 3 000 kg. Doba působení zatížení je 15 až 30 sekund. Po odstranění zatížení se změří průměr sférického vtisku s přesností $\pm 0,05$ mm pomocí přesného mikroskopu. Tvrdost podle Brinella se vypočítá podle této rovnice:

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b \left(D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2} \right)} \quad (9)$$

kde: HB – Brinellovo číslo tvrdosti, D_b – průměr kuličky [mm], D_i – průměr vtisku [mm], F – aplikované zatížení [kg].

Výsledné Brinellovo číslo tvrdosti má jednotky kg/mm^2 , ale obvykle se při vyjadřování hodnoty vynechávají. [16]

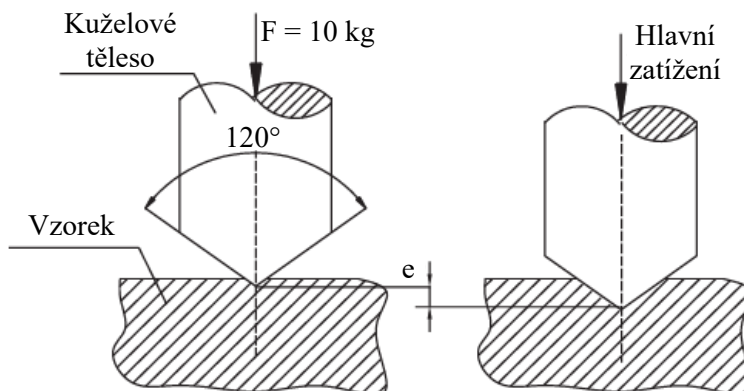


Obrázek 27 Schéma měření tvrdosti podle Brinella [16]

Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Rockwellova zkouška se od Brinellovy metody liší tím, že se tvrdost materiálu určuje na základě hloubky vtisku při působení konstantního statického zatížení. Metoda Rockwella využívá diamantový kužel (vrcholový úhel 120° , špičku o poloměru 0,2 mm) nebo ocelovou kuličku (průměr 1,6 mm) jako vlačovací těleso. Hodnoty tvrdosti jsou bez jednotek a udávají se na stupnicích A, B, nebo C. Vyšší číslo představuje tvrdší materiál. [16]

Nejprve se vlačovací těleso zatíží silou 10 kg, aby se stabilizovalo v materiálu a indikátor se nastaví na nulu. Následně se aplikuje hlavní zatížení: 60 kg (stupnice A), 100 kg (stupnice B) a 150 kg (stupnice C). Hloubka vtisku e se po uvolnění zatížení převede na tvrdost Rockwell, která se odečítá přímo, což zajišťuje rychlost a spolehlivost oproti Brinellově metodě. Měření není vhodné pro materiály tenčí než 1,6 mm, drsné povrchy nebo nehomogenní materiály, jako je šedá litina. [16]



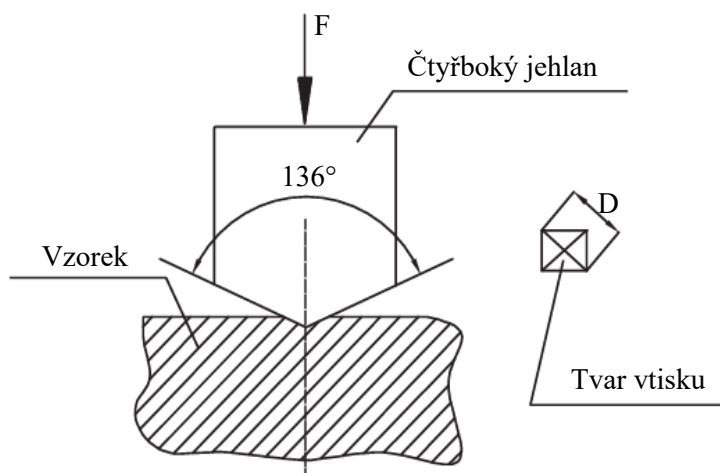
Obrázek 28 Schéma měření tvrdosti podle Rockwella [16]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Vnikajícím tělesem je rovnostranný jehlan s vrcholovým úhlem 136° a čtvercovou základnou. Hodnota tvrdosti, stejně jako u Brinellovy metody, je poměrem zatížení k povrchu vtisku (kg/mm^2). Diamantové těleso je vtlačováno do materiálu při zatížení 2 kg až 120 kg dle standardu a typu materiálu. Výhodou jsou velmi přesné odečty s chybou ($\pm 0,001 \text{ mm}$), univerzální vtlačovací těleso pro všechny typy kovů a povrchových úprav a krátká doba testování. Hodnota tvrdosti podle Vickerse se počítá dle následujícího vzorce:

$$HV = \frac{1,854F}{D^2} \quad (10)$$

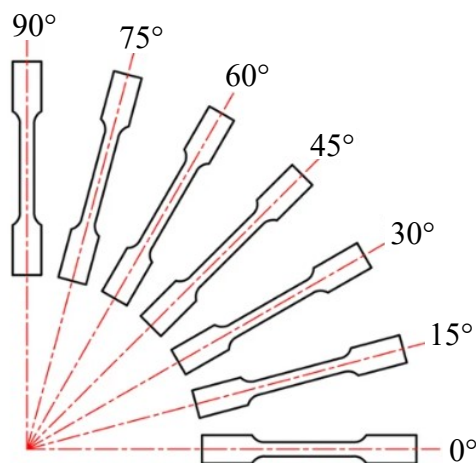
kde: HV – Vickersovo číslo tvrdosti, F – aplikované ztížení [kg], D – diagonála vtisku [mm].



Obrázek 29 Měření tvrdosti podle Vickerse [16]

4.1.3 Zkouška anizotropie plechů

Plechý po opakovaném válcování vykazují vláknitou strukturu a orientaci způsobenou krystalizací, což vede k anizotropii. Ta způsobuje rozdíly v mechanických vlastnostech materiálu v různých směrech a ovlivňuje proces tváření i výsledné chování. Zkouška anizotropie zahrnuje vzorky nařezané s přírůstkem 15° ve směru válcování. Důsledkem anizotropie jsou rozdíly v mechanických vlastnostech výsledného produktu, zvýšená obtížnost tváření a lokální koncentrace napětí, což může vést k nedostatečně tvarovaným nebo prasklým plechům. [28; 29]



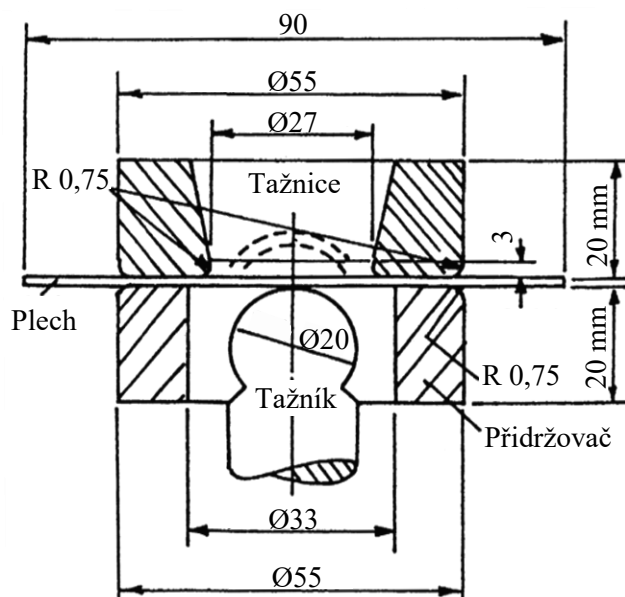
Obrázek 30 Vzorčky pro zkoušku anizotropie [29]

4.2 Technologické zkoušky tváritelnosti plechů

Plech při zkoušce tahem není vystaven napětově – deformačním stavům, které probíhají při reálném procesu tváření. Proto jsou dále uvedeny vybrané technologické zkoušky hlubokotažnosti plechů. [22]

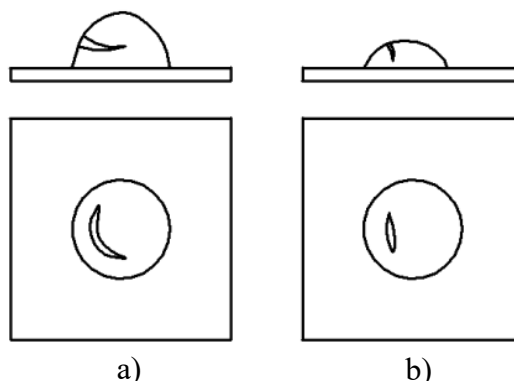
4.2.1 Hloubení podle Erichsena

Erichsenův test tažnosti je simulační zkouška napodobující podmínky protahování tenkých plechů. Zkouška se provádí pomocí polokulovitěho razníku, který působí na vzorek mezi matricí a přidržovačem. Malé vzorky plechu jsou během zkoušky tvarovány do misek. Proces probíhá při stanovené rychlosti, dokud se neobjeví souvislá trhлина. Míra tváritelnosti je určena posunem razníku, označovaným jako Erichsenův index vtlačení (IE). [11; 30]



Obrázek 31 Hloubení podle Erichsena [22]

Po zkoušce se hodnotí také směr trhliny. Obrázek a) níže znázorňuje typický tvar trhliny pro hlubokotažný plech, zatímco část (b) ukazuje nevhodný plech pro hluboké tažení.



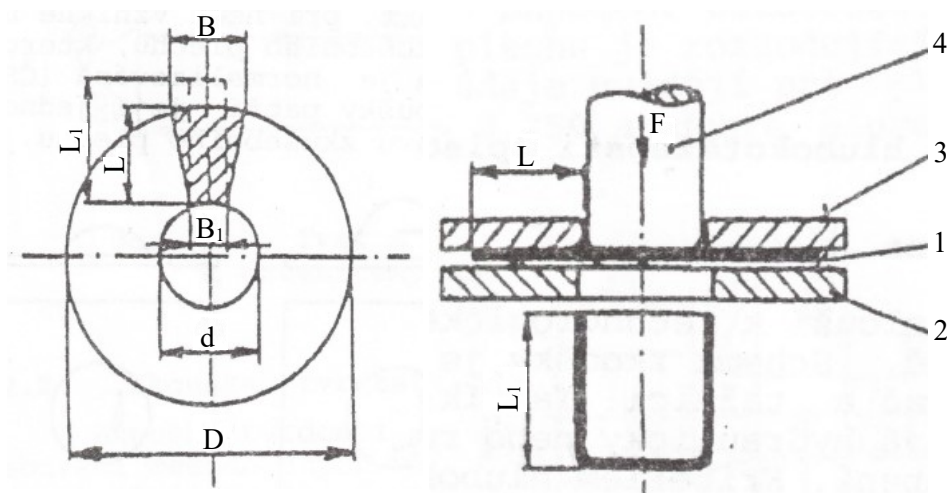
Obrázek 32 Tvary trhlín [22]

4.2.2 Zkouška kalíškovací Schmiedtova

Zkouška je vhodná pro rotačně symetrické tvary výtažků. Kritérium hlubokotažnosti plechu je bezrozměrná veličina m .

$$m = \frac{d}{D} \quad (11)$$

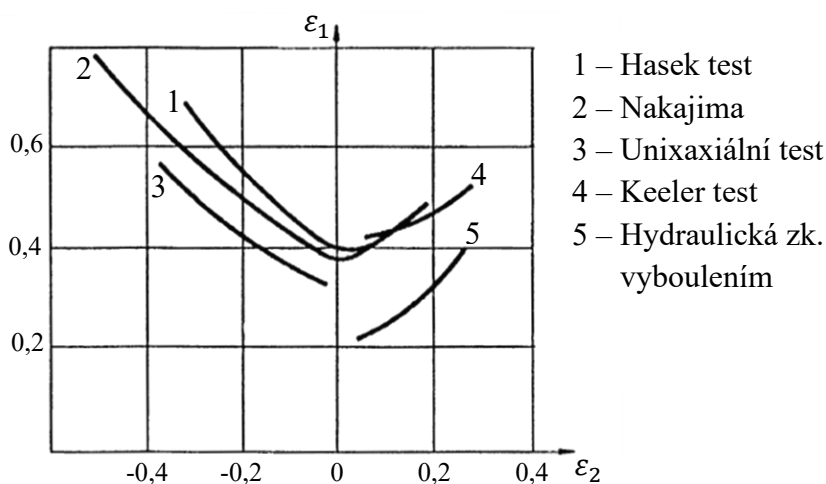
Kde d je průměr tažníku [mm] a D je experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu (rondelu) [mm], ze kterého lze získat válcový kalíšek (výtažek) bez porušení. Proces je zdoluhavý kvůli opakovanému zvyšování průměru rondelu D . Zkušební rondel $D = d + 2L$ se tažníkem $d = 50 \text{ mm}$ táhne na kalíšek výšky $L_1 > L$. Podmínky zkoušky korespondují s tažením v praxi. Výhodou je, že kalíškovací zkouška umožňuje hodnocení anizotropie mechanických vlastností plechu. Princip zkoušky je uveden na (Obrázek 33), kde: 1 – rondel, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 – tažník. [22]



Obrázek 33 Princip kalíškové zkoušky [22]

4.3 Experimentální testy stanovení FLD

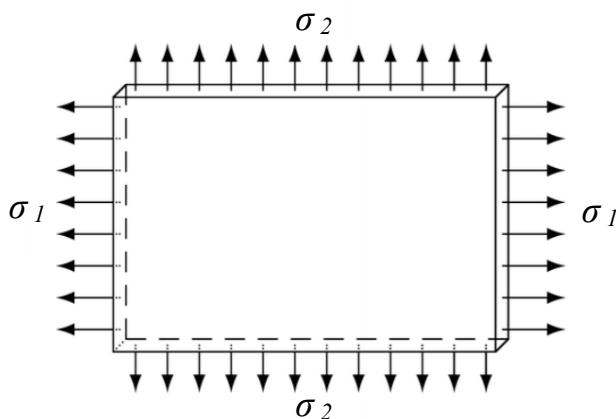
Experimentální testy FLD se provádějí za účelem pokrytí co největší oblasti deformačního pole, které se vyskytuje v průmyslových procesech tváření plechů. Diagramy jsou vytvářeny na základě experimentů, který poskytují dvojice hodnot mezní deformace ε_1 a ε_2 . Tyto hodnoty jsou získávány pro různé typy zatížení (ekvibiaxiální, biaxiální, uniaxiální). Pro stanovení FLD diagramu je nutné vytvořit zatěžující trajektorie od rovnoměrného tahového zatížení ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) až po čistý smyk. [4]



Obrázek 34 FLD Diagramy experimentálních testů [4]

4.3.1 Dvojité testování

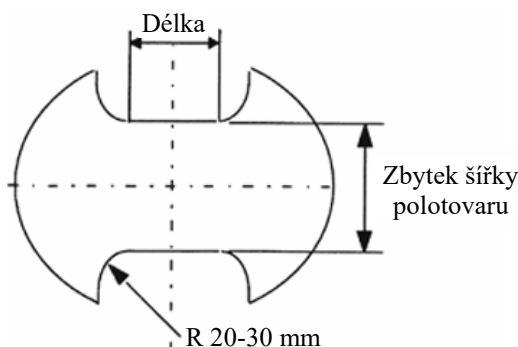
Zkušební plech čtvercového nebo obdélníkového tvaru je během testování natahován ve dvou navzájem kolmých směrech v rovině plechu. Působící normálová napětí σ_1 a σ_2 mohou mít různé hodnoty (biaxiální zatížení). Pokud jsou tato napětí stejná, jedná se o vyvážené dvojité testování (ekvibiaxiální). [11; 31]



Obrázek 35 Rozložení napětí při dvojitěm testování [31]

4.3.2 Zkouška Nakajima

Test spočívá v tažení obdélníkových vzorků s různými šířkami pomocí polokulového razníku a kruhové matrice. Díky variacím šířky vzorku a použití různých lubrikantů lze získat jak kladnou, tak i zápornou oblast diagramu FLD. Tvar vzorku je definován normou ISO 12004, přičemž doporučený průměr razníku je 100 mm a matrice 105 mm. Mezi hlavní výhody testu patří jednoduchost nástrojů, snadné tvary a schopnost pokrýt celou oblast diagramu, což zkoušku Nakajima řadí mezi nejkompexnější zkoušku tohoto typu. Mezi nevýhody naopak patří vznik vrásek a chyby měření způsobené zakřivením. [4; 32]



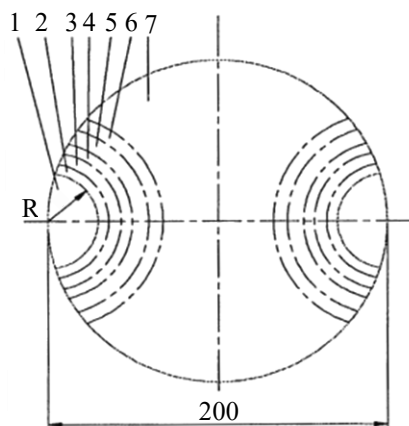
Obrázek 36 Vzorek Nakajima testu [32]

4.3.3 Hasek test

Aby se zabránilo vzniku vrásek u Nakajima testu, Hasek navrhl použití kruhových vzorků s prohlubněmi o různých poloměrech, které zvyšují složitost procesu výroby. Velikosti rádiusů jsou vždy podle příslušné normy. Příklad hodnot je uveden v Tabulce 4:

Tabulka 4 Velikosti rádiusů Hasek testu [4]

Číslo	1	2	3	4	5	6	7
R [mm]	0	4	5	57,5	65	72,5	80

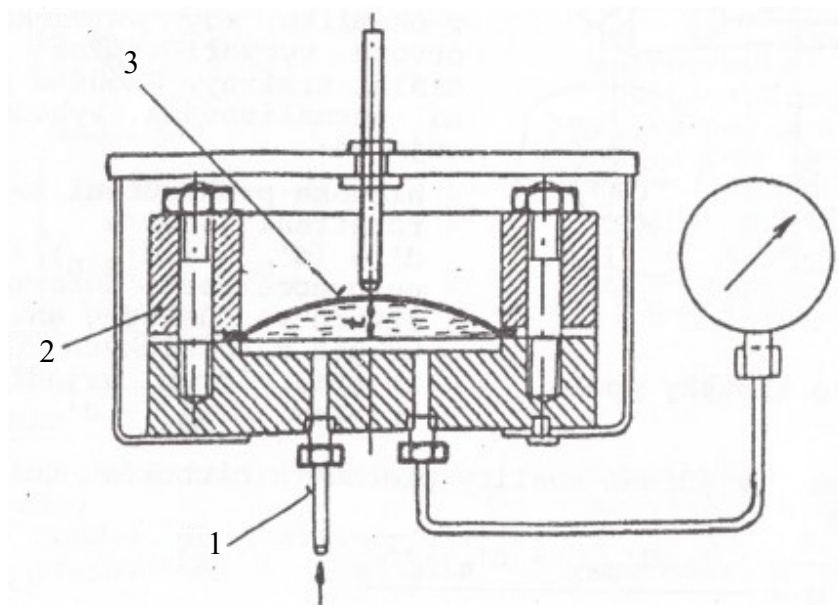


Obrázek 37 Vzorek Hasek testu [4]

4.3.4 Hydraulická zkouška vyboulení

Zkušební vzorek plechu je upnut svým okrajem pomocí přidržovače, který zároveň zajišťuje nepropustnost pro tlakovou kapalinu. Se zvyšujícím se tlakem kapaliny dochází k vyboulení vzorku plechu. Kvalita plechu je hodnocena na základě hodnoty vyboulení t , při které dochází k porušení celistvosti a vzniku trhlin. Současně se posuzuje tvar trhliny a celkový vzhled prohloubeného povrchu. Nevýhodou je nutnost složitého zařízení. [22]

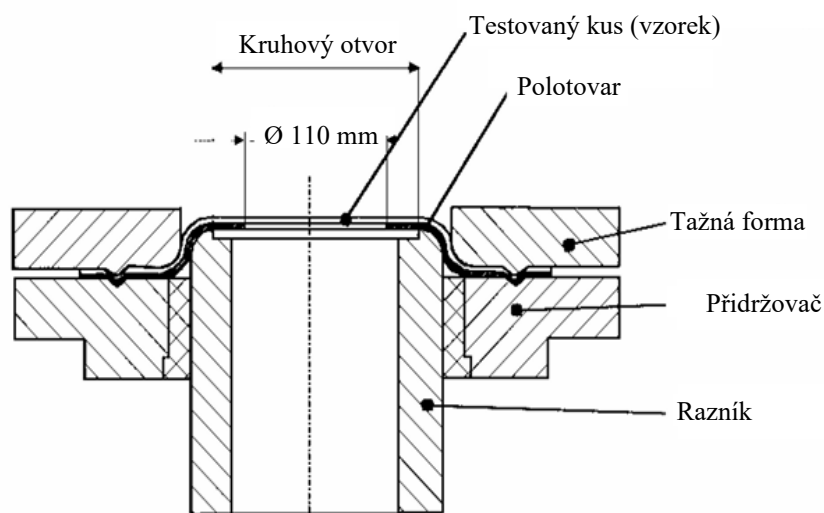
1 – Přívod tlakové kapaliny, 2 – přidržovač, 3 – zkušební vzorek plechu



Obrázek 38 Zařízení pro hydraulickou zkoušku [22]

4.3.5 Zkouška Marciniak

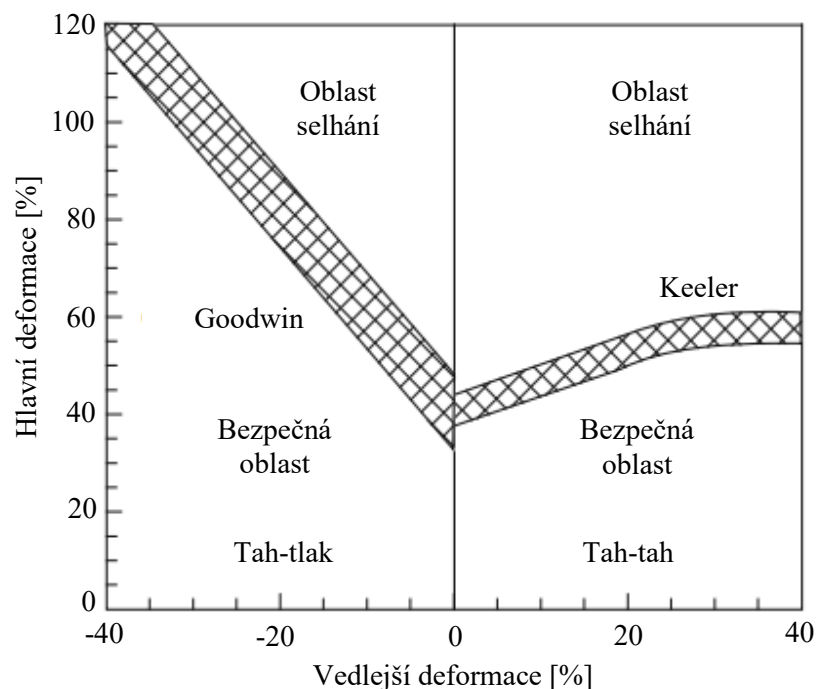
Při hlubokém tažení s plochým razníkem dochází k trhání materiálu obvykle v místě spojení dna a stěny. Aby se trhliny omezily pouze na rovinné dno nádoby, Marciniak navrhl použití rovinného válcového dutého razníku a mezikusu s kruhovým otvorem, umístěným mezi razníkem a obrobkem, což snižuje vliv tření. Rovinné dno eliminuje chyby měření způsobené zakřivením. Pro dosažení různých deformačních drah se používají razníky s různými průřezy (kruhové, eliptické, obdélníkové). Mezi nevýhody patří složitost tvarů razníku a matrice a omezení testu na kladnou oblast diagramu FLD. [4; 7]



Obrázek 39 Schéma Marciniak testu [7]

4.3.6 FLD Diagram

Diagram mezních deformací je grafické znázornění mezí deformace, které může plech podstoupit za různých stavů během procesu tváření, aniž by došlo k porušení. Jedná se o klíčový nástroj používaný v procesu tváření plechů. Tento koncept byl představen Keelerem a Goodwinem. [33; 34]



Obrázek 40 Mezní deformace Goodwin a Keeler [18]

Využití diagramů mezních deformací v průmyslové praxi

Využití těchto diagramů je nejrealističtější a nejefektivnější způsobem, jak odhadnout technologické možnosti výroby dílu a předejít neúspěšnému návrhu. FLD umožňuje určit:

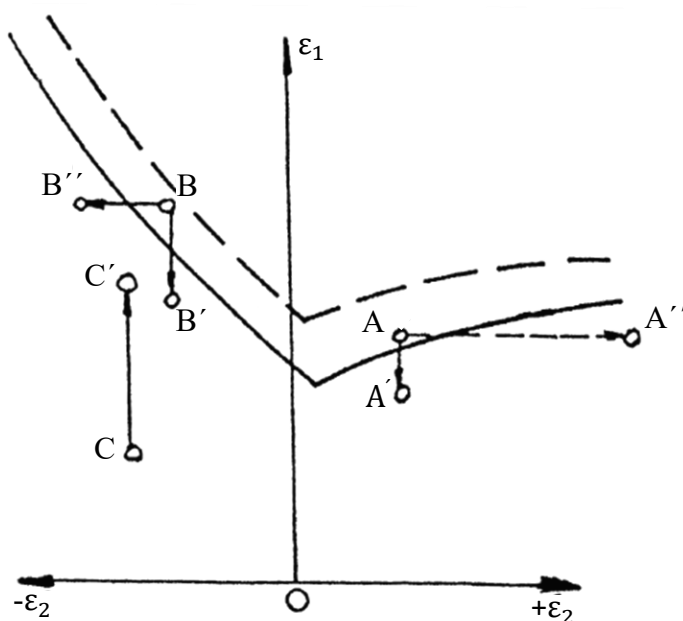
- Rozsah bezpečnosti pro hluboké tažení.
- Kritické zóny, kde je nejpravděpodobnější vznik krčku nebo lomu.
- Úroveň deformace.
- Příznivé pracovní podmínky (přidržovače, mazání apod.).

Nejprve návrhář určí tvar, rozměry a kvalitu materiálu daného dílu. Musí být navržena technologie tváření a nástroje. Následně musí být určeny maximální deformace v dílu, stejně jako diagram mezních deformací materiálu. Následuje porovnání bodů odpovídajících maximálním deformacím v dílu s FLD. Určuje se, zda může během tváření dojít k lomu nebo vzniku krčku. [4; 34]

Pokud se neočekává žádná vada, použijí se informace o tom, jak daleko je materiál deformován od své meze. Pokud ale definované body překročí mezní křivku, je nutné provést úpravy:

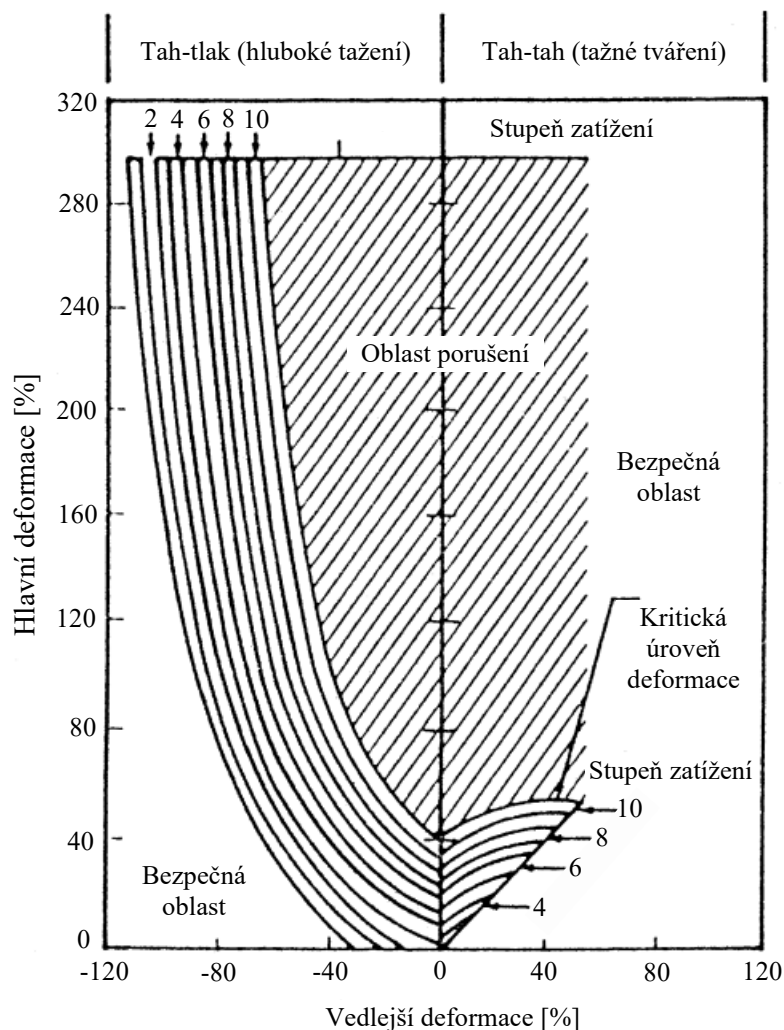
- Pracovních podmínek (přidržovače, mazání).
- Geometrie dílu (poloměry zaoblení, úhly. apod.).
- Materiálu (tloušťka, kvalita).

Účinek těchto úprav je znázorněn na obrázku. V prvních dvou případech je charakteristický bod posunut z bodu A do A'' nebo A', B do B' nebo B''. Další možností je posunutí křivky mezní deformace na čárkovanou linii. [4]



Obrázek 41 Příklady posunu kritických bodů [4]

Metoda FLD odhaduje závažnost deformace pomocí indexu závažnosti. Pokud je bod maximální deformace pod a daleko od křivky mezní deformace, index závažnosti je malý a bezpečnostní mez velká. V tomto případě dochází ke zbytečnému plýtvání materiálem (bod C). Je nutné buďto upravit podmínky tváření, nebo zvolit materiál s nižší mezní deformací. Doporučuje se rovnováha mezi dostatečnou bezpečnostní rezervou a omezením plýtvání materiálem, a to při indexu závažnosti 7-8. [4]



Obrázek 42 Definice indexů závažnosti [4]

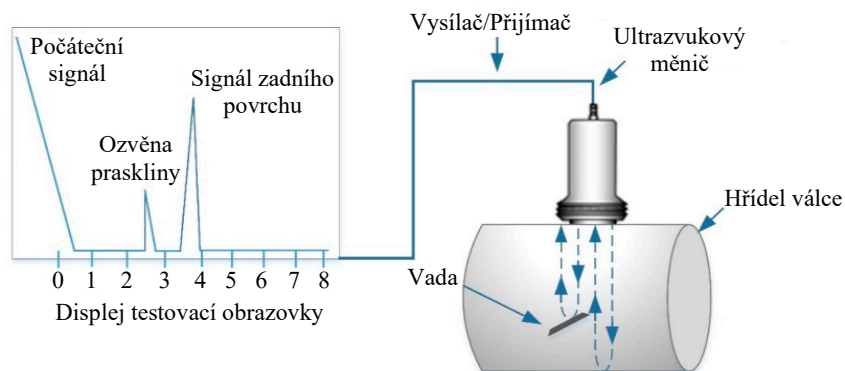
Stanovení maximálních deformací pro porovnání s FLD je u složitých dílů obtížné, protože deformace nelze vypočítat analytickými metodami. V těchto případech lze využít dvě metody: experimentální studie na malých modelech nebo numerická simulace. [4]

4.4 Nedestruktivní zkoušky plechů

Jedná se o klíčovou techniku napříč různými průmyslovými odvětvími pro hodnocení integrity materiálů a konstrukcí bez jakéhokoliv poškození. U plechů je důležitá primárně detekce trhlin. Níže jsou uvedeny dvě základní nejpoužívanější nedestruktivní zkoušky plechů, které se vzájemně doplňují, jelikož umožňují efektivní a komplexní kontrolu plechů jak na povrchu, tak i vnitřní struktury. [35]

4.4.1 Ultrazvuková zkouška

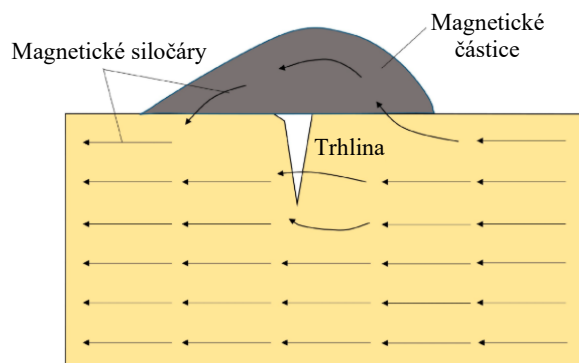
Tato metoda využívá vysokofrekvenční akustické vlny k detekci vnitřních vad v materiálech. Princip spočívá v měření časového rozdílu mezi přenosem a příjmem ultrazvukových vln, čímž lze identifikovat vady a trhliny ve zkoumaném výlisku. [35; 36]



Obrázek 43 Ultrazvuková zkouška [36]

4.4.2 Magnetická prášková zkouška

Principem je zmagnetování kontrolovaného výlisku za účelem vytvoření kritické oblasti magnetického pole. Pokud jsou přítomny vady nebo trhliny, tak magnetické pole v těchto místech vybočuje a vytváří gradient. Rozptýlením magnetických částic na povrch objektu se tyto částice hromadí v místech trhlin nebo vad a vytvářejí viditelné obrazce, čímž vymezují polohu a tvar trhlin nebo vad. [35]



Obrázek 44 Magnetická zkouška [35]

II PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V této diplomové práci jsou stanoveny konkrétní cíle. Jeden z těchto cílů, konkrétně vypracování literární rešerše na dané téma, je již k této kapitole splněn. Praktická část práce se dále odvíjí od těchto úkolů:

- Provést 3D konstrukci modelu plechového dílu.
- Vytvořit simulace procesu plošného tváření v software AutoForm.
- Navrhnout optimalizace procesu hlubokého tažení plechového dílu a vyhodnocení jednotlivých variant.

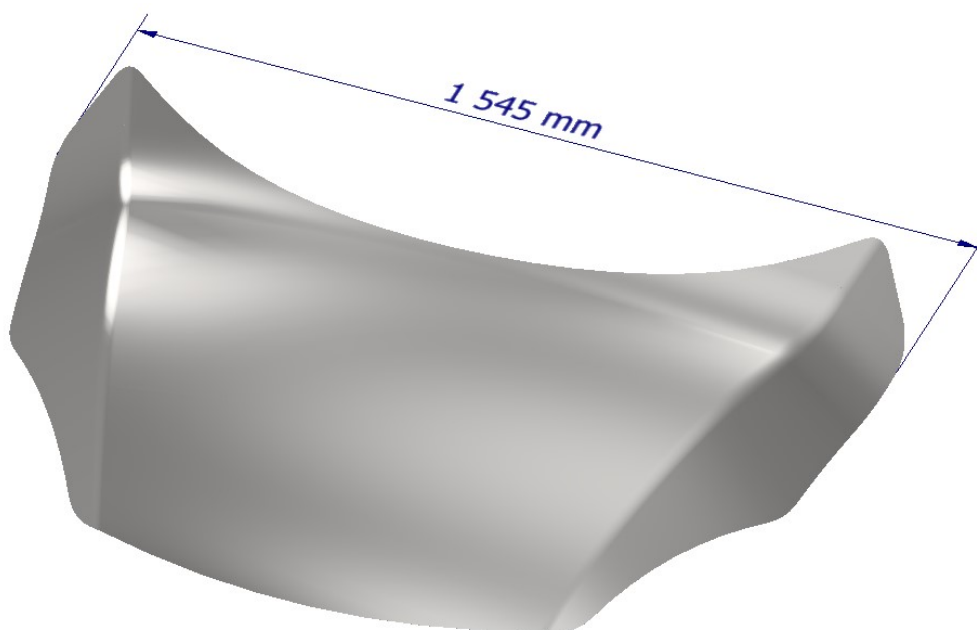
Po vytvoření modelů plechových dílů budou provedeny předběžné simulace, jejichž výsledky umožní posoudit vhodnost geometrie pro proces tváření. V případě identifikace nevhodných oblastí budou tyto prvky následně upraveny.

Zjištěné výsledky analýz, ať už po provedených úpravách geometrie dílů, nebo bez nich, budou využity k dosažení minimální tloušťky plechu při současném dodržení předem stanovených podmínek. Pro oba zadané díly budou vybrány tři konkrétní materiály.

Jedna z vhodných variant bude následně použita pro ukázkový popis nastavení simulace v softwaru AutoForm. Zároveň budou k této variantě uvedeny klíčové výsledky. Důraz bude kladen na rozbor problematiky obou dílů, a to jak na základě předběžných simulací, tak při hodnocení finálních návrhů.

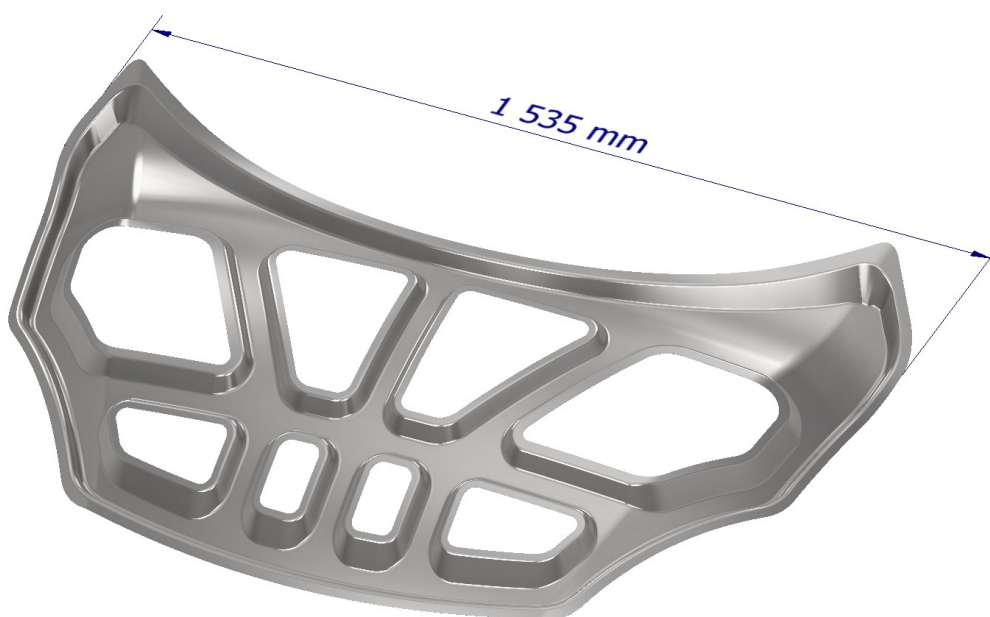
6 KONSTRUKCE MODELU PLECHOVÉHO DÍLU

Předmětem konstrukce je sestava dvou dílů, kterou tvoří pohledová vnější kapota a výztužná vnitřní kapota. Díly jsou navrženy v softwaru CATIA V5 a jsou vytvořeny jako plošné modely, jelikož jsou takto vhodné jako vstupní data do programu AutoForm R8. Pro účely vizualizace jsou na následujících obrázcích zobrazeny ve formě objemových těles.



Obrázek 45 Pohledová kapota

Výztužným prvkem této sestavy je vnitřní část kapoty. Tento díl kopíruje tvar vnější kapoty a je opatřen otvory, které slouží ke krytování, podpěře a odlehčení celé konstrukce.



Obrázek 46 Výztužná kapota

7 PŘEDBĚŽNÁ SIMULACE PROCESU PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ V SOFTWARE AUTOFORM – POHLEDOVÁ KAPOTA

Pohledová kapota představuje konstrukční prvek karoserie automobilu, jehož primární funkcí je zakrytování a ochrana motorového prostoru. Kapota je navržena se zakřivenou geometrií, která je vhodná pro snížení odporu vozidla a zároveň plní estetickou funkci.

7.1 Volba materiálu

Pro pohledovou kapotu je zvolena hliníková slitina série 6xxx. V materiálové databázi softwaru AutoForm jsou k dispozici tři konkrétní varianty této slitiny. Pro všechny tři materiály je v předběžných simulacích zvolena tloušťka plechu 0,8 mm.

Tabulka 5 Porovnání mechanických vlastností vybraných slitin hliníku

Veličina	Jednotka	6181-T4	6016-T4P	6111-T4P
σ_0	[MPa]	111,6	127,4	134,1
R_m	[MPa]	226,8	241,4	301,5
A_g	[%]	20,3	22,3	28,1
n	[-]	0,246	0,241	0,247
r_m	[-]	0,693	0,588	0,675
ε_{10}	[-]	0,192	0,201	0,215

Hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν jsou u všech porovnávaných slitin stejné, a proto nejsou uvedeny v porovnávací tabulce. Modul pružnosti je 70 000 MPa a Poissonův poměr je 0,3.

- Označení písmenem T vyjadřuje, že materiál prošel tepelným zpracováním, případně doplněným deformačním zpevněním. Pro upřesnění tohoto označení se přidávají číslice nebo písmena.
- Označení T4 specifikuje materiál po rozpouštěcím žihání a následném přirozeném stárnutí, v jehož průběhu materiál získává dostatečnou rozměrovou stabilitu.
- Dodatečné označení P značí umělé stárnutí, kterého se dosahuje skladováním při pokojové teplotě po dobu delší než dvou týdnů, za účelem zajištění požadovaných mechanických vlastností. [37]

Níže jsou uvedeny a porovnány vybrané hliníkové slitiny z hlediska chemického složení, protože přítomné legující prvky přímo ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu a zejména jeho tváritelnost. Slitina EN AW-6181-T4 je ve stavu T4, zatímco slitiny EN AW-6016-T4P a EN AW-6111-T4P jsou ve stavu T4P. V následujících analýzách bude posouzeno, jak vhodné jsou zvolené tepelné úpravy pro plošné tváření a jak výrazně konkrétní chemické složení ovlivňuje výslednou tváritelnost.

7.1.1 Materiál EN AW-6181-T4

Tato slitina vykazuje z porovnávaných materiálů nejnižší pevnost, avšak dobré tažné vlastnosti. Ve srovnání s ostatními slitinami obsahuje nejnižší množství Cu, což přispívá k vyšší odolnosti proti korozi, ale současně snižuje právě zmiňovanou mechanickou pevnost.

Tabulka 6 Chemické složení slitiny EN AW-6181-T4 (v % hm.) [38]

Slitina	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6181	0,8–1,2	0,5	0,1	0,15	0,6–1,0	0,1	0,2	0,1

7.1.2 Materiál EN AW-6016-T4P

Tato slitina představuje kompromis mezi pevností a tažností. Obsahuje zvýšené množství Si, Mn a Ti, které zajišťují vysokou pevnost a tažnost na úkor obrobitelnosti.

Tabulka 7 Chemické složení slitiny EN AW-6016-T4P (v % hm.) [39]

Slitina	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6016	1,0–1,5	0,5	0,2	0,5	0,25–0,6	0,1	0,2	0,15

7.1.3 Materiál EN AW-6111-T4P

Z vybraných slitin dosahuje nejvyšší pevnosti v tahu a meze kluzu. Tato vlastnost je dána především zvýšeným obsahem Cu. Po vytvrzení a následném skladování při pokojové teplotě po dobu delší než dva týdny dosáhne slitina stavu T4P.

Tabulka 8 Chemické složení slitiny EN AW-6111-T4P (v % hm.) [40]

Slitina	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6111	0,6–1,1	0,4	0,5–0,9	0,1–0,45	0,5–1,0	0,1	0,15	0,1

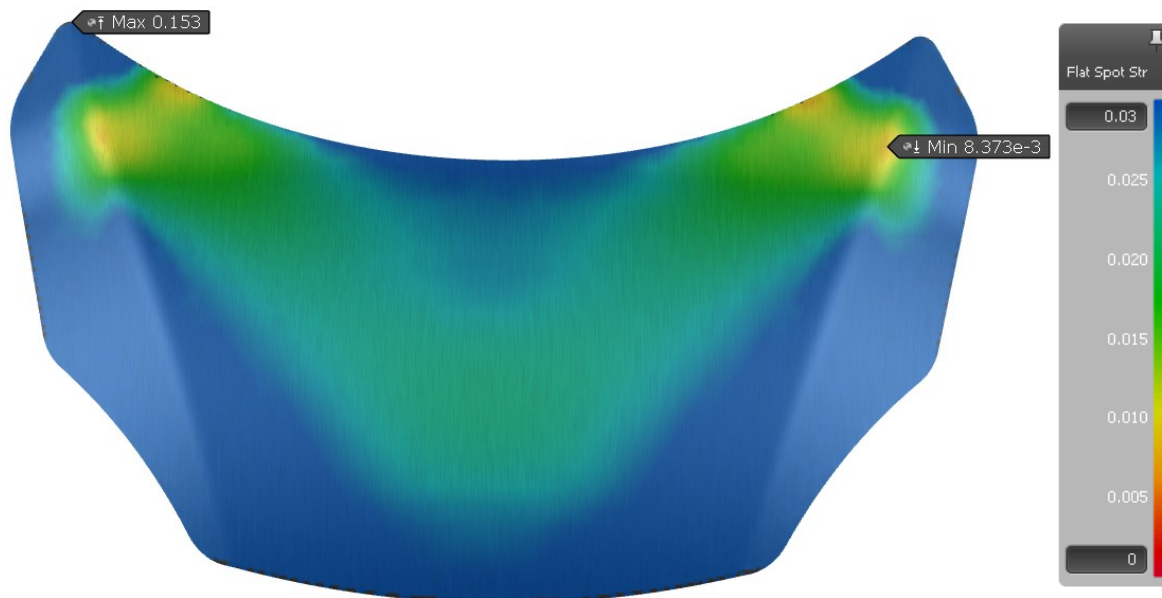
7.2 Diskuze předběžných výsledků

Pro tři vybrané hliníkové slitiny jsou nastaveny specifické simulace. Největším problémem z hlediska přetvoření a trhlin jsou zaoblené okraje kapoty společně s lokálně nepřetvořenou oblastí. V této oblasti nastává výrazný přechod z rovinné na zakřivenou plochu.



Obrázek 47 Znáznornění oblastí pohledové kapoty

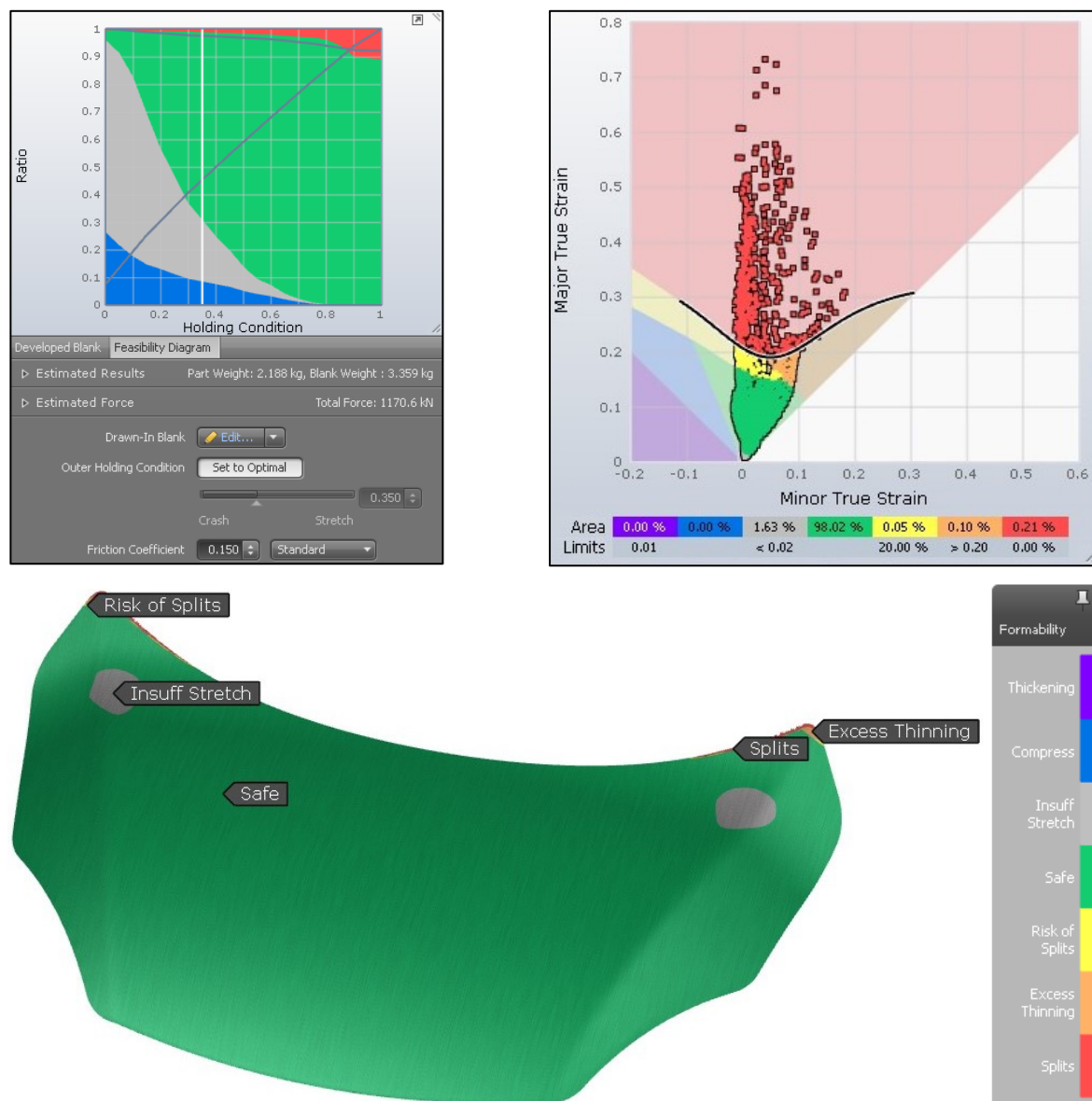
Z hlediska geometrie se jedná o rovinné oblasti, na které je obtížné působit tvářecí silou a zajistit tak jejich přetvoření. V softwaru AutoForm lze tato místa zobrazit použitím analýzy natažení plochých oblastí (Flat Spot Stretch) pomocí barevného mapování s příslušnou stupnicí hodnot. Ve žlutých oblastech s nízkou hodnotou (min. 0,0084) nedochází k výraznému natažení materiálu, což značí výskyt nejvíce plochých míst.



Obrázek 48 Vyhodnocení plochých míst pohledové kapoty

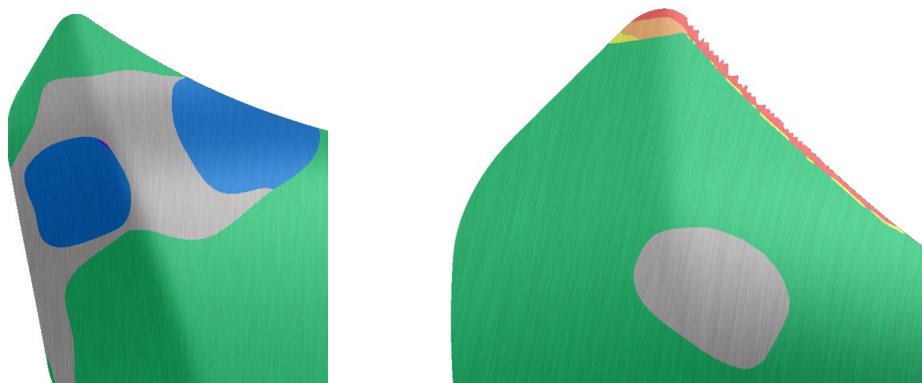
7.2.1 Předběžné výsledky materiálu EN AW-6181-T4_0,8 mm

Slitina EN AW-6181-T4 vykazuje z vybraných materiálů nejméně vhodné přetvoření, kde při překročení 98 % bezpečné hranice dochází ke vzniku trhlin a dalších nežádoucích deformací. Tento výsledek souvisí s nižším obsahem legujících prvků, které méně podporují zpevnění materiálu během plastické deformace.



Obrázek 49 Předběžná analýza tváritelnosti materiálu EN AW-6181-T4_0,8 mm

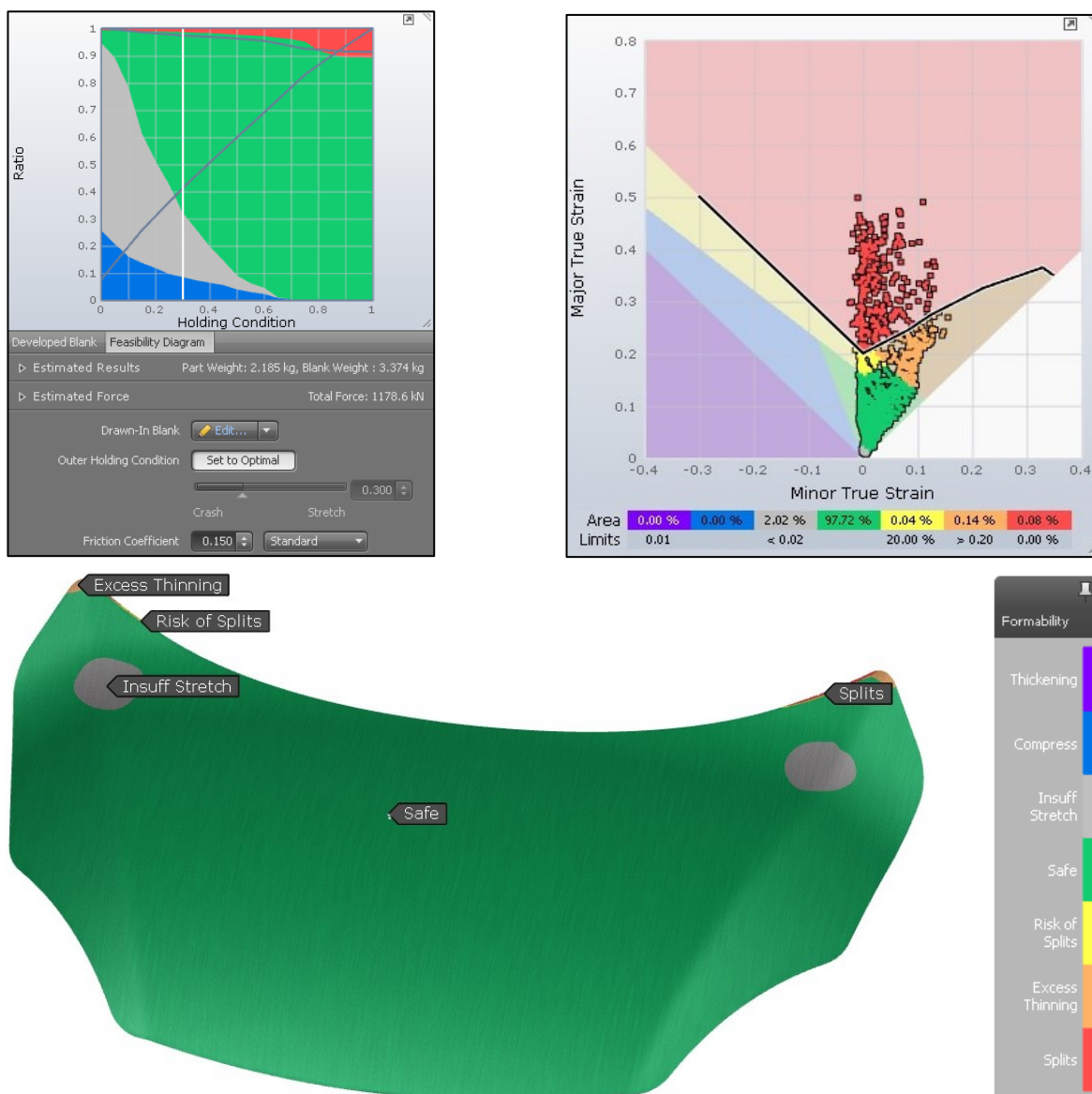
Při snaze snížit přetvoření rohů a dosáhnout bezpečné (zelené) oblasti je u materiálů EN AW-6181-T4 a EN AW-6016-T4P výrazná nepřetvořená (šedá) oblast, která se často vyskytuje společně s oblastí napěchovaného materiálu (modrá). Naopak při působení větší tvářecí síly se tato oblast zmenšuje, avšak důsledkem toho dochází k nepřijatelným trhlinám podél hrany oblouku.



Obrázek 50 Nevhodně přetvořené zóny v místě oblouku

7.2.2 Předběžné výsledky materiálu EN AW-6016-T4P_0,8 mm

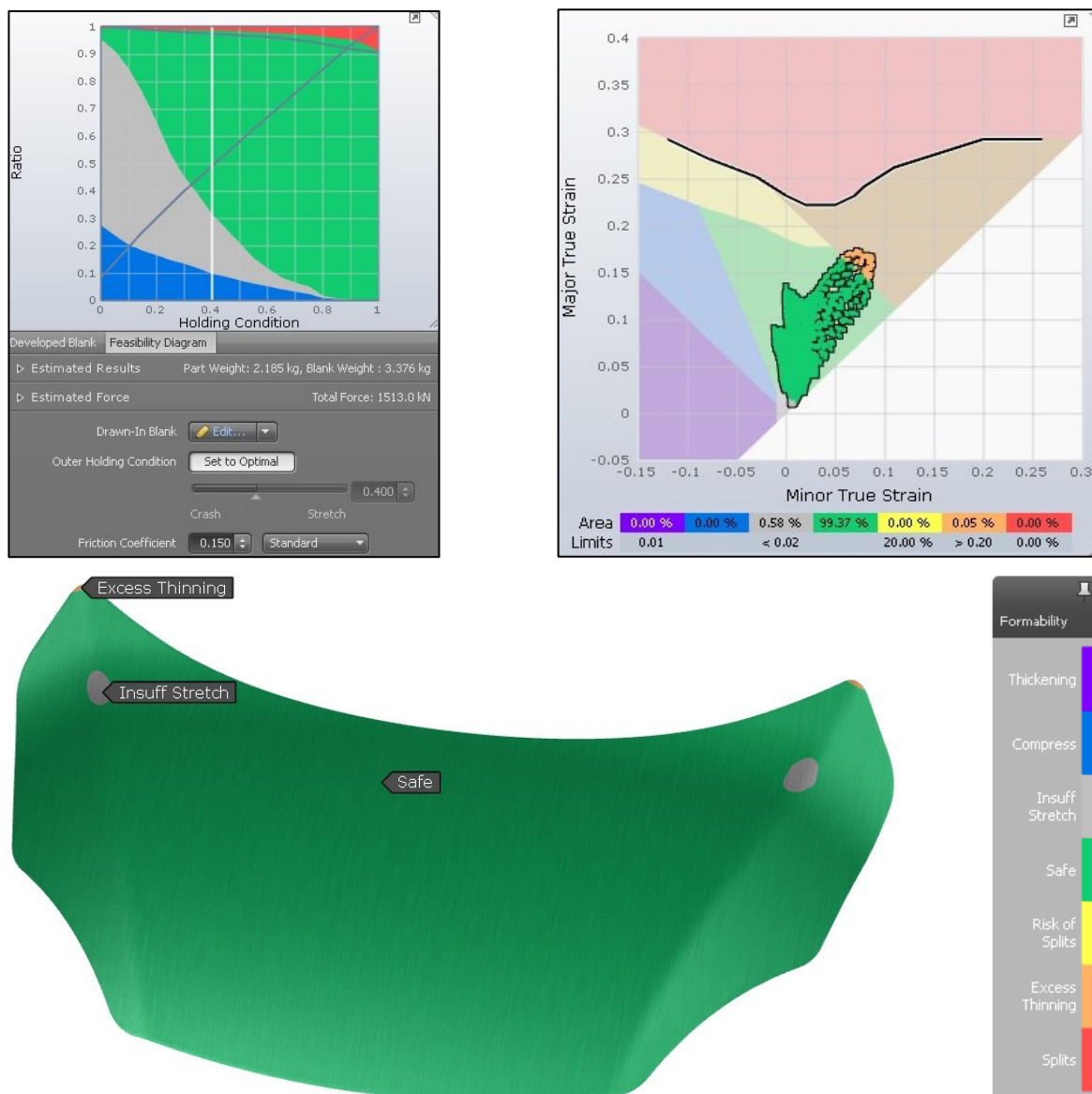
Podobně jako u materiálu EN AW-6181-T4 dochází k nežádoucím deformacím v oblasti oblouku, což poukazuje na omezenou tvářitelnost v kritických místech geometrie dílu.



Obrázek 51 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu EN AW-6016-T4P_0,8 mm

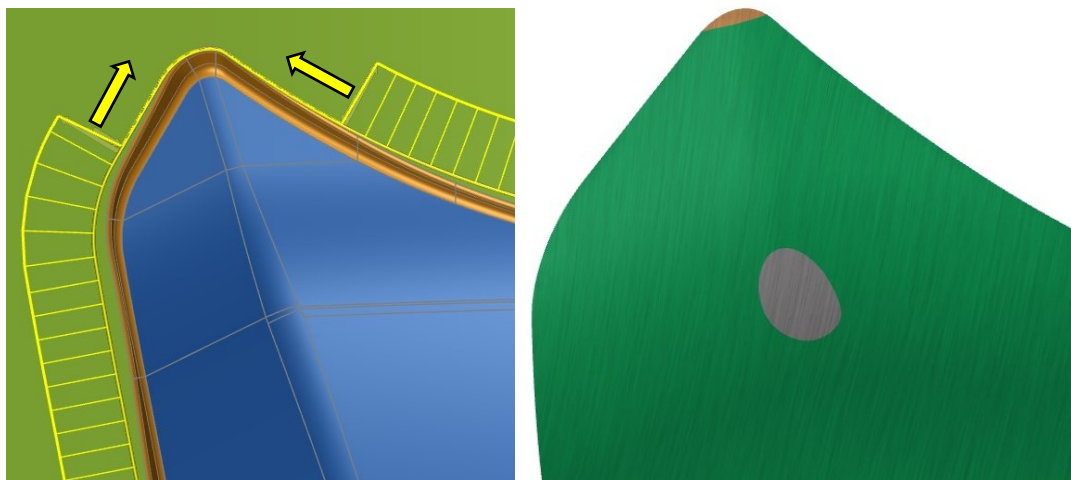
7.2.3 Předběžné výsledky materiálu EN AW-6111-T4P_0,8 mm

Výjimku představuje materiál EN AW-6111-T4P, u kterého jsou dosaženy velmi dobré výsledky bez výrazného porušení. Zvyšování přetvoření je prováděno pomocí brzdných drážek, které jsou postupně posouvány směrem k oblouku.



Obrázek 52 Předběžná analýza tváritelnosti materiálu EN AW-6111-T4P_0,8 mm

Při snaze o eliminaci nepřetvořené šedé oblasti je sice dosaženo postupného zvyšování bezpečného přetvoření, avšak na úkor rozšiřující se oranžové zóny ztenčení v oblouku.



Obrázek 53 Důsledek posouvání brzdných drážek

7.2.4 Porovnání předběžných výsledků pohledové kapoty

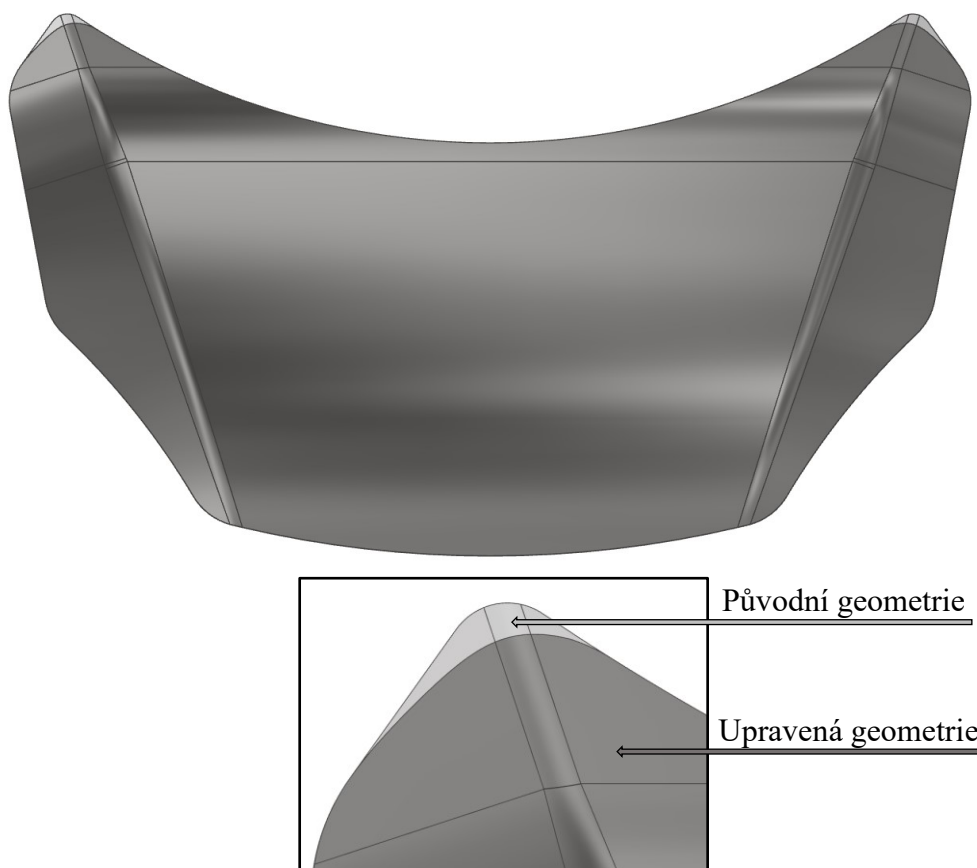
Z předběžných výsledků je patrné, že nejvhodnějším materiálem pro bezpečné přetvoření je slitina hliníku EN AW-6111-T4P, která má zároveň nejlepší mechanické vlastnosti. Z porovnání dosažených výsledků dále vyplývá, že pro optimalizaci jsou vhodnější slitiny s tepelnou úpravou T4P, které mají zároveň zvýšený obsah legujících prvků. Jelikož tato slitina vykazuje nejvhodnější předběžné výsledky, tak pro ni bude po optimalizaci geometrie v kapitole 8 popsáno detailní nastavení simulace.

Tabulka 9 Porovnání předběžných výsledků pro vybrané slitiny hliníku

Kontrolovaná oblast	6181-T4	6016-T4P	6111-T4P
(Tloušťka plechu)	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Oblast porušení (červená)	0,21 %	0,08 %	0,00 %
Oblast ztenčení (oranžová)	0,10 %	0,14 %	0,05 %
Oblast riziková (žlutá)	0,05 %	0,04 %	0,00 %
Oblast bezpečná (zelená)	98,02 %	97,72 %	99,37 %
Oblast nepřetvořená (šedá)	1,63 %	2,02 %	0,58 %

8 OPTIMALIZACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ PLECHOVÉHO DÍLU A VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT – POHLEDOVÁ KAPOTA

Za účelem dosažení vhodného přetvoření a odstranění nežádoucích deformací je v plochách upraven oblouk tak, aby bylo zachováno tangenciální napojení. Současně je jeho poloměr mírně rozšířen. Takto upravená geometrie je následně použita pro další simulace.



Obrázek 54 Úprava geometrie oblouku pohledové kapoty

8.1 Nastavení simulace

V softwaru AutoForm je nastavení parametrů rozděleno do sedmi sekcí. Správně nastavená sekce je označena modrým podtržením, zatímco chybné nebo neúplné nastavení je zvýrazněno červeně. Pokud parametry nejsou zadány, zvýraznění se nezobrazuje. Editovaná sekce má světlý podklad. Při nastavování simulace je postupováno zleva doprava. Stejná pravidla platí i pro jednotlivé záložky, které se nacházejí v rámci každé sekce.



Obrázek 55 Zobrazení sekcí v softwaru AutoForm R8

8.1.1 Sekce Part

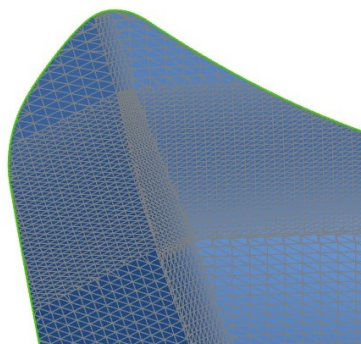
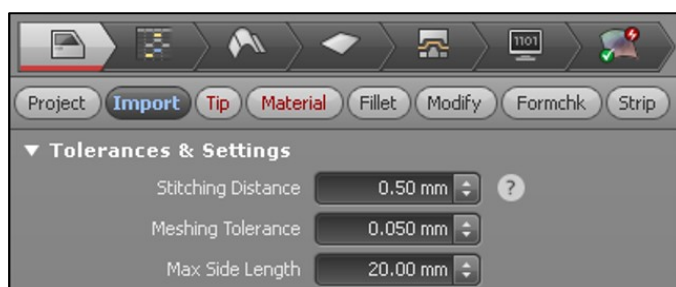
- Import Part – importování geometrie dílu ze souboru.

V první fázi je do softwaru vložena geometrie zadaného dílu prostřednictvím funkce Import Part v záložce **Import**. Následně je určen směr lisování, který je definován kolmo na horní plochu dílu (červená šipka).

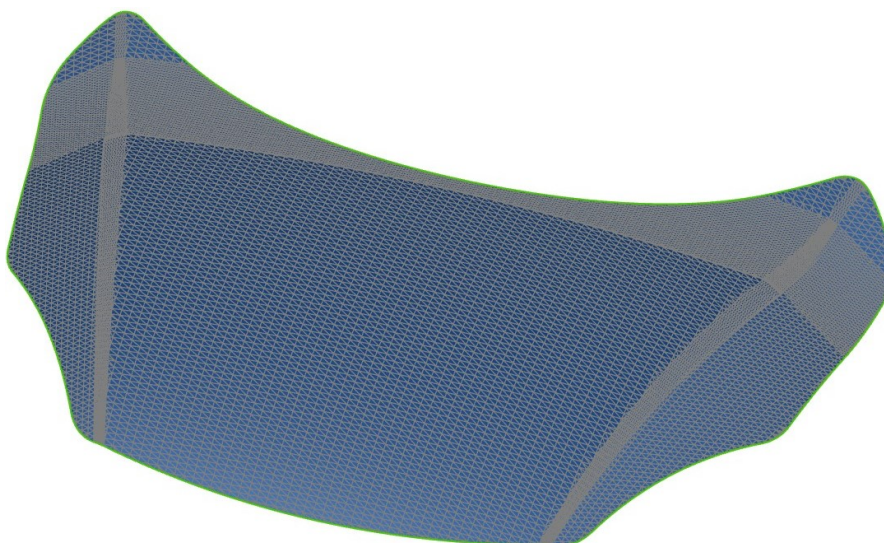


Obrázek 56 Vložení dílu do softwaru AutoForm R8

V softwaru AutoForm je síťování generováno automaticky. Síť je tvořena rovnostrannými trojúhelníky. Výhodou je schopnost softwaru rozpoznat zakřivené plochy a náhlé přechody, v jejichž oblasti je síť automaticky zjemněna.



Obrázek 57 Nastavení parametrů síťování a detail zjemnění

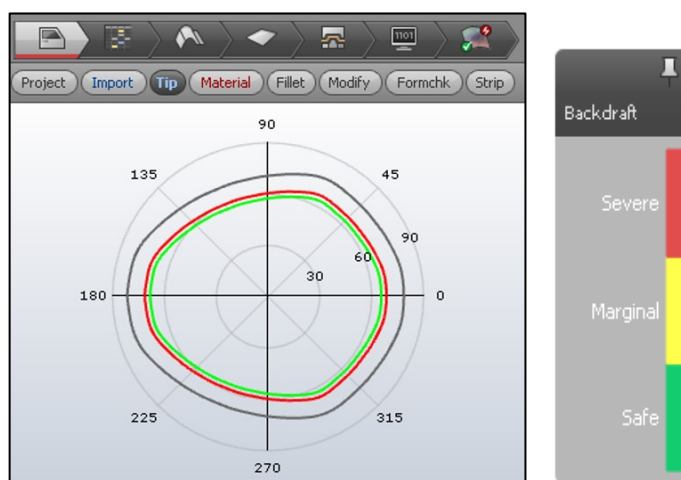


Obrázek 58 Pohledová kapota po vytvoření síťování

- Automatic Tipping – spočítání naklopení a určení pracovního bodu.

Dále je pokračováno v záložce **Tip**. Použije se metoda Automatic Tipping, která analyzuje a optimalizuje pozici a úhel plechového dílu vůči lisovacím nástrojům, tedy i samotnému procesu lisování, a to včetně naklopení.

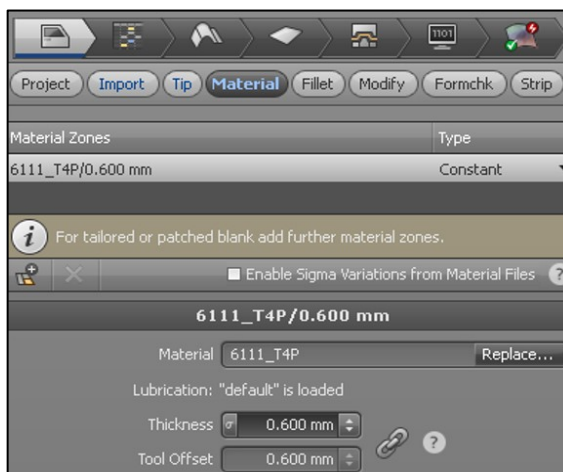
Zobrazí se polární diagram, který vyhodnocuje orientaci dílu. Pro znázornění pozice a směru dílu je přiložen poziční graf. Červená křivka představuje hranici, při jejímž překročení dochází k podřezávání dílu. Jelikož zelená křivka nezasahuje do červené, je zarovnání a naklopení považováno za bezpečné.



Obrázek 59 Polární diagram vyhodnocení podřezání

- Add Material – importování materiálu a definování tloušťky.

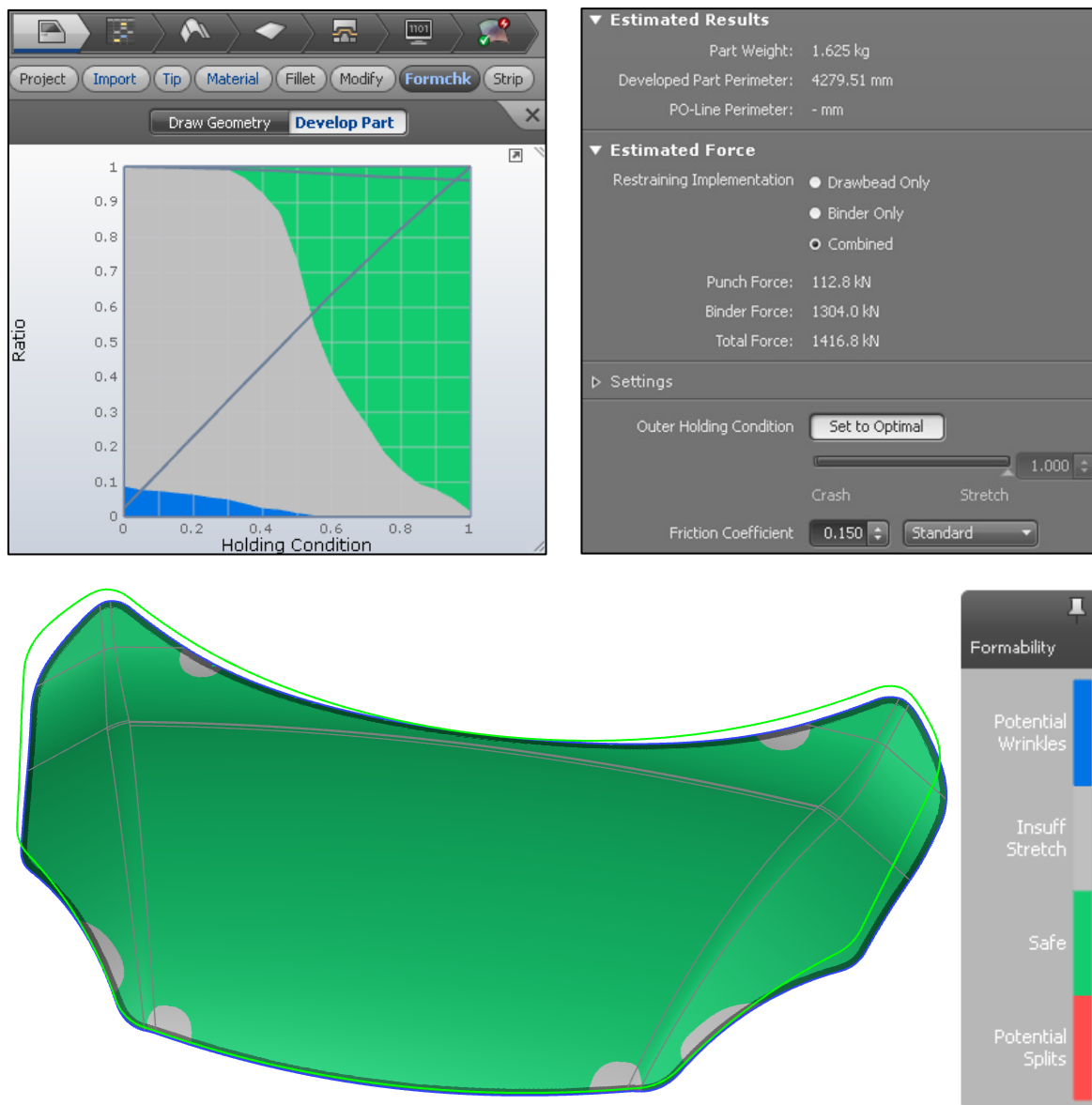
V záložce **Material** je definován konkrétní typ materiálu. Zároveň je pro tento materiál zvolena tloušťka plechu. V této simulaci je použit materiál EN AW-6111-T4P. Na základě předběžných simulací a s ohledem na maximální využití materiálu je tloušťka plechu nastavena na 0,6 mm.



Obrázek 60 Volba materiálu včetně tloušťky

- Draw Parts – definice geometrie tažení, vyvinutí geometrie s přidržovačem.

V záložce **Formchk** je provedena simulace. Touto simulací je ověřena proveditelnost lisování. Přidržovací podmínky jsou nastaveny jako optimální. Cutter Holding Condition definuje přidržovací síly během lisování. Při nízkých hodnotách hrozí zvýšení tvářecí síly a porušení výtažku, při vysokých vznik nežádoucího zvlnění. Třecí koeficient není upraven.



Obrázek 61 Výsledky předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Part

Většina plochy je pokryta zelenou barvou, což potvrzuje bezpečné tváření. Pouze v okrajových částech se objevují modré oblasti signalizující možné zvlnění. Výsledek předběžné analýzy potvrzuje dosavadní vhodné nastavení vstupních parametrů.

8.1.2 Sekce Plan

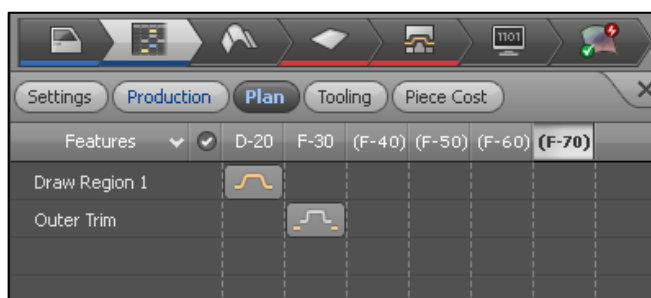
- Create Plan with Custom Press – detekce prvků, výběr lisu a automatické vygenerování plánu operací.

S ohledem na rozměry kapoty je zvolen tvářecí lis PressLine2200T. Tento lis má maximální lisovací sílu 2 200 tun a je využíván hlavně v automobilovém průmyslu pro tváření plechových dílů. Detailní technické parametry lisu jsou uvedeny v PŘÍLOZE P I.

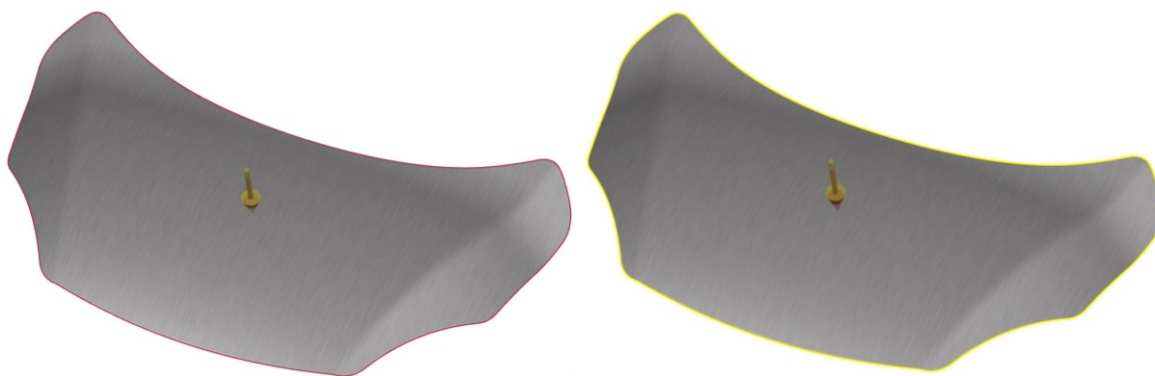
Následně je v kartě **Plan** automaticky vygenerován plán operací. Jednotlivé operace mohou být seskupovány a upravovány tak, aby na sebe vhodně navazovaly.

Vytvořený plán zahrnuje následující operace:

- Draw Region 1 (D-20): tažení dílu, okraj oblasti je označen červenou barvou.
- Outer Trim (F-30): ostříhnutí vnějšího obrysu dílu, zvýrazněno žlutě.

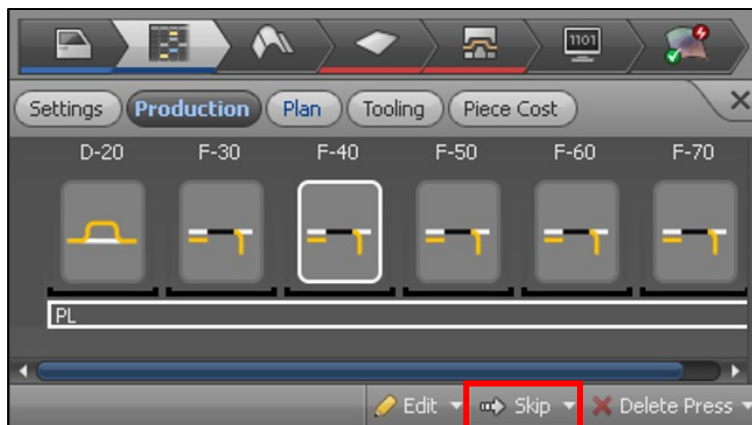


Obrázek 62 Zobrazení plánu operací



Obrázek 63 Zvýraznění tažné a ostříhovací hrany

Jelikož již nejsou definovány další operace (poslední je F-30), je potřeba v záložce **Production** tyto operace přeskočit (skip). Tyto operace jsou poté ohraničeny kulatou závorkou, jelikož jsou vynechány.



Obrázek 64 Přeskočení nepotřebných operací

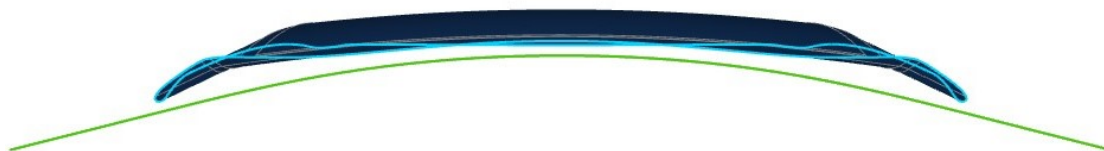
8.1.3 Sekce Die Face

- Die Face – aktivace funkce Die Face pro vygenerování tvářecích geometrií.
- Automatic Binder – automatické vytvoření plochy přidržovače.

Záložka **Binder** slouží k nastavení parametrů přidržovače, jehož úkolem je zajistit optimálnímu upnutí a udržení materiálu během lisování.

V rámci této záložky jsou nastavovány následující parametry:

- Binder Options – Shift: nastavení odsazení přidržovače od dílu. Hodnota odsazení je nastavena na 20 mm za účelem dosažení optimálního rozložení napětí. Vyšší hodnota umožňuje volnější tok materiálu, nižší ho naopak omezuje.
- Add Curve: přidání křivky jako ovládacího prvku přidržovače. Kontrolní křivkou je hraniční křivka součásti (Part Boundary).
- Curve – Weight: nastavení váhy křivky na 0,5. Tento parametr určuje míru předtvoření plechu. Nižší hodnota způsobuje větší předtvoření, vyšší naopak menší. Při nastavení 0,5 vzniká průměrný tvar mezi hranicí plechu a tvarem dílu.



Obrázek 65 Odsazení dílu od předtvořeného plechu

Záložka **Addendum**.

- Add Addendum – vytvoření přechodové plochy podél celého obvodu součásti. Hraniční křivkou je opět obrys dílu (Part Boundary).

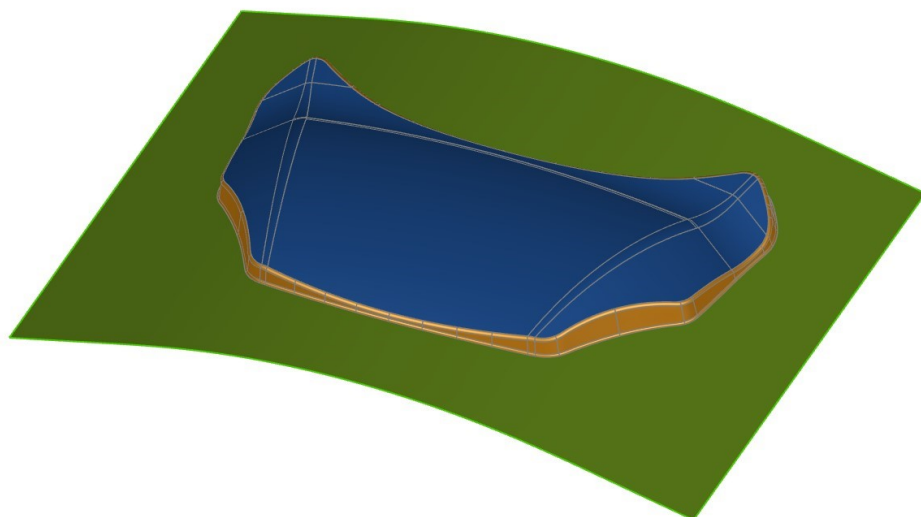
V této záložce se nastavuje přechodová zóna mezi lisovacím nástrojem a tvářeným dílem. Tato oblast, označovaná jako přídavek (Addendum), slouží k usměrnění toku materiálu během tažení. Oranžová křivka představuje navržený profil přídavku. Délka profilu je vypočtena na hodnotu 61,36 mm a odpovídá celkové délce, přes kterou se materiál pohybuje během lisování. Čím větší jsou přechodové rádiusy, tím jednodušší je tažení a nižší riziko vzniku vad. Nastavení hodnot v části Master Profile Type, kde kružnice definují přechodové rádiusy:

- Profile Type – Minimum Punch Opening Width. Nastavení typu křivky s minimální šířkou otvoru razníku.
- Part Radius – náběhový rádius nastaven na 12 mm.
- Die Radius – výběhový rádius nastaven na 7 mm.
- PO Width – minimální šířka otvoru razníku nastavena na hodnotu 18,89 mm.
- Wall Angle – úhel stěny profilu nastaven na 10°.
- Ostatní hodnoty ponechány v základním nastavení.



Obrázek 66 Nastavení parametrů přechodového profilu

Vygenerovaný profil přídavku slouží k vytvoření přechodové zóny na plechovém dílu. Tento profil upravuje tok materiálu a rozložení napětí, minimalizuje defekty, trhliny, nadměrné protažení a optimalizuje tvar dílu s ohledem na výslednou kvalitu povrchu. Přechodová zóna (zvýrazněna oranžovou barvou) je znázorněna níže.

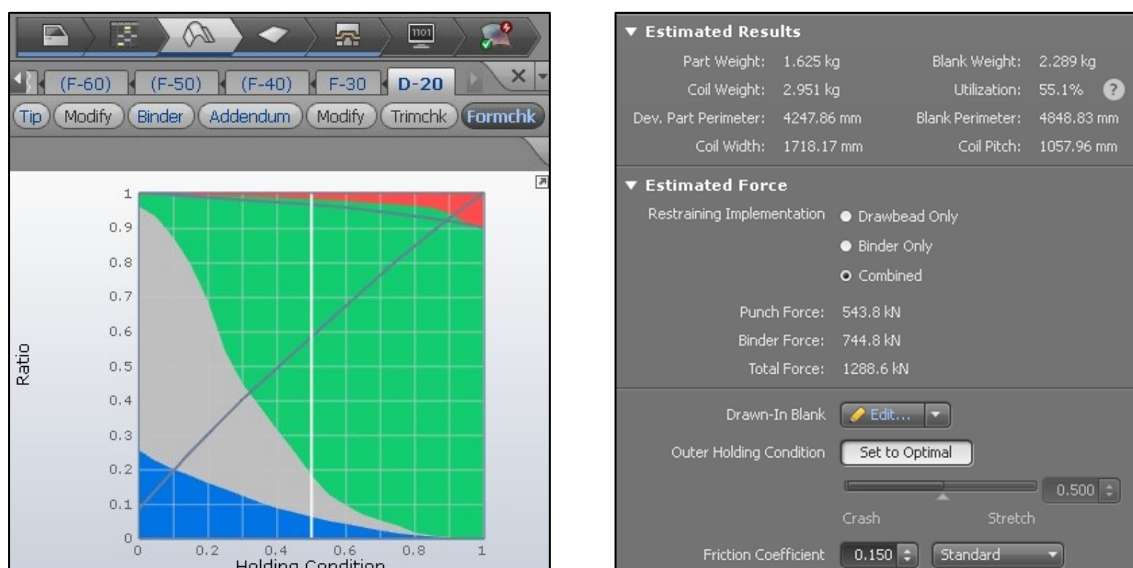


Obrázek 67 Přechodová zóna pohledové kapoty

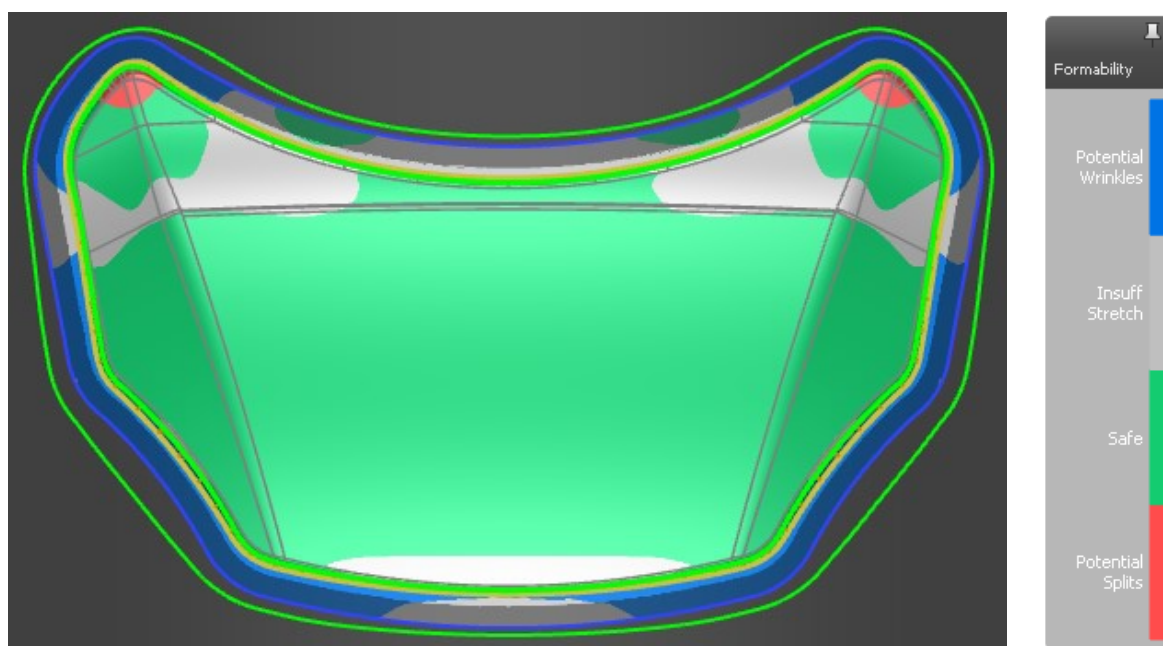
Úprava a modifikace tvaru před lisováním se provádí pomocí záložky **Modify** a operace D-20. V této záložce lze vytvořit přístřihy, popřípadě vyplnit otvory tak, aby při lisování nevznikaly nežádoucí deformace. Při vytvoření přístřihů na pohledové kapotě však bylo v předběžných analýzách zjištěno, že nedošlo k dostatečnému přetvoření.

Poslední záložka v této sekci je **Formchk**, která slouží k detailnější analýze a ověření vhodnosti dosavadního nastavení. Pro dosažení optimálních výsledků je přidržování nastaveno na optimální hodnotu a třecí koeficient je ponechán standardně na 0,150.

Ověření tváritelnosti opět ukazuje, že většina oblasti se nachází v bezpečné zóně, podobně jako u předchozí analýzy. Pouze v oblasti oblouku se vyskytují potenciální trhliny, které ve výsledku nevzniknou. V okrajových zónách přechodové oblasti je většina plochy pokryta modře, což značí potenciální vrásnění. Tato část však bude odstřižena.



Obrázek 68 Nastavení předběžné analýzy tváritelnosti sekce Die Face

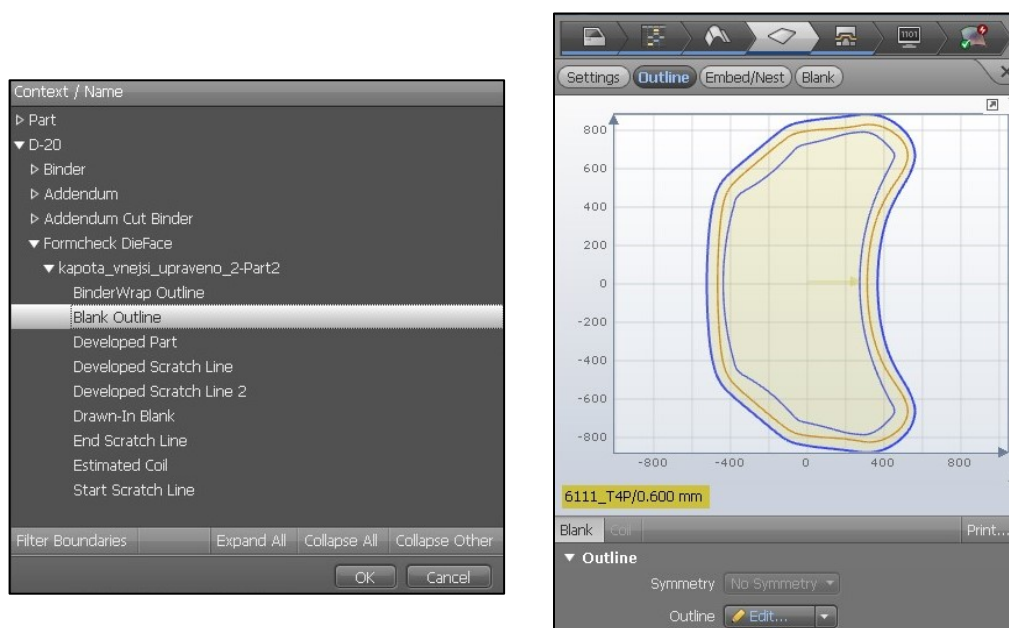


Obrázek 69 Výsledky předběžné analýzy tváritelnosti sekce Die Face

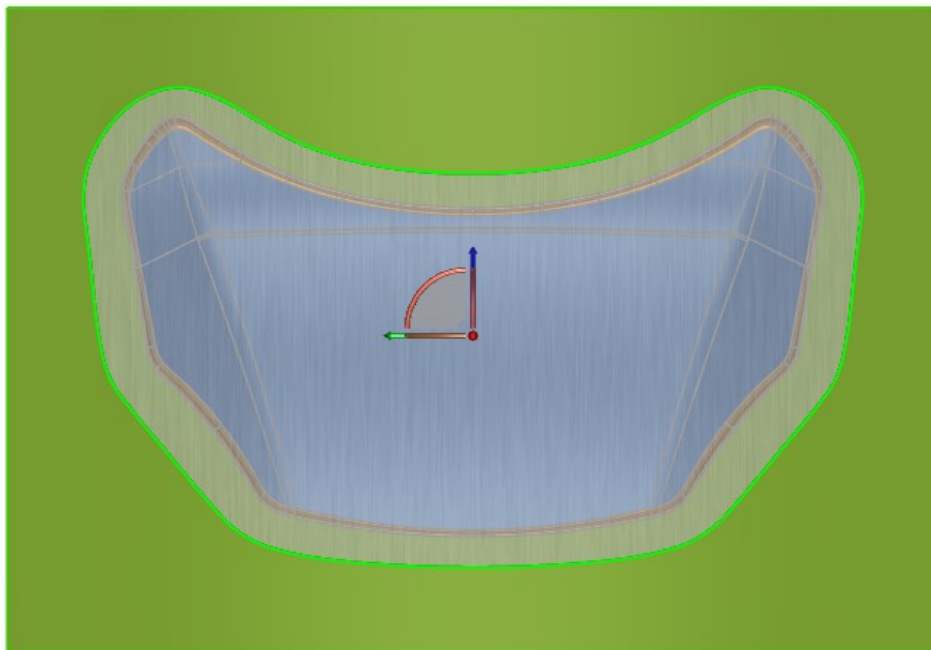
8.1.4 Sekce Blank

- Create Flat Blank – vytvoření plechového polotovaru definovaného 2D obrysem.

V záložce **Outline** je nastaven počáteční tvar a umístění plechu pro lisování. V možnostech se volí Outline → Edit → Blank Outline, který představuje rozvinutý polotovar před tvářením a zohledňuje přírůstky na upnutí. Tento obrys slouží jako vstupní geometrie pro simulaci.



Obrázek 70 Nastavení a výběr obrysu polotovaru



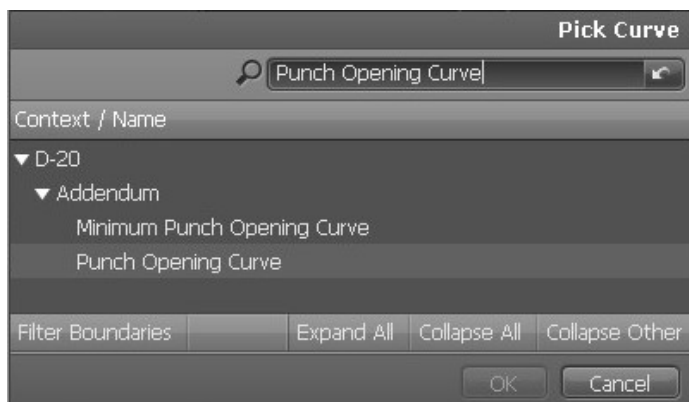
Obrázek 71 Vizualizace obrysu polotovaru

Na kartě **Blank** jsou zobrazeny informace o polotovaru. Využitelnost plechu je 70,6 % a jeho hmotnost je 2,3 kg.

8.1.5 Sekce Process

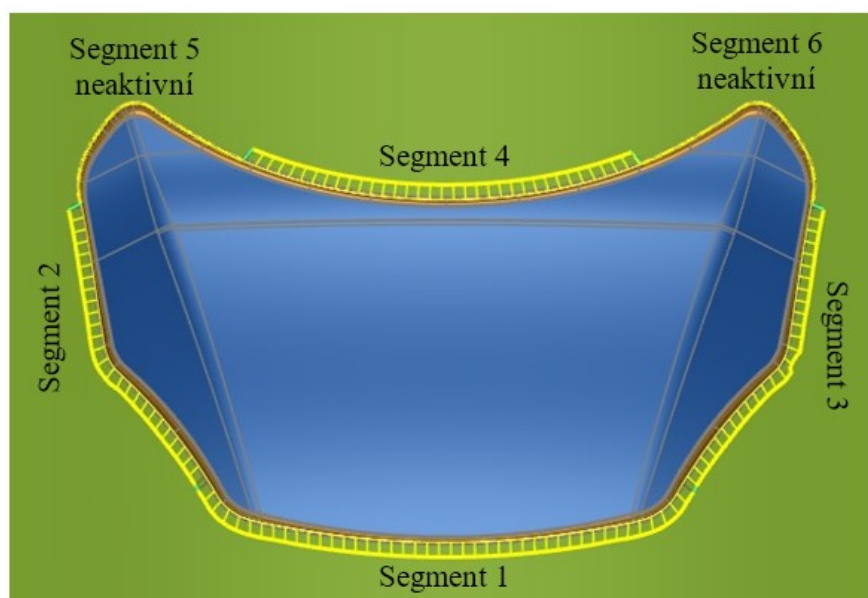
- Adaptive Line Bead – použití křivky profilu k vytvoření adaptivních brzdných drážek během zavírání a tažení

V záložce **Beads** jsou konfigurovány brzdné drážky pro operaci D-20. Tyto drážky jsou generovány na křivce Punch Opening Curve. Typ drážek je zvolen jako Trapezoidal a křivka je rozdělena na šest segmentů. Brzdné drážky jsou definovány na čtyřech z nich.



Obrázek 72 Výběr křivky brzdných drážek

Zvolené brzdné drážky jsou s trapézovým průřezem, který byl odzkoušen a zvolen jako optimální. Pro každý segment je nastavena redukční strategie, která umožňuje regulovat výšku drážek. Drážky zvyšují odpor materiálu a usměrňují tok materiálu během tažení. Jejich adaptivní profil se přizpůsobuje křivce obrysu razníku.



Obrázek 73 Rozdělení segmentů brzdných drážek

Pro všechny segmenty jsou použity shodné parametry na vstupní straně a mírně odlišné na výstupní straně. Nastavení segmentů se liší pouze v detailech, které jsou optimalizovány pro dosažení požadovaného výsledku. Níže je uveden profil Segmentu 1 s jeho parametry.

Drawbead Profile

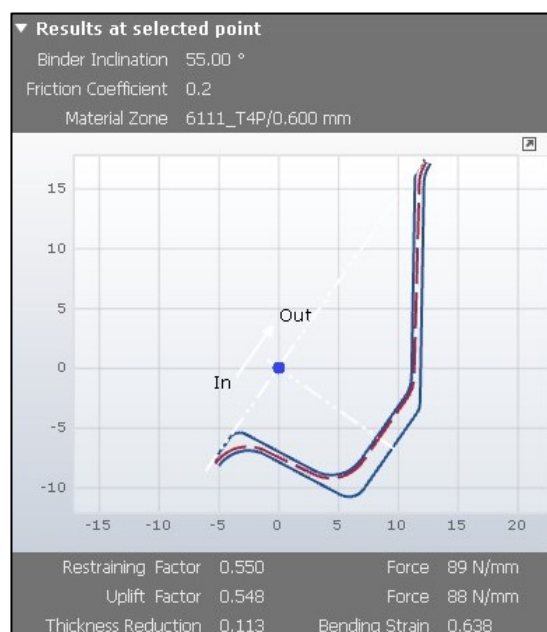
Bead Type ☒ Round ☐ Trapezoidal

Define ☐ Wall Angle ☒ Top and Base Width

▼ **Bead Parameters**

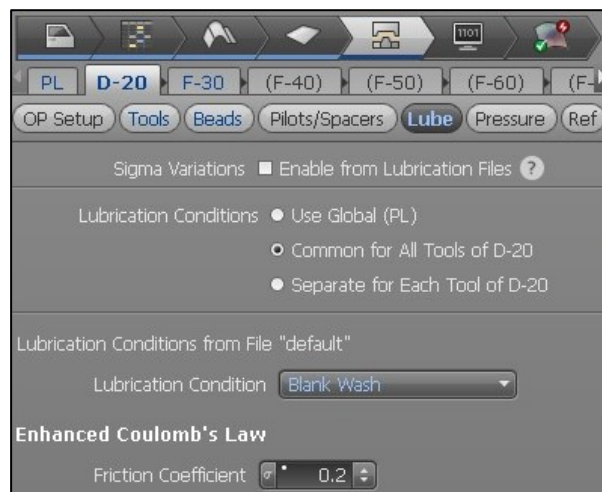
	In	Out	☒ Symmetrical
Wall Angle	7.00 °	56.00 °	
Bead			
Height	10.00 mm		
Top Width	5.00 mm	5.00 mm	
Base Width	6.23 mm	19.83 mm	
Radius	3.00 mm	3.00 mm	
Fillet Radius	1.00 mm		
Groove			
Height	11.00 mm		
Top Width	5.56 mm	3.97 mm	
Base Width	6.91 mm	20.28 mm	
Radius	3.00 mm	3.00 mm	
Inside Radius	1.50 mm		
Clearance			
Top	1.00 mm		
Wall		0.15 mm	

Abs %



Obrázek 74 Nastavení profilu brzdné drážky Segmentu 1

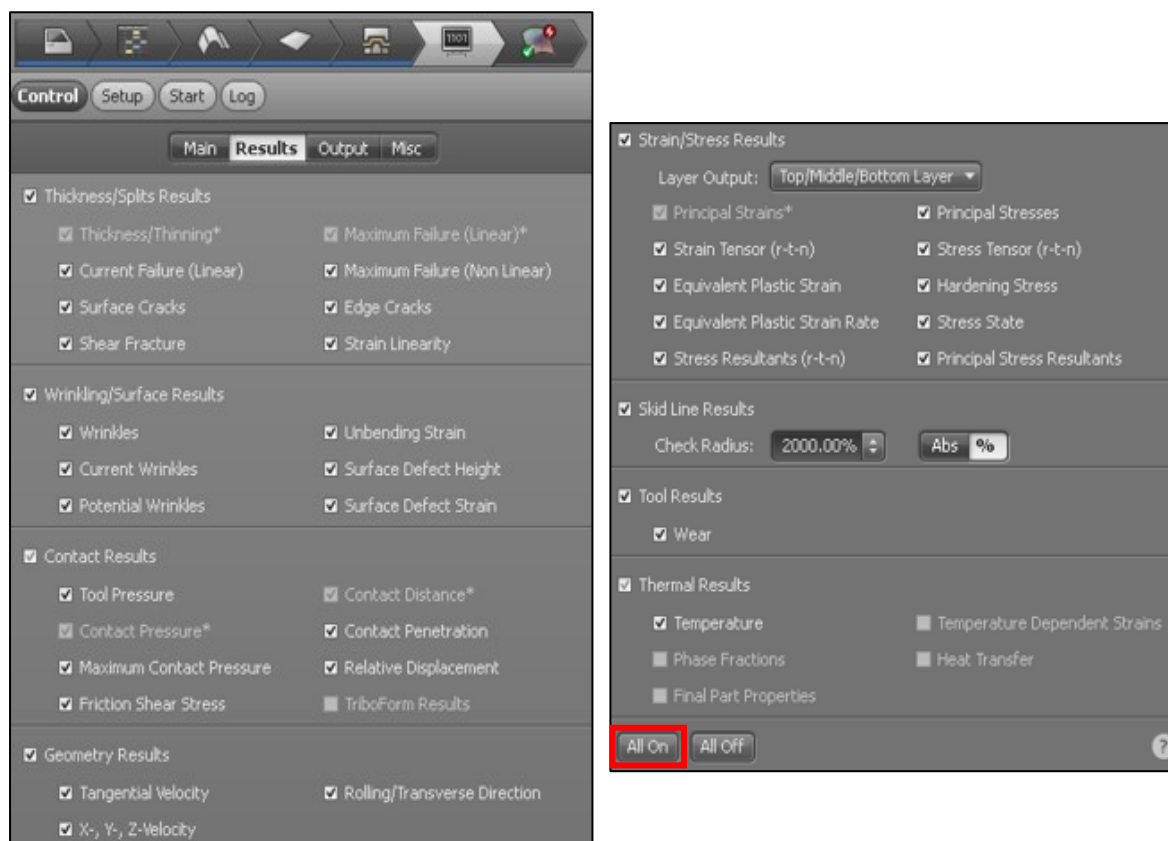
V části **Lube** jsou nastaveny podmínky mazání. Je zvoleno mazivo Blank Wash, které je aplikováno na všechny nástroje D-20 před zpracováním plechu za účelem snížení tření mezi nástrojem a tvářeným plechem. Třecí koeficient tohoto maziva je 0,2.



Obrázek 75 Nastavení podmínek mazání

8.1.6 Sekce Simulation

Po tomto definovaném postupu uvedeném výše následuje výpočet. Po vypočítání simulace je nutné provést refresh programu. Následně jsou vygenerovány veškeré potřebné výsledky.



Obrázek 76 Výběr požadovaných výsledků simulace

8.1.7 Sekce Evaluation

V sekci **Evaluation** jsou zobrazeny předem vybrané výsledky simulace. Vyhodnocení lze provádět po jednotlivých operacích, avšak pro správné posouzení je vhodné hodnotit výsledky dosažené po finální operaci F-30.

8.2 Vyhodnocení jednotlivých variant

V této části jsou zhodnoceny výsledky simulace tváření pohledové kapoty. Vyhodnocení se zaměřuje na klíčové parametry, jako je tvářitelnost dílu, ztenčení plechu, riziko porušení materiálu a vznik vad, včetně vrásnění a zvlnění. Důraz je kladen na kritické oblasti s možným výskytem technologických problémů.

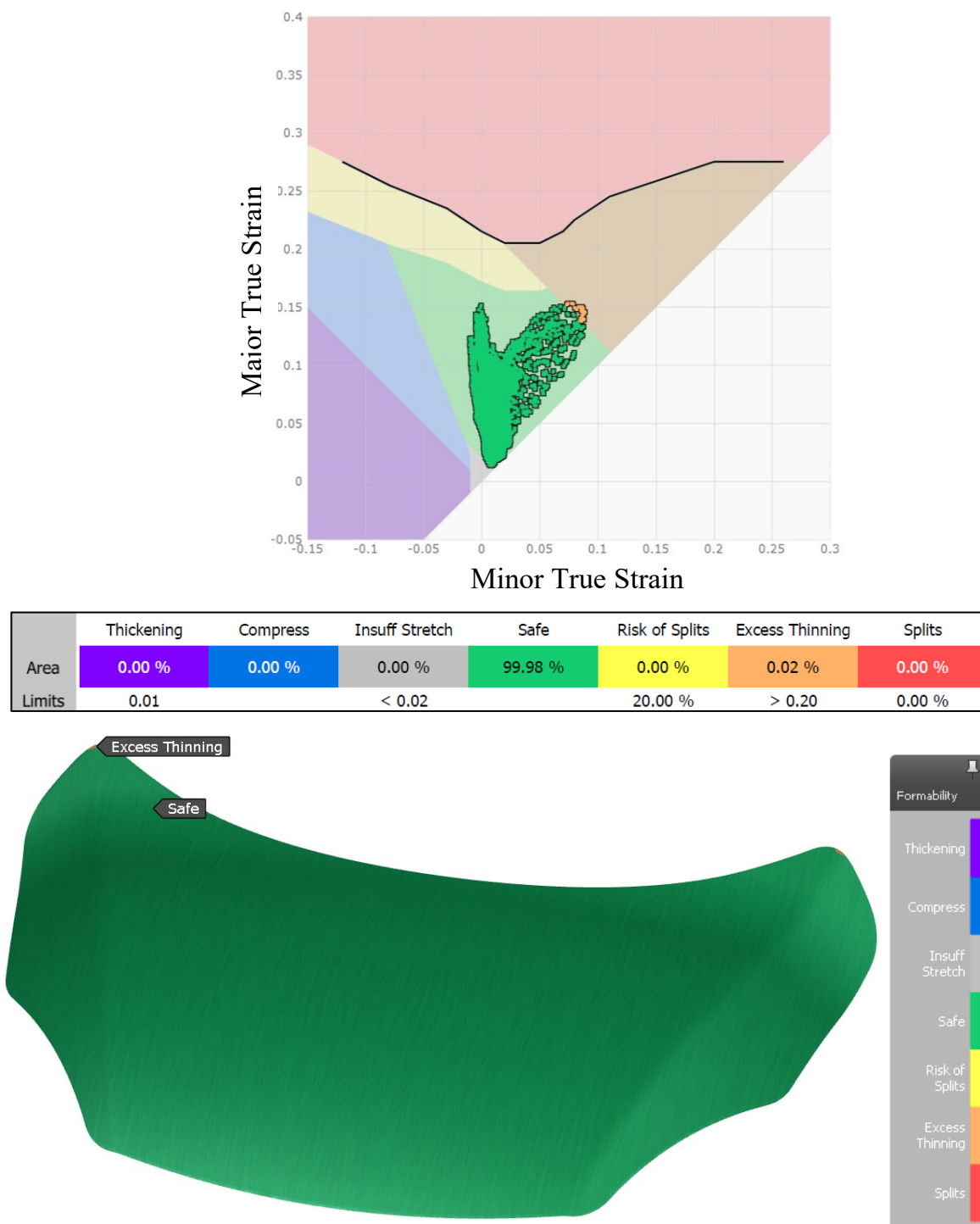
Vyhodnocení je rozčleněno do podkapitol, které obsahují detailní analýzu výsledků pro materiál EN AW-6111-T4P, jehož nastavení simulace bylo popsáno v předchozí části práce. Následně jsou popsány optimalizované výsledky pro zbylé dva materiály, tedy pro EN AW-6181-T4 a EN AW-6016-T4P.

Je nutné brát v úvahu, že pro níže popisované analýzy se hodnoty ztenčení a porušení pohybují blízko stanovených mezních hodnot, a to především z důvodu dosažení minimální možné tloušťky plechu. Pokud by se tloušťka zvětšovala, tak by hodnoty uvedené při vyhodnocení nebyly tak hraniční. S každým zvýšením tloušťky o 0,1 mm se hmotnost zvětšuje o 0,28 kg, ale přetvoření při uvedeném nastavení zůstává stále nad hranicí 99,72 %.

Naopak snížení tloušťky pod hodnotu 0,6 mm není přípustné, jelikož by nebyly splněny stanovené podmínky. Zároveň by tenčí materiál vedl k vyššímu riziku promáčknutí, značnému snížení tuhosti a náchylnosti k deformaci při manipulaci a provozu.

8.2.1 Vyhodnocení tvářitelnosti

Z výsledků simulace vyplývá, že optimalizací parametrů se podařilo dosáhnout bezpečného přetvoření na 99,98 % plochy dílu. Zbýlých 0,02 % se nachází v oranžové zóně, která zobrazuje riziko nadměrného ztenčení. Tímto nastavením jsou zároveň eliminovány ploché oblasti, které v předběžných výsledcích zůstávaly bez přetvoření. V oblasti hran oblouků se již zároveň nevyskytují trhliny. Přetvoření je z hlediska tvářitelnosti vyhovující.

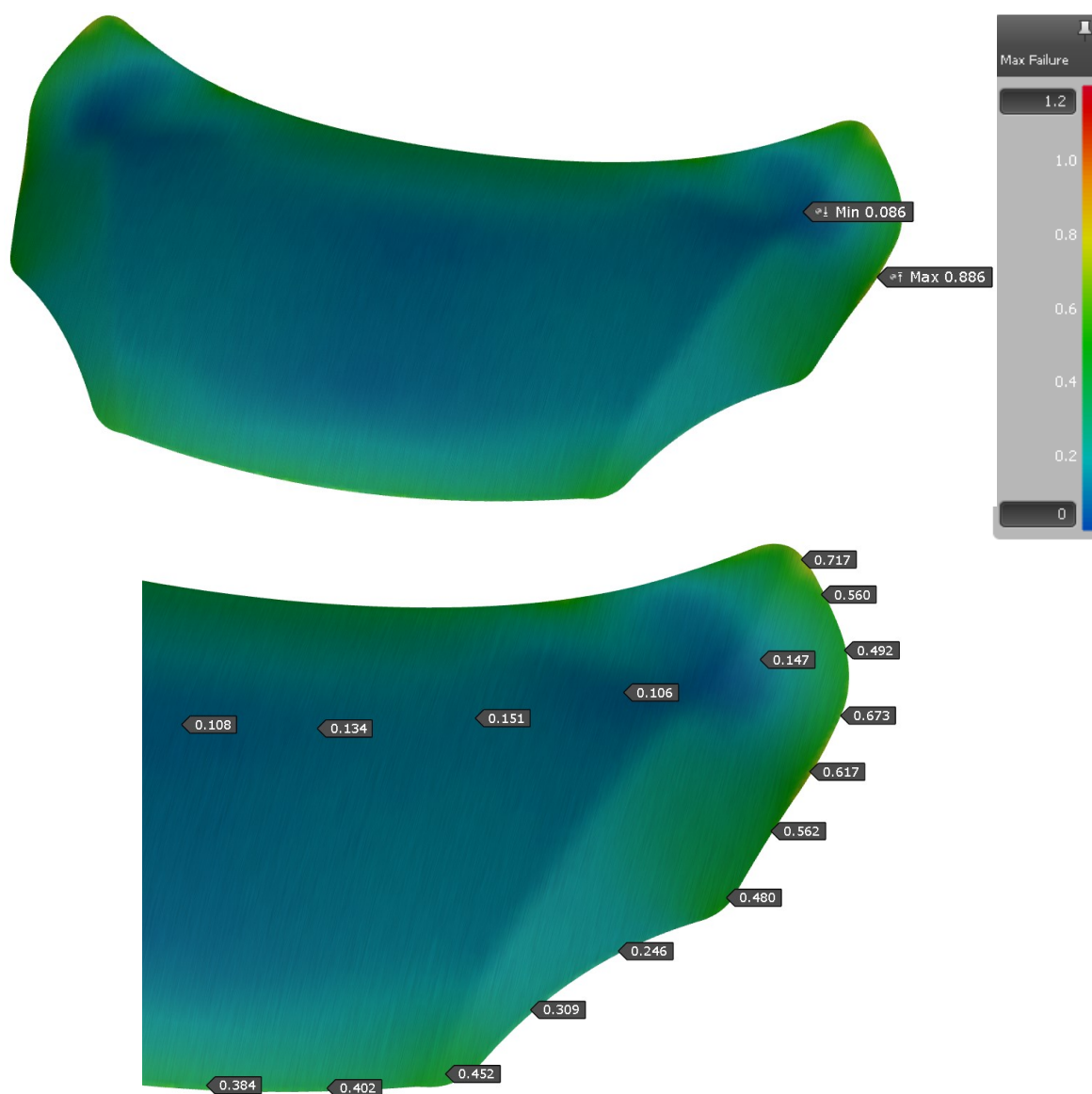


Obrázek 77 Vyhodnocení tvářitelnosti pohledové kapoty

8.2.2 Vyhodnocení porušení

Výsledkem analýzy je zobrazení míst s nejvyšším rizikem porušení materiálu. Kritická hodnota ukazatele rizika je stanovena na 1, přičemž při překročení hodnoty 0,8 se zvyšuje riziko odtržení. Vnitřní část kapoty je v modré oblasti, což odpovídá hodnotám přibližně 0,2, tedy minimálnímu riziku porušení. Při přibližování k okrajům dílu se hodnota ukazatele zvyšuje a oblast se mění na zelenou, s hodnotami kolem 0,6 až 0,7, což je stále v toleranci.

Překročení mezní hodnoty nastává lokálně na hraně výlisku s maximální hodnotou 0,886. Přestože dochází k jejímu překročení hodnoty, analýza neprokázala vznik porušení ani odtržení materiálu. Výsledky proto potvrzují, že z hlediska rizika porušení je návrh vyhovující.

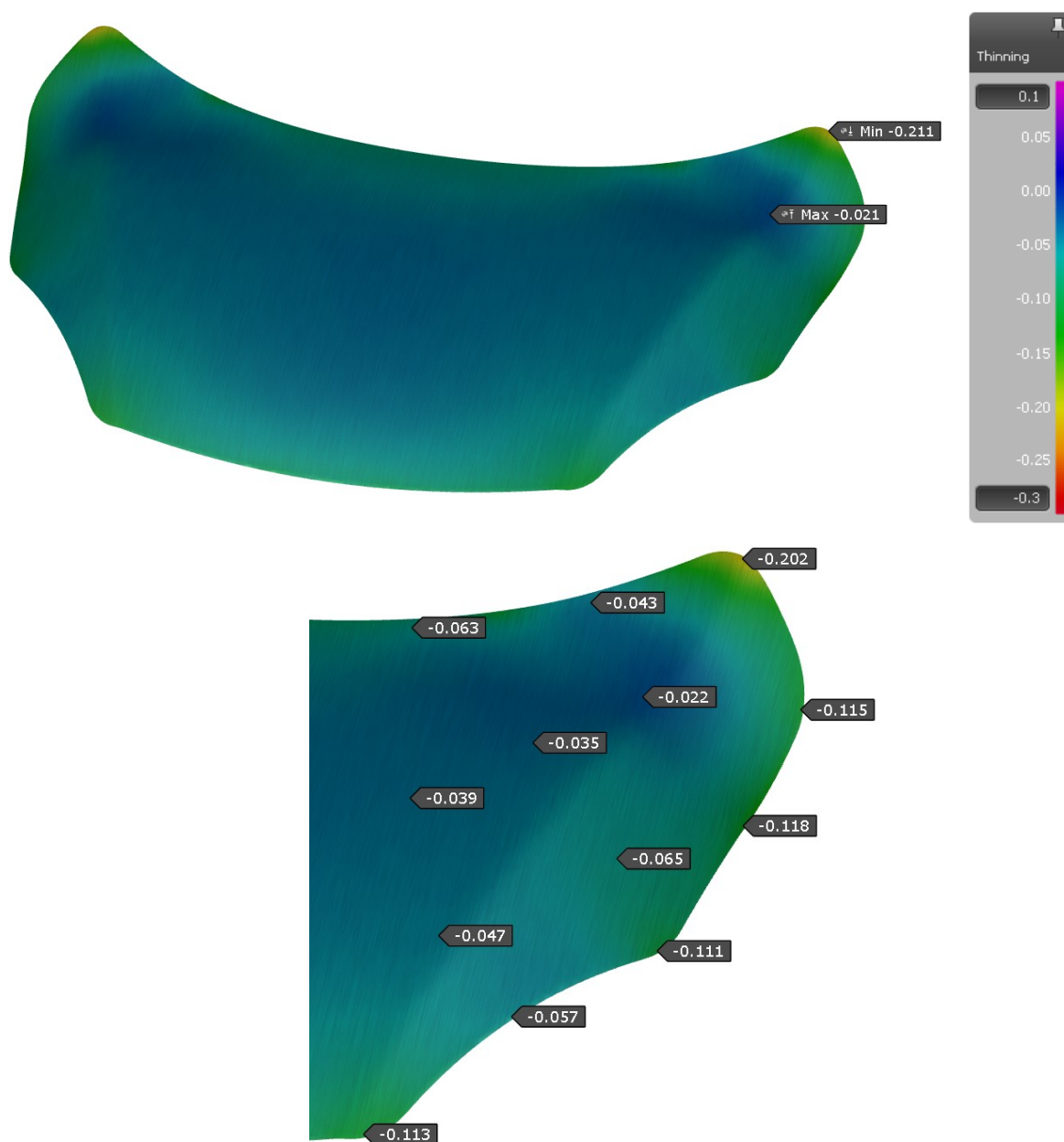


Obrázek 78 Vyhodnocení porušení pohledové kapoty

8.2.3 Vyhodnocení ztenčení

Analýza udává procentuální změnu tloušťky plechu. Největší ztenčení je ve žlutě zvýrazněné oblasti oblouku s hodnotou -0,211, což odpovídá ztenčení o 21,1 %. Naopak nejmenší ztenčení se vyskytuje v místech s hodnotou -0,021, což odpovídá 2,1 % ztenčení. Jelikož jsou obě hodnoty záporné, dochází ke ztenčení v celé ploše výlisku.

Kromě okrajů se hodnoty pohybují přibližně kolem -0,05, s postupným přechodem do zelené oblasti na hranách, kde ztenčení dosahuje hodnot -0,1. Stanovená hraniční hodnota 25 % není překročena, podmínka pro maximální přípustné ztenčení je tedy splněna.



Obrázek 79 Vyhodnocení ztenčení pohledové kapoty

8.2.4 Vyhodnocení zvlnění

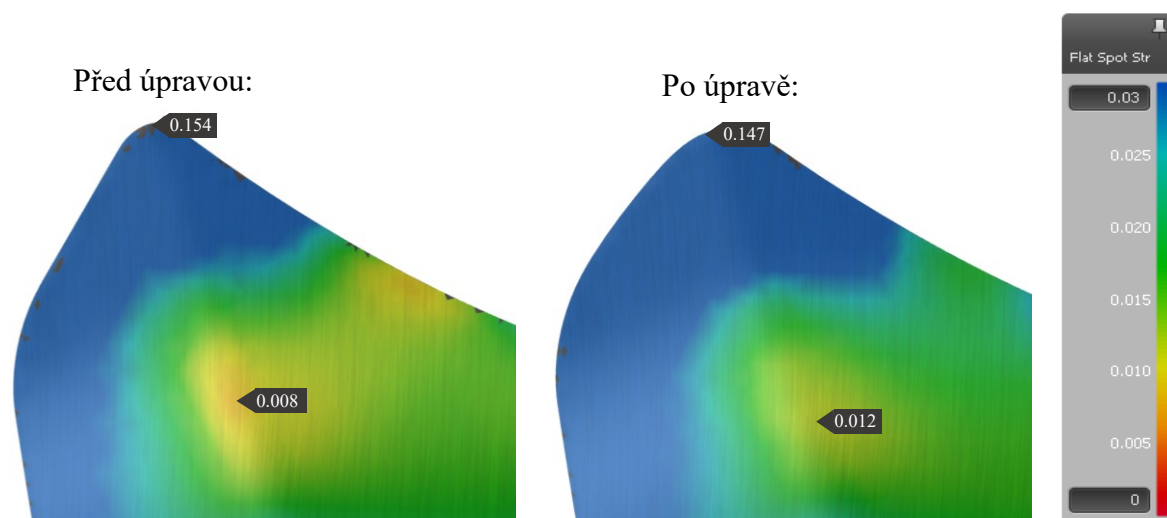
Na základě výsledků analýzy ztenčení, při které nedochází k napěchování materiálu, lze očekávat minimální riziko vzniku zvlnění, které vzniká právě v místech s lokálním napěchováním materiálu. U pohledové kapoty je maximální hodnota zvlnění 0,0018, což odpovídá 0,18 %. Při porovnání s kritickou hodnotou, která je pro rovinné oblasti 30 %, je podmínka splněna. Zvlnění výlisku je v tomto případě zanedbatelné.



Obrázek 80 Vyhodnocení zvlnění pohledové kapoty

8.2.5 Porovnání dosažených výsledků

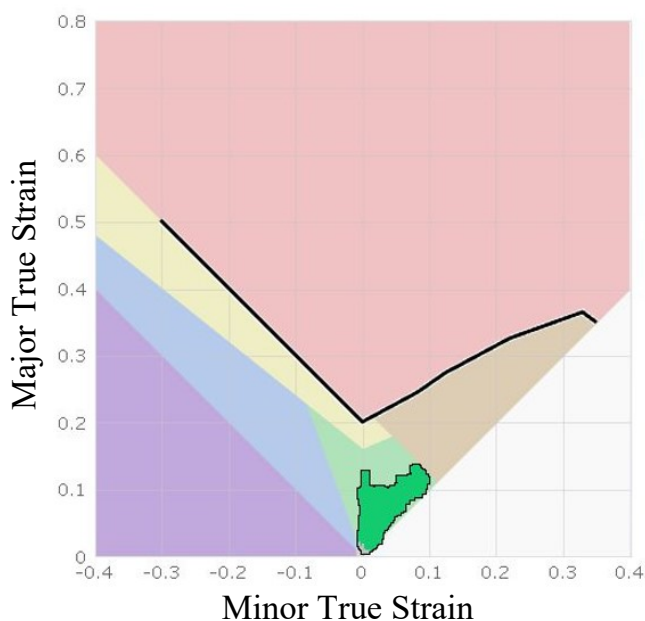
U materiálu EN AW-6111-T4P je dosaženo kompletního přetvoření. K tomu napomáhá úprava geometrie, díky které jsou více natažena plochá místa, a naopak záměrně méně natažená jsou místa v oblasti oblouku, aby nevznikaly nežádoucí deformace.



Obrázek 81 Porovnání plochých míst vlivem úpravy geometrie

Vyhodnocení materiálu EN AW-6016-T4P_0,6 mm

Další vhodnou variantou je materiál EN AW-6016-T4P. Úpravou geometrie oblouků je u tohoto materiálu dosaženo bezpečného přetvoření bez jakýchkoliv vad. Uvedené výsledky platí pro tloušťku 0,6 mm. Jedinou nevýhodou jsou lokální nepřetvořené ploché oblasti, jejichž výsledná šedá oblast je 1,95 %. Naopak výsledná zelená bezpečná oblast je 98,05 %. Tato varianta zároveň splňuje veškeré stanovené hraniční podmínky. Porušení: min. 6,5 %, max. 62,7 %. Ztenčení: min. 1,5 %, max. 19,2 %. Zvlnění: max. 2,8 %.



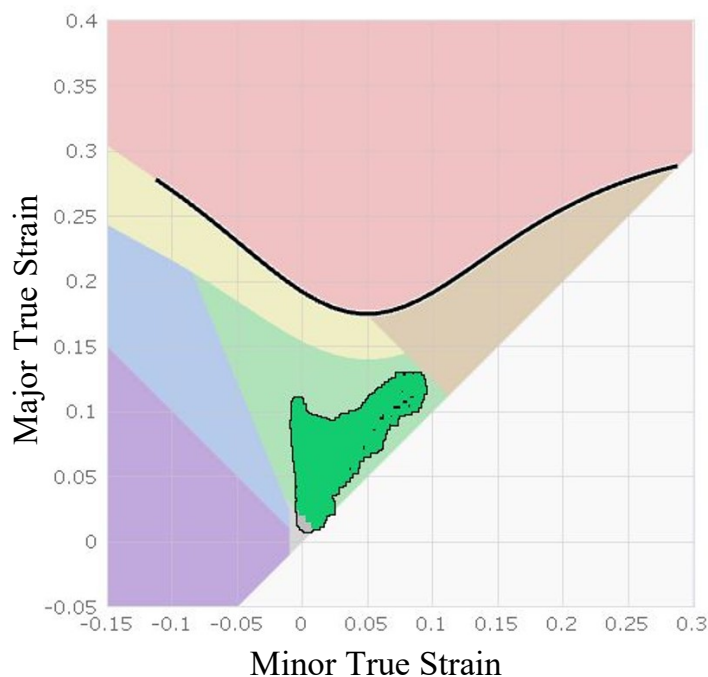
	Thickening	Compress	Insuff Stretch	Safe	Risk of Splits	Excess Thinning	Splits
Area	0.00 %	0.00 %	1.95 %	98.05 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Limits	0.01		< 0.02		20.00 %	> 0.20	0.00 %



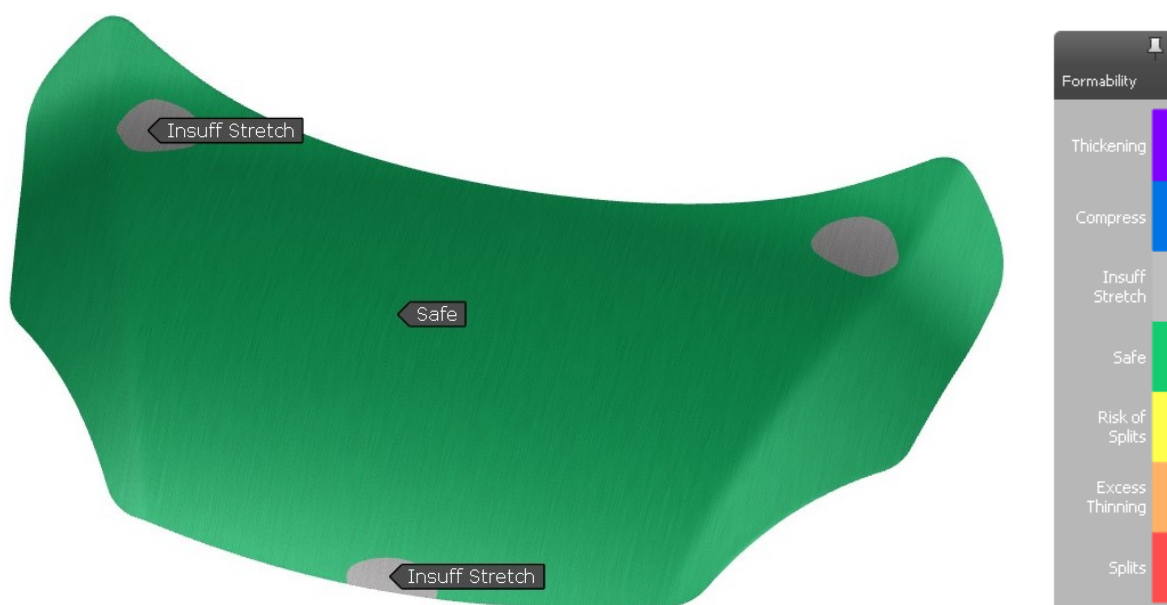
Obrázek 82 Optimalizace materiálu EN AW-6016-T4P_0,6 mm

Vyhodnocení materiálu EN AW-6181-T4_0,6 mm

Jak již napovídala předběžná analýza, nejméně vhodnou variantou se potvrdil materiál EN AW-6181-T4. Jeho výsledky jsou horší ve srovnání s ostatními dvěma materiály, ale stále vyhovují požadavkům. Konkrétně 97,19 % bezpečného přetvoření a 2,81 % oblasti bez přetvoření. Porušení: min. 7,0 %, max. 79,2 %. Ztenčení: min. 1,4 %, max. 19,4 %. Zvlnění: max. 1,2 %.



	Thickening	Compress	Insuff Stretch	Safe	Risk of Splits	Excess Thinning	Splits
Area	0.00 %	0.00 %	2.81 %	97.19 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Limits	0.01		< 0.02		20.00 %	> 0.20	0.00 %



Obrázek 83 Optimalizace materiálu EN AW-6181-T4_0,6 mm

9 PŘEDBĚŽNÁ SIMULACE PROCESU PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ V SOFTWARE AUTOFORM – VÝZTUŽNÁ KAPOTA

Hlavní funkcí výztužné kapoty je zvýšení pevnosti, tuhosti a celkové bezpečnosti. Součást zároveň kopíruje geometrii pohledové kapoty s mírným odsazením.

9.1 Volba materiálu

Pro výztužnou část kapoty automobilu se běžně používají nízkolegované oceli, které představují kompromis mezi pevností, bezpečností a náklady. V této práci jsou zvoleny oceli DX56D+Z a DC04. Pro účely porovnání simulací je taktéž zvolena vysokopevnostní ocel DP450, která se využívá při speciálních aplikacích.

Tabulka 10 Porovnání mechanických vlastností vybraných ocelí

Veličina	Jednotka	DX56D+Z	DC04	DP450
σ_0	[MPa]	157,1	167,9	271,8
R_m	[MPa]	298,0	303,5	489,7
A_g	[%]	26,7	25,3	18,8
n	[-]	0,226	0,211	0,220
r_m	[-]	2,002	1,650	1,030
ε_{10}	[-]	0,362	0,386	0,228

Hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν jsou u všech porovnávaných ocelí stejné, a proto nejsou uvedeny v porovnávací tabulce. Modul pružnosti je 210 000 MPa a Poissonův poměr je 0,3.

- Označení DX značí plochou ocel. Číslo 56 je kódové označení pevnostní třídy. Písmeno D označuje tvářecí stupeň Deep Drawing (hluboké tažení). Označení spadá pod normu EN 10346:2015. [41]
- Označení DC označuje Drawing Class (třída oceli určenou pro tváření). Číslo 04 určuje úroveň tvářitelnosti. Čím vyšší číslo, tím lepší tvářitelnost. Označení odpovídá normě EN 10152:2017. [42]
- Označení DP představuje dvoufázové oceli. Číslo 450 udává minimální zaručenou pevnost v tahu 450 MPa. [24]

9.1.1 Materiál DX56D+Z podle EN 10346, číselné označení 1.0963

V automobilovém průmyslu se ocel DX56D+Z používá pro výrobu složitých tvarů hlubokým tažením. Díky výborné tvářitelnosti se uplatňuje při lisování přesných částí karoserie automobilu. Povrch oceli je chráněn žárovým zinkováním, které zajišťuje vysokou odolnost proti korozi. Obsah titanu navíc zlepšuje plasticitu materiálu.

Tabulka 11 Chemické složení oceli DX56D+Z (v % hm.) [43]

Ocel	C	Si	Mn	P	S	Ti
DX56D	0,12	0,50	0,60	0,10	0,045	0,30

9.1.2 Materiál DC04 podle EN 10130, číselné označení 1.0338

Ocel DC04 je nízkouhlíkový materiál vhodný pro hluboké tažení a výrobu tvarově složitých dílů. Vyznačuje se vynikající tvářitelností, přesnými rozměrovými tolerancemi a dostupností s žárovým nebo galvanickým zinkováním, které zajišťuje odolnost proti korozi a vhodné vlastnosti pro následnou povrchovou úpravu.

Tabulka 12 Chemické složení oceli DC04 (v % hm.) [44]

Ocel	C	Mn	P	S
DC04	0,08	0,40	0,03	0,03

9.1.3 Materiál HCT450X+Z podle EN 10346, obchodní název DP450

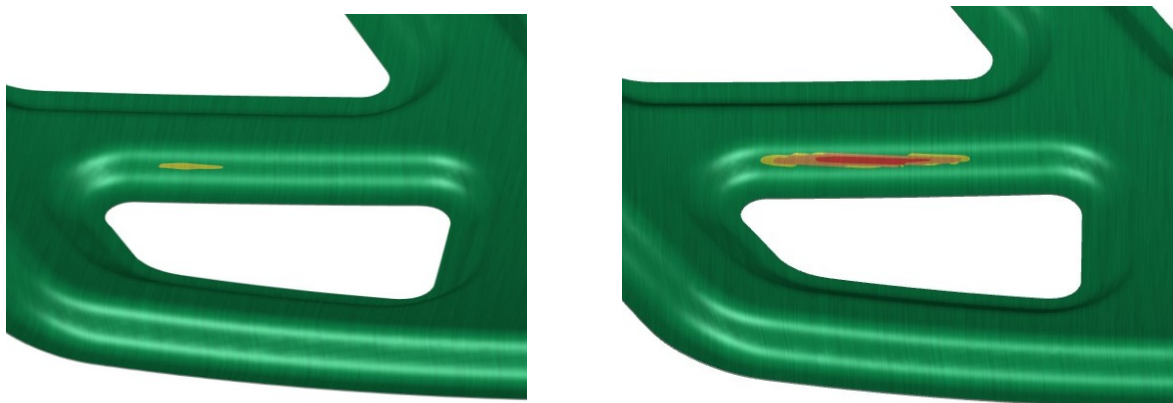
Je to dvoufázová vysokopevnostní ocel s galvanickým pozinkováním. Povrchová úprava zajišťuje odolnost proti korozi. Zjednodušeně bude v následujícím textu označována DP450.

Tabulka 13 Chemické složení oceli DP450 (v % hm.) [45]

Ocel	C	Si	Mn	P	S	Al tot.	Cr+Mo	Nb+Ti	V
DP450	0,14	0,75	2,00	0,08	0,015	0,015-1,00	1,00	0,15	0,20

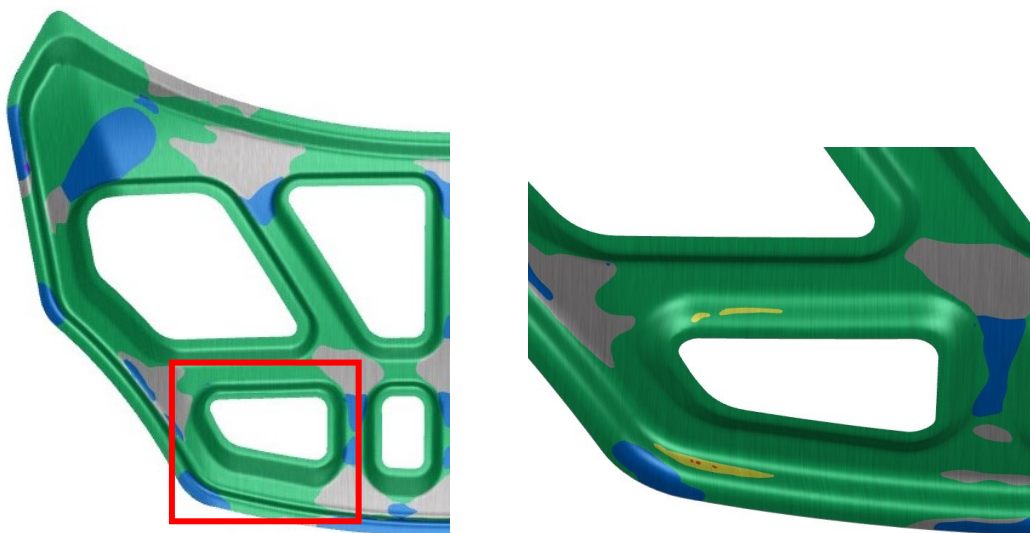
9.2 Diskuze předběžných výsledků

Níže jsou zobrazeny detaily problematické oblasti. Vlevo je znázorněna ocel DX56D+Z s minimálním rizikem porušení 0,04 %. Vpravo je zobrazen výřez oceli DC04, u které se v dané oblasti projevuje výraznější porušení ve třech rizikových oblastech. Vzhledem k výskytu vady podél celé délky jedné strany výřezu bude provedena kontrola a případná úprava celého výřezu, přičemž stěny budou upraveny do méně strmého profilu.



Obrázek 84 Porovnání nevhodných oblastí zvolených nízkouhlíkových ocelí

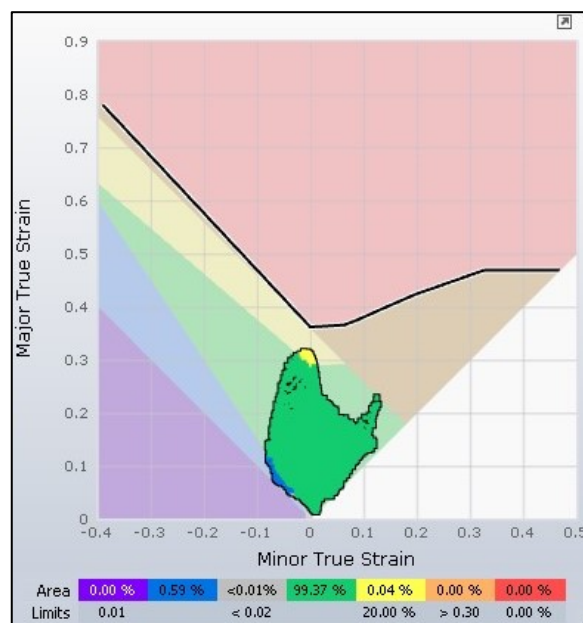
U oceli DP450 se riziková oblast objevila ve stejných místech jako u nízkouhlíkových ocelí. Zároveň dochází ke vzniku trhlin na obvodové vnější stěně dílu. Navržená geometrie v těchto místech pravděpodobně nepředstavuje příčinu problému, ten je spíše způsoben neoptimalizovaným nastavením simulace. U této oceli lze mapovat více oblastí bez přetvoření nebo s výskytem napěchovaného materiálu. Tyto skutečnosti budou detailně popsány po provedené optimalizaci a úpravě geometrie.



Obrázek 85 Zobrazení přetvoření a vzniklých trhlin oceli DP450

9.2.1 Předběžné výsledky materiálu DX56D+Z_0,8 mm

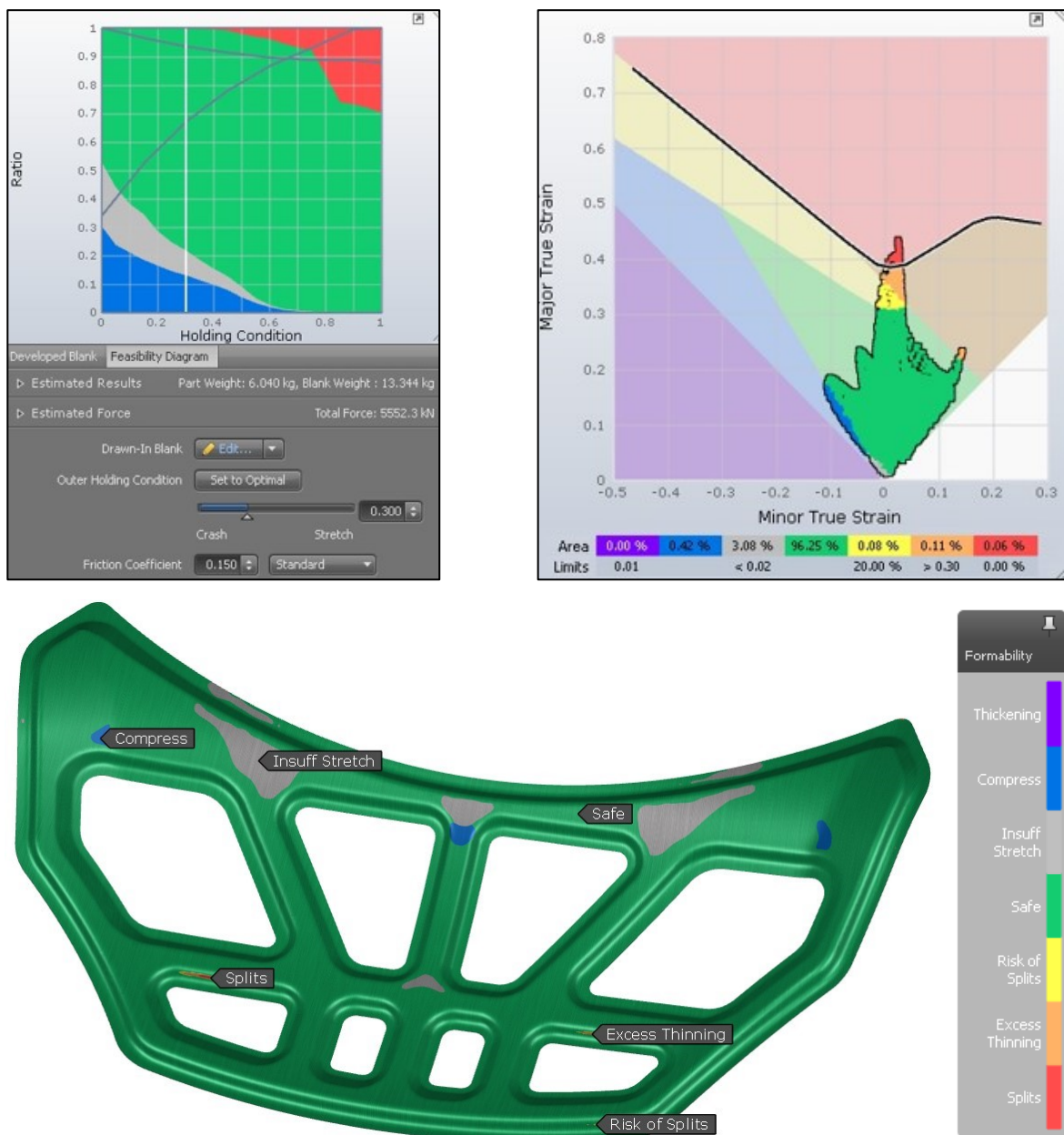
Materiál DX56D+Z je přetvořen z 99,37 % v bezpečné oblasti. Tento výsledek lze z hlediska analýzy přetvoření považovat za akceptovatelný, jelikož vzniká pouze minimální riziko porušení 0,04 %. Lokálně se vyskytuje napěchování materiálu 0,59 % a minimální nepřetvořená oblast 0,01 %.



Obrázek 86 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu DX56D+Z_0,8 mm

9.2.2 Předběžné výsledky materiálu DC04_1 mm

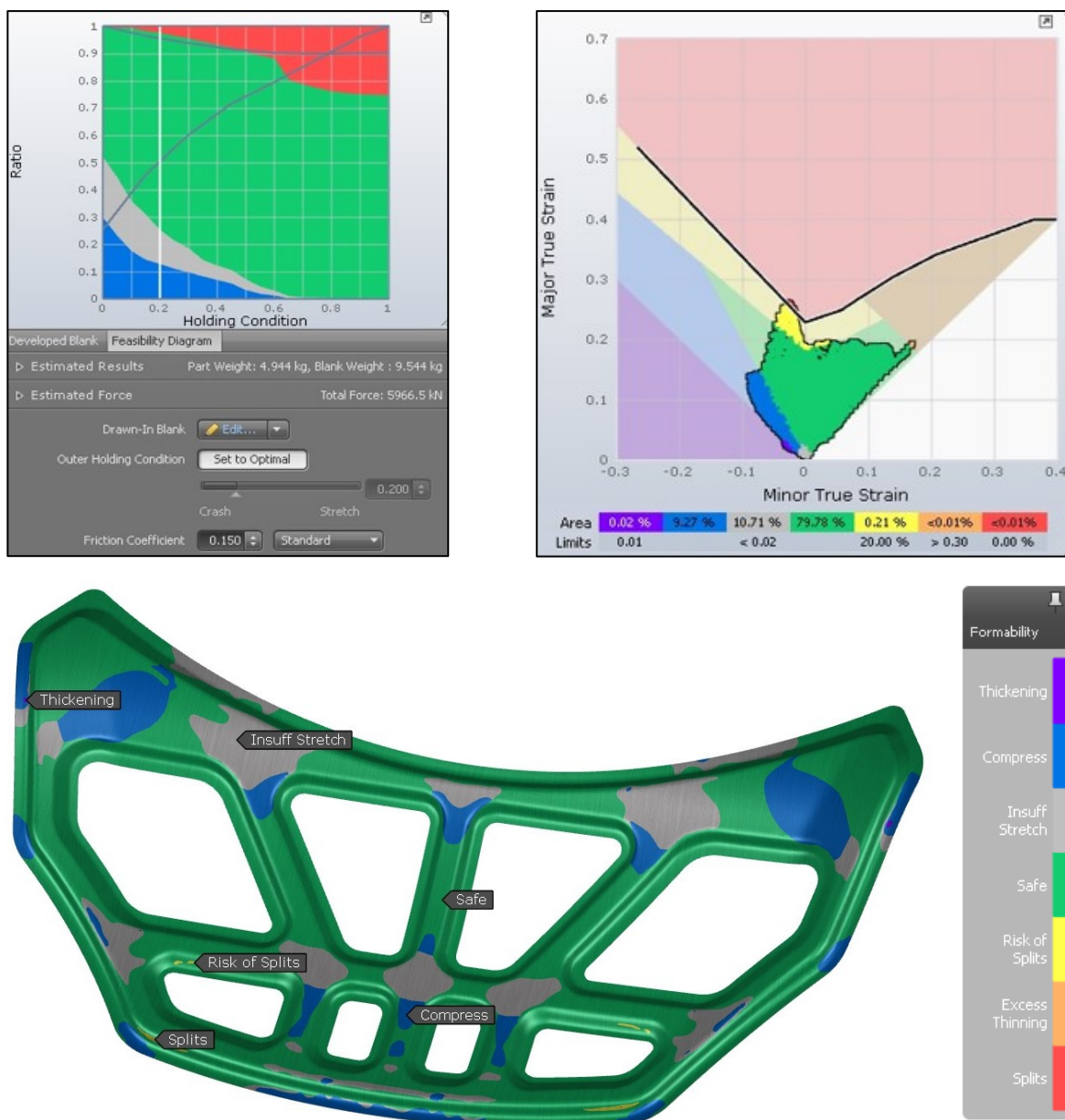
Analýza tváritelnosti oceli DC04 vykazuje méně příznivé výsledky, jelikož se objevují nežádoucí deformace ve více oblastech. Riziko porušení činí 0,08 %, nadměrné ztenčení 0,11 % a výskyt neakceptovatelných trhlin dosahuje 0,06 %. Zaznamenána je také zvýšená hodnota nepřetvořeného materiálu 3,08 % a ve srovnání s ocelí DX56D+Z mírnější napěchování 0,42 %.



Obrázek 87 Předběžná analýza tváritelnosti materiálu DC04_1 mm

9.2.3 Předběžné výsledky materiálu DP450_0,8 mm

Simulace ukazuje výskyt hodnot ve všech oblastech FLD diagramu. Předběžná analýza u materiálu DP450 ukazuje bezpečně přetvořenou oblast v hodnotě 79,78 %. Rizikové zóny s nadměrným ztenčením a porušením se vyskytují pouze lokálně, přičemž hodnoty nepřesahují 0,01 %. V souvislosti s těmito oblastmi je zaznamenáno i mírně zvýšené riziko vzniku trhlin 0,21 %, a to v oblasti krajních výřezů. Výraznější zastoupení mají nepřetvořené zóny 10,71 % a oblasti napěchování 9,27 %, přičemž u okraje dílu se objevuje také lokální zvlnění v rozsahu 0,02 %.



Obrázek 88 Předběžná analýza tváritelnosti materiálu DP450_0,8 mm

9.2.4 Porovnání předběžných výsledků výztužné kapoty

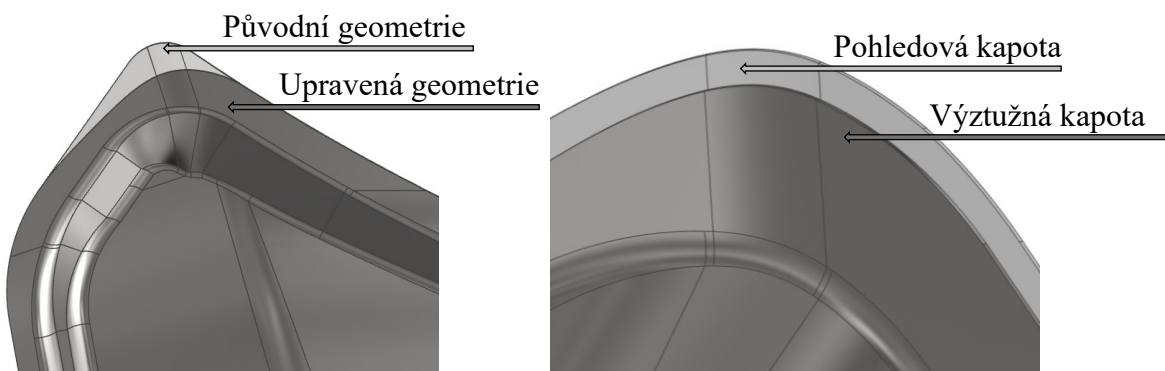
Při porovnání dvou nízkouhlíkových ocelí dosahuje lepších výsledků ocel DX56D+Z, která téměř splňuje stanovené požadavky. Navíc se v jejím případě používá plech s menší tloušťkou o 0,2 mm. I přes velmi dobré výsledky bude upravena geometrie rizikové (žluté) oblasti s cílem optimalizace a dosažení stavu, kdy se deformace nachází pouze v bezpečné (zelené) oblasti. Dále je analyzována vysokopevnostní ocel DP450, u níž dochází ke vzniku nežádoucích deformací již před dosažením 80 % hranice bezpečného přetvoření.

Tabulka 14 Porovnání předběžných výsledků tváritelnosti pro vybrané oceli

Kontrolovaná oblast	DX56D+Z	DC04	DP450
(Tloušťka plechu)	0,8 mm	1,0 mm	0,8 mm
Oblast porušení (červená)	0,00 %	0,06 %	0,01 %
Oblast ztenčení (oranžová)	0,00 %	0,11 %	0,01 %
Oblast riziková (žlutá)	0,04 %	0,08 %	0,21 %
Oblast bezpečná (zelená)	99,37 %	96,25 %	79,78 %
Oblast nepřetvořená (šedá)	0,01 %	3,08 %	10,71 %
Oblast napěchování (modrá)	0,56 %	0,42 %	9,27 %
Oblast zvlnění (fialová)	0,00 %	0,00 %	0,02 %

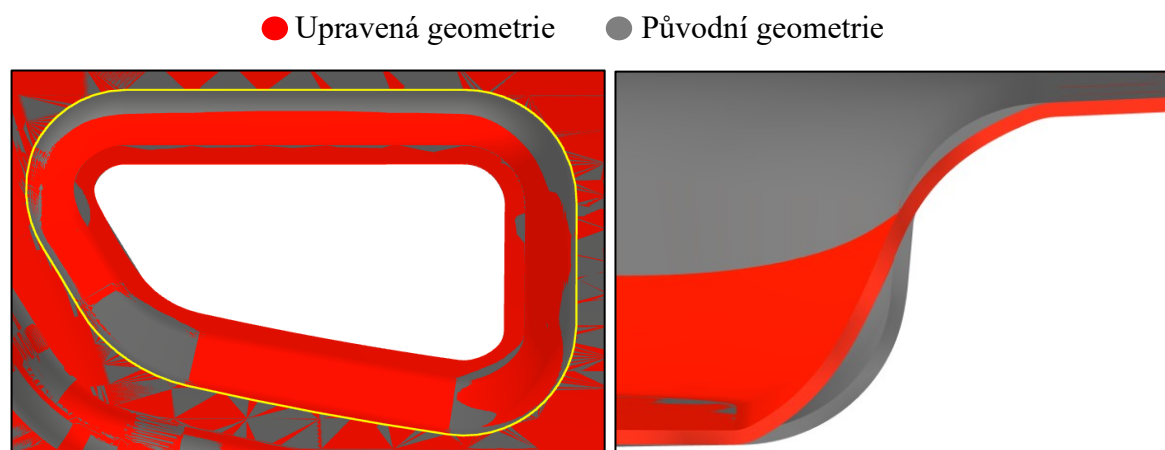
10 OPTIMALIZACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ PLECHOVÉHO DÍLU A VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT – VÝZTUŽNÁ KAPOTA

Oblouk výztužné kapoty je dále upraven kvůli návaznosti na pohledovou část kapoty, aby bylo po celém obvodu dodrženo odsazení 5 mm od vnější obvodové hrany.



Obrázek 89 Úprava geometrie oblouku výztužné kapoty a zobrazení odsazení

Dále je vyřešen problém strmé stěny v oblasti jednoho z výztužných otvorů kapoty. Vlivem strmého přechodu vznikaly trhliny, proto je celá oblast upravena tak, aby byly přechody hladší. Upravená část je ohraničena žlutou křivkou. Po úpravě je geometrie zrcadlena, jelikož je díl symetrický. Jedná se o pohled v půdorysu, přičemž prosvítající červenou barvou jsou označeny viditelné a upravené plochy v tomto pohledu.



Obrázek 90 Úprava tvarových výřezů výztužné kapoty

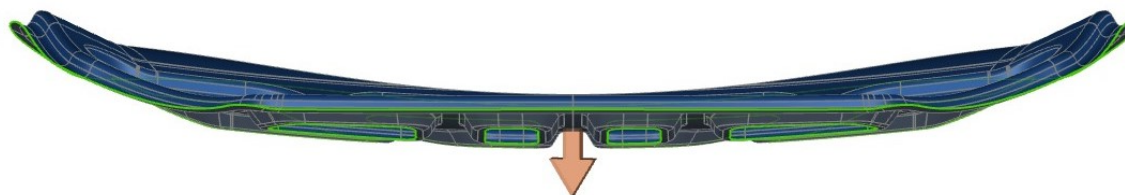
10.1 Nastavení simulace_S1

Na základě předběžných výsledků simulací je pro popis nastavení parametrů zvolen materiál DX56D+Z. Jelikož je detailní nastavení již popsáno pro pohledovou kapotu, jsou níže popsány pouze hlavní rozdíly v nastavení a zdůrazněny klíčové parametry.

Simulace je označena jako S_1 , aby bylo možné jednoznačně rozlišit popisky obrázků a nedocházelo k jejich záměnám. Návaznost jednotlivých operací je zachována stejně jako při popisu nastavení první simulace pohledové kapoty.

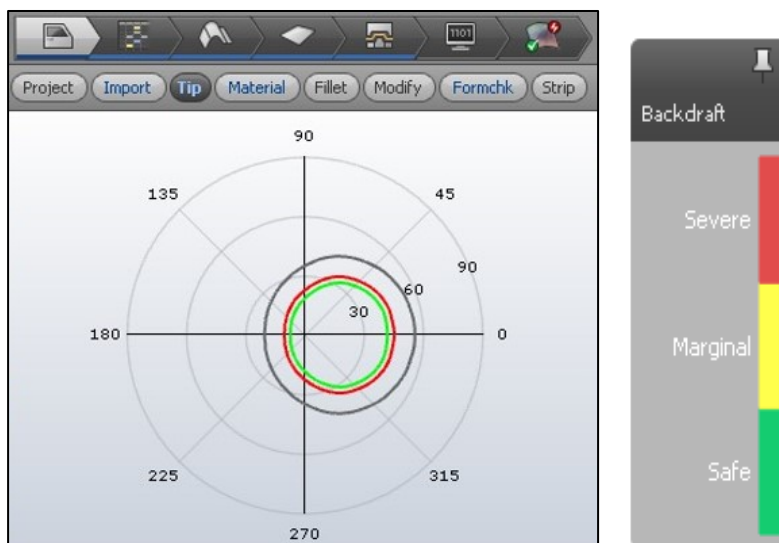
10.1.1 Sekce Part

Import Part – importování geometrie a určení směru lisování. Směr určen červenou šipkou.



Obrázek 91 Vložení dílu a určení směru lisování

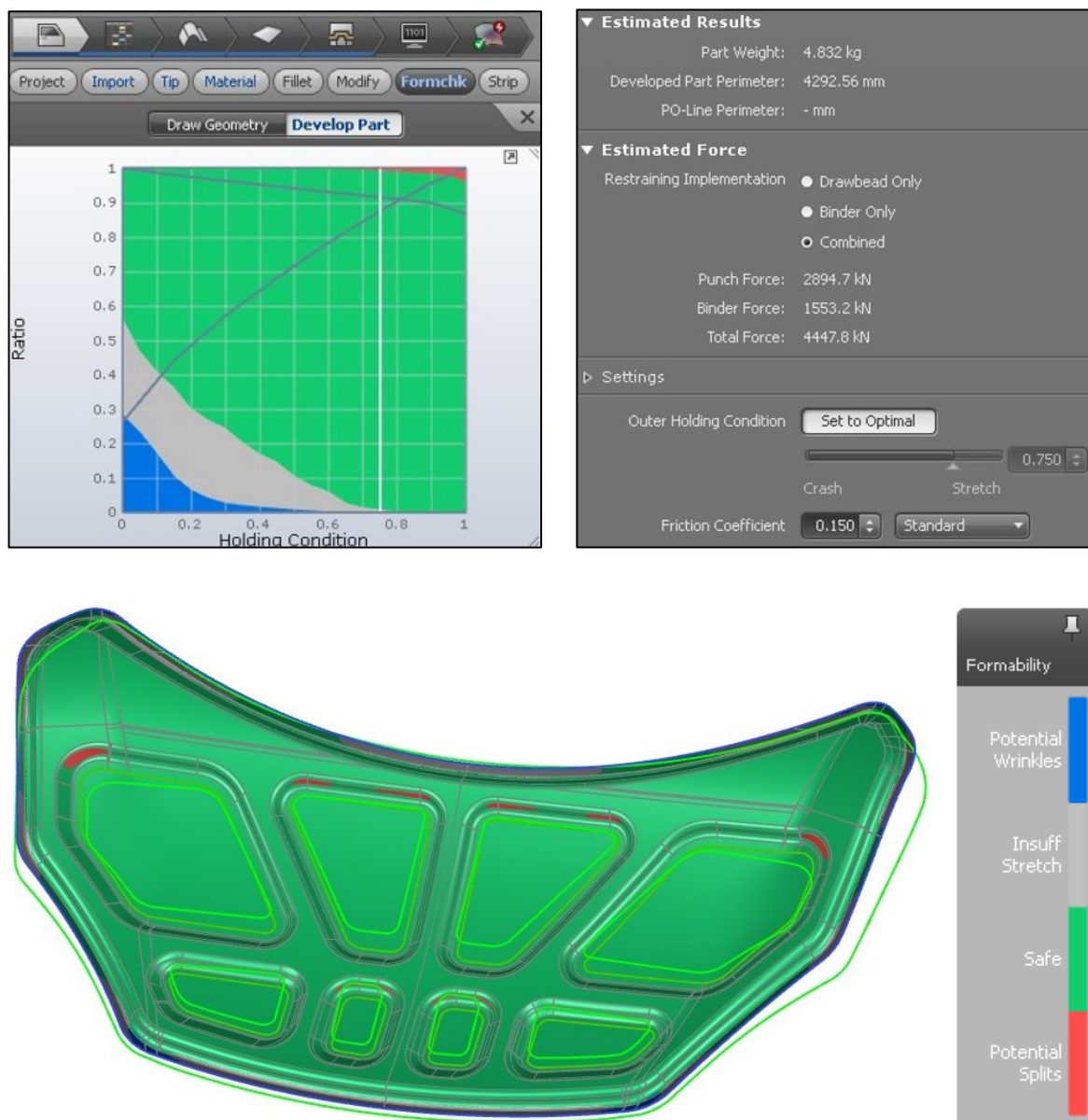
Automatic Tipping – výpočet naklonění a stanovení pracovního bodu. Analyzování a určení pozice dílu vůči lisování. Zelená křivka se nachází uvnitř červené, čímž je splněna podmínka bezpečného zarovnání a naklonění dílu.



Obrázek 92 Polární diagram vyhodnocení podřezání S_1

Add Material – výběr materiálu DX56D+Z a určení tloušťky plechu. Na základě výsledků předběžných simulací je zvolena tloušťka 0,8 mm.

Draw Parts – definování geometrie tažení a vytvoření geometrie s přídržovačem. V záložce **Formchk** je provedena prvotní simulace. Přídržovací síly během lisování jsou nastaveny na optimální. Třecí koeficient ponechán standardní.



Obrázek 93 Výsledky předběžné analýzy tváritelnosti sekce Part_S1

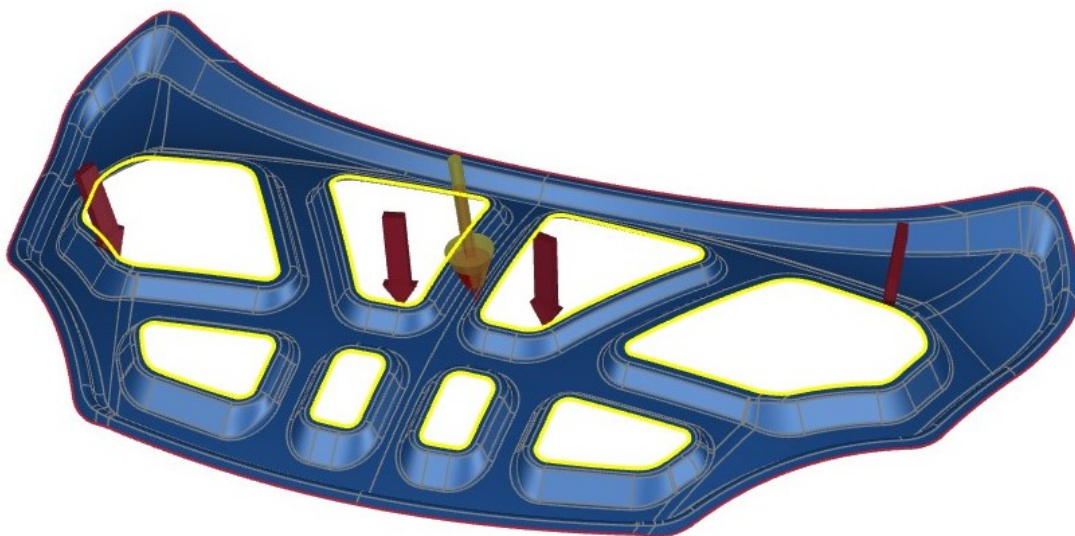
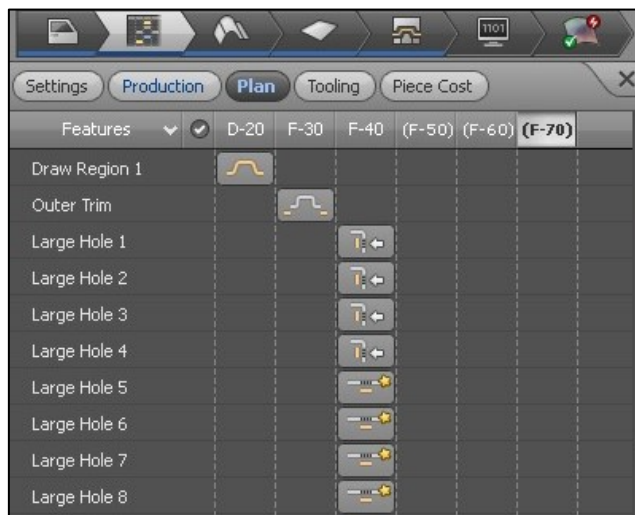
Většina plochy dílu je pokryta zelenou barvou, což značí bezpečnou oblast. Potenciální trhliny se vyskytují pouze v rozích výřezů. Nastavení se nachází v počáteční fázi, a proto je předběžný výsledek akceptovatelný. Jelikož zatím nebyla nastavena řada parametrů, tak jejich úpravou bude možné vznik trhlín omezit nebo zcela eliminovat.

10.1.2 Sekce Plan

Create Plan With Custom Press – výztužná kapota má velmi podobné rozměry jako pohledová část, proto je zvolen stejný lis, tedy PressLine2200T.

Plán operací je automaticky vygenerován. Následně je provedena kontrola návaznosti jednotlivých kroků a přeskočení (Skip) operace F-50. Plán zahrnuje následující operace:

- Draw Region 1 (D-20): operace tažení, okraj oblasti označen červenou křivkou.
- Outer Trim (F-30): odstříhnutí vnějšího obrysu, v softwaru zvýrazněno žlutě.
- Large Hole 1 až 8 (F-40): zahrnutí všech děrovacích operací, konkrétně vystřížení všech otvorů odlehčení. Výsledné otvory jsou znázorněny na obrázku níže žlutě.



Obrázek 94 Plán operací a ukázka operace F-40

10.1.3 Sekce Die Face

Aktivace funkce Die Face pro vygenerování tvářecích geometrií. Následuje funkce Automatic Binder pro automatické vytvoření plochy přídržovače. Poté nastavení parametrů v záložce Binder, konkrétně tyto hodnoty:

- Binder Options – Shift: hodnota odsazení nastavena na 20 mm.
- Add Curve: přidání kontrolní křivky Part Boundary.

- Curve – Weight: nastavení váhy křivky na hodnotu 0. Díl je po celé šířce zakřivený a předtvářený plech by při daném odsazení způsobil kontakt a následnou kolizi. Při nastavené hodnotě 0 zůstává plech rovný.

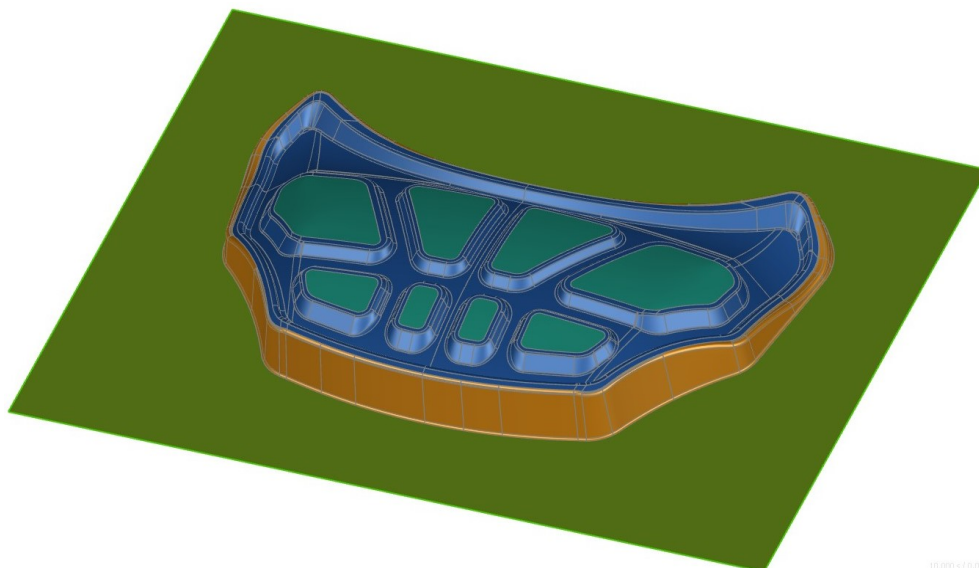
V záložce **Addendum** je nejprve vytvořena plocha podél celého obvodu součásti s hraniční křivkou Part Boundary. Nastavují se parametry v části Master Profile Type:

- Profile Type – nastavení typu křivky na Smooth. Tento typ zajišťuje hladký přechod mezi náběhovým a výběhovým rádiusem.
- Bar Width – šířka rovné přechodové části oranžové křivky u náběhových rádiusů je nastavena na 20 mm.
- PO Width – minimální šířka otvoru razníku je nastavena na hodnotu 30 mm.
- Profile Length – oranžová křivka představuje navržený profil s celkovou délkou tažení 72,48 mm.
- Bar Radius Right + Left – levý i pravý náběhový rádius je nastaven na 10 mm. Oba dva jsou ve stejné výšce.
- Die Radius – výběhový rádius je nastaven na 6 mm.
- Wall Angle – úhel stěny profilu je nastaven na 10°.
- Ostatní hodnoty ponechány ve výchozím nastavení.



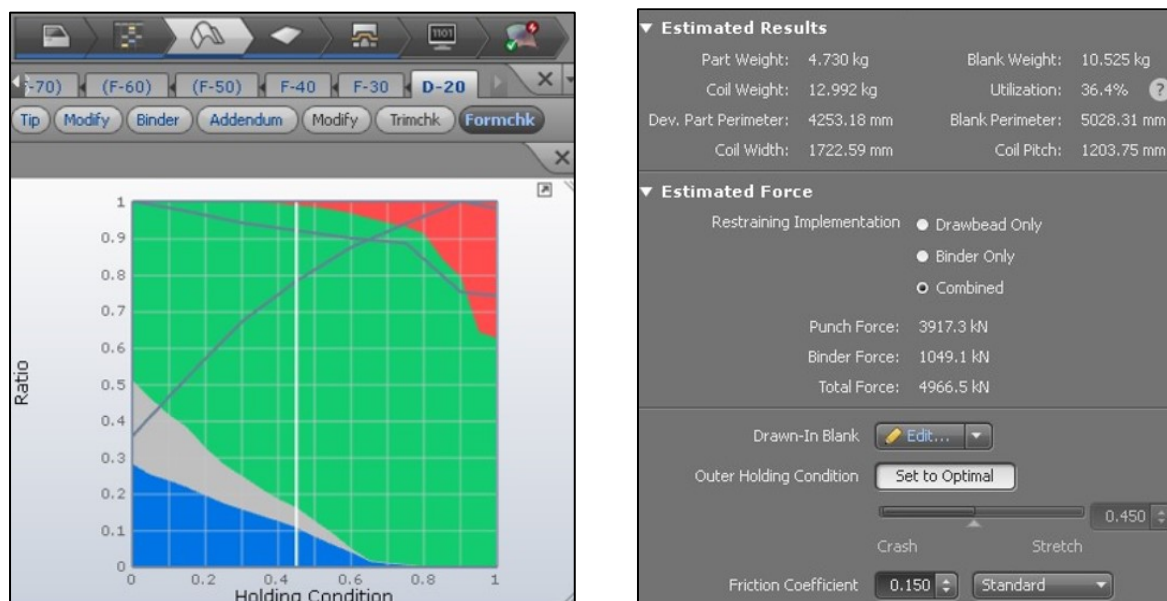
Obrázek 95 Nastavení parametrů přechodové profilu_S1

V záložce **Modify** je definováno vyplnění výřezů u operace D-20. Je použita funkce Fill Multiple Holes, která automaticky vyhledá a vyplní všechny otevřené otvory uvnitř profilu plechu. Přechodový profil, určující tok materiálu a rozložení napětí s uvedenými nastavenými parametry, je znázorněn níže oranžovou barvou.

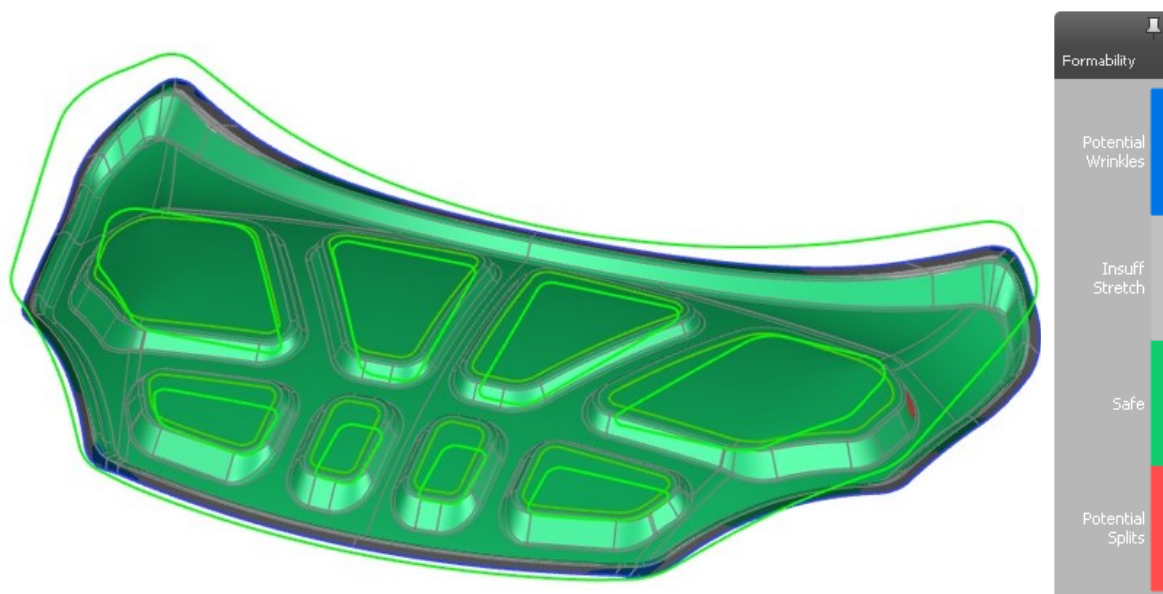


Obrázek 96 Přechodová zóna výztužné kapoty s vyplněnými výřezy

Následuje druhé ověření tváritelnosti v záložce **Formchk**. Většina plochy se nachází v bezpečné zelené oblasti. Podmínky přidržovače jsou nastaveny na optimální, třecí koeficient je ponechán standardní. Posunutí křivky je mírně v červené oblasti, což lze pozorovat i v krajním rohu výřezu kapoty, kde se objevují potenciální trhliny, které ale ve výsledku nevznikají.

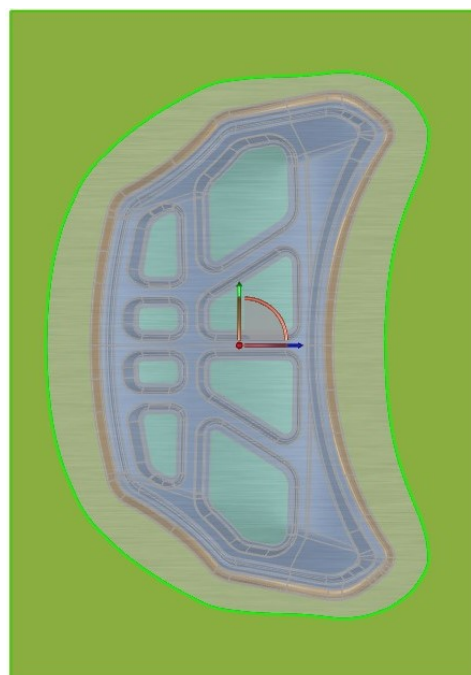
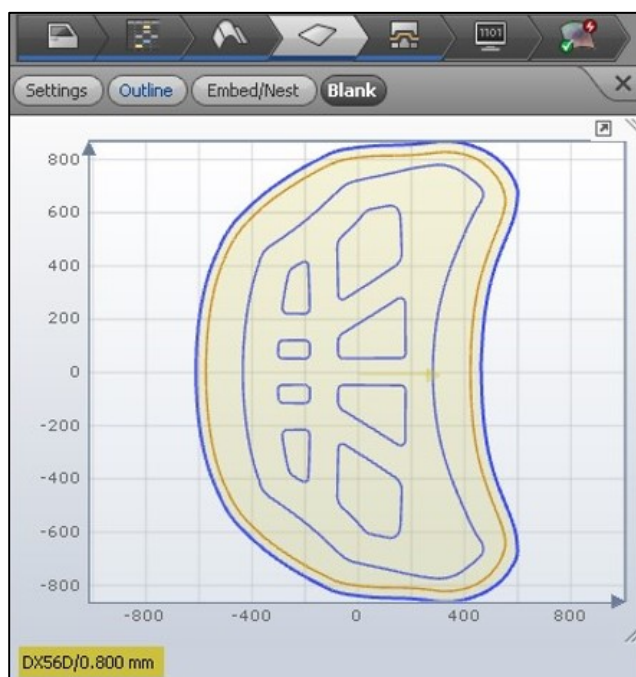


Obrázek 97 Nastavení předběžné analýzy tváritelnosti sekce Die Face_S1

Obrázek 98 Výsledky předběžné analýzy tváritelnosti sekce Die Face_S₁

10.1.4 Sekce Blank

Create Flat Blank – vytvoření plechového polotovaru definovaného 2D obrysem v záložce **Outline**, kde je přes Edit vybrána volba Blank Outline.



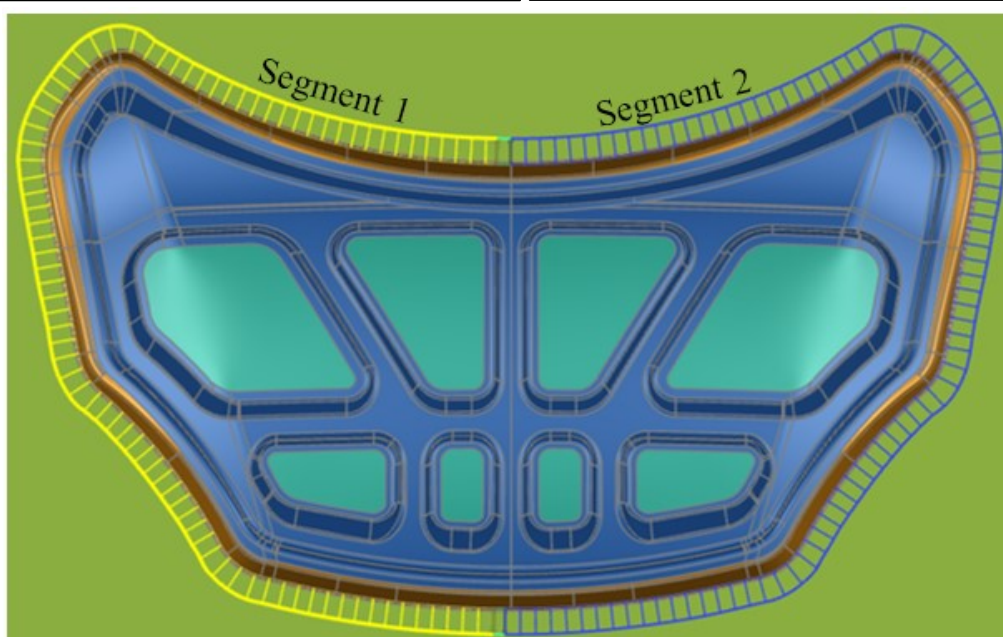
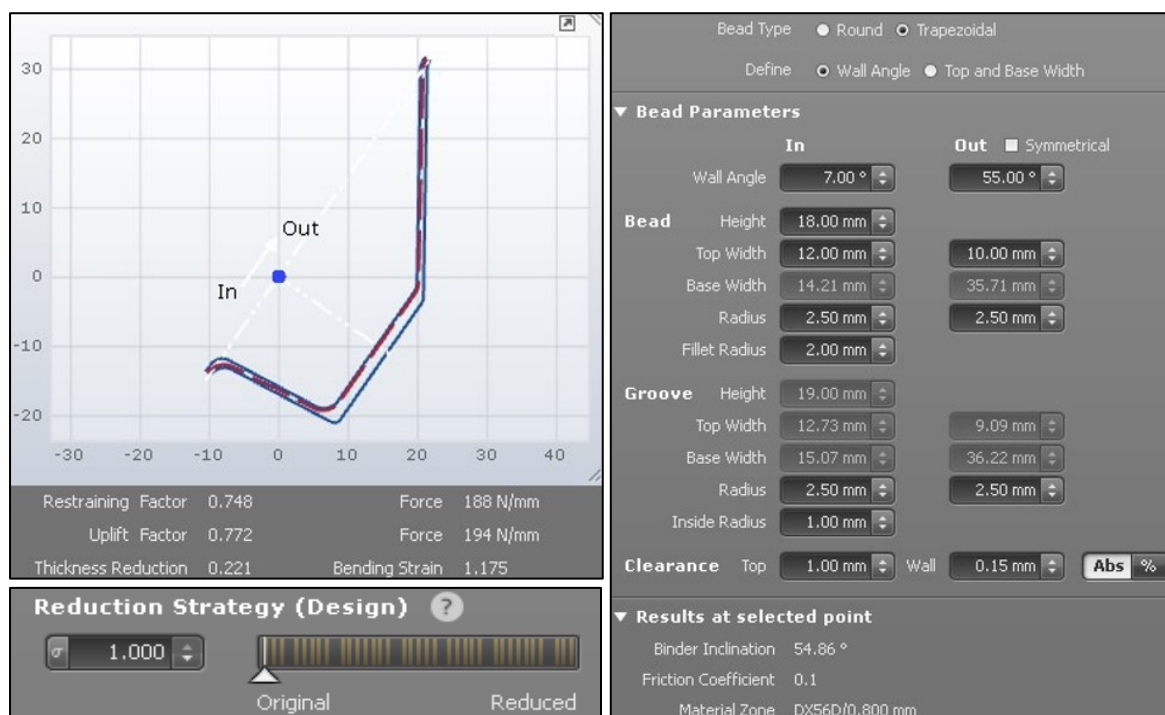
Obrázek 99 Nastavení a vizualizace obrysu polotovaru

Karta **Blank** zobrazuje informace o polotovaru, jehož hmotnost je v tomto případě 10,6 kg s využitelností 44,8 %, což je nízká hodnota. Nízká využitelnost souvisí s výřezy dílu, širokými okraji z důvodu bezpečnosti při tváření a složitě tvarovaným obrysem dílu.

10.1.5 Sekce Process

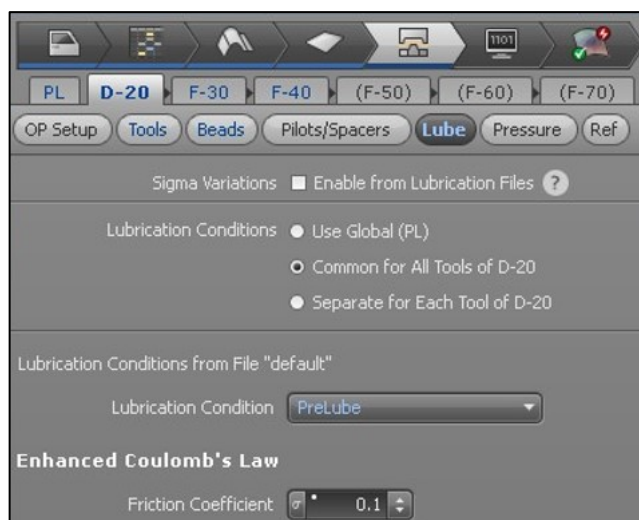
Adaptivní brzdné drážky jsou vytvořeny na základě křivky Punch Opening Curve v záložce **Beads**. Díky své adaptivitě se jejich tvar automaticky přizpůsobuje průběhu deformace v dané oblasti. Použitý je trapézový profil, díky kterému je dosaženo vhodného přetvoření.

Drážky jsou rozděleny na dva segmenty, které jsou po celém obvodu součásti. Oba segmenty mají shodné nastavení. Je navržena redukční strategie v rozsahu výšek 1 mm až 18 mm, která je postupně nastavena na nejvyšší (Original) hodnotu 1.



Obrázek 100 Nastavení brzdných drážek výztužné kapoty

V záložce **Lube** u operace D-20 je zvoleno mazivo PreLube s třecím koeficientem 0,1. Výběr je proveden na základě porovnání a odzkoušení všech dostupných variant maziv.



Obrázek 101 Nastavení podmínek mazání_S₁

10.1.6 Sekce Simulation

V záložce **Control** → **Results** jsou stejně jako u simulace pohledové kapoty vybrány požadované výsledky simulace. Zvoleny jsou všechny dostupné výsledky. Následuje záložka **Start**, kde je ve spodní části aktivována funkce Start, kterou se spustí simulace. Po dokončení výpočtu je nutné provést refresh programu.

10.1.7 Sekce Evaluation

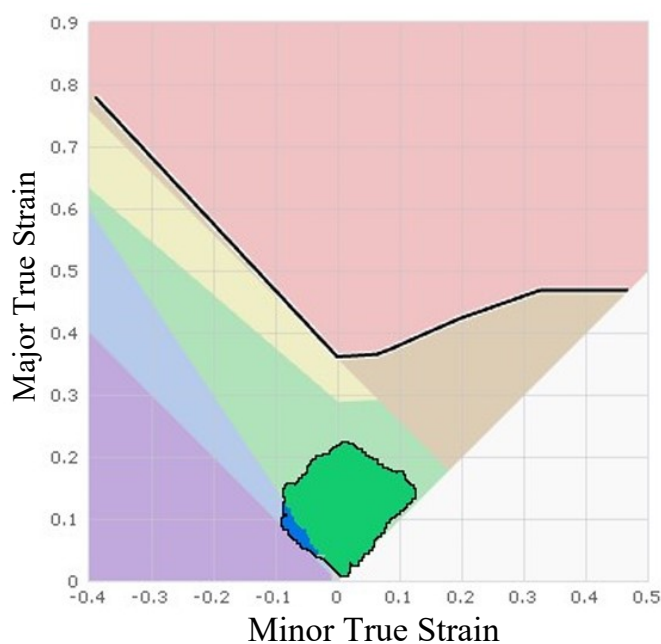
Zde jsou k zobrazení výsledky, kterých je dosaženo na základě definovaného nastavení parametrů popsaného výše. V následující diskusi budou hodnoceny výstupy získané po finální operaci F-40.

10.2 Vyhodnocení jednotlivých variant

Nejprve budou detailně popsány výsledky simulace pro materiál DX56D+Z. Následně budou zmíněny nejlepší dosažené výsledky pro ocel DC04, která vykazuje podobné vlastnosti. Nakonec budou uvedeny výsledky pro vysokopevnostní ocel DP450, která slouží k porovnání a lze ji použít jako možnou alternativu k předchozím dvěma uvedeným.

10.2.1 Vyhodnocení tvářitelnosti

Optimalizací parametrů a úpravou geometrie je dosaženo bezpečně přetvořené oblasti v rozsahu 99,51 %. Tato hodnota je považována za plně dostačující. Nežádoucí deformace, které vznikaly v krajním výřezu, jsou po optimalizaci zcela eliminovány. Na uvedeném obrázku níže jsou viditelné modré oblasti, které značí mírné lokální napěchování materiálu v celkové hodnotě 0,45 %. Velmi malá oblast 0,03 % zůstává nepřetvořena. Tyto dvě oblasti jsou ale z hlediska celkové tvářitelnosti akceptovatelné.



	Thickening	Compress	Insuff Stretch	Safe	Risk of Splits	Excess Thinning	Splits
Area	0.00 %	0.45 %	0.03 %	99.51 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Limits	0.01		< 0.02		20.00 %	> 0.30	0.00 %

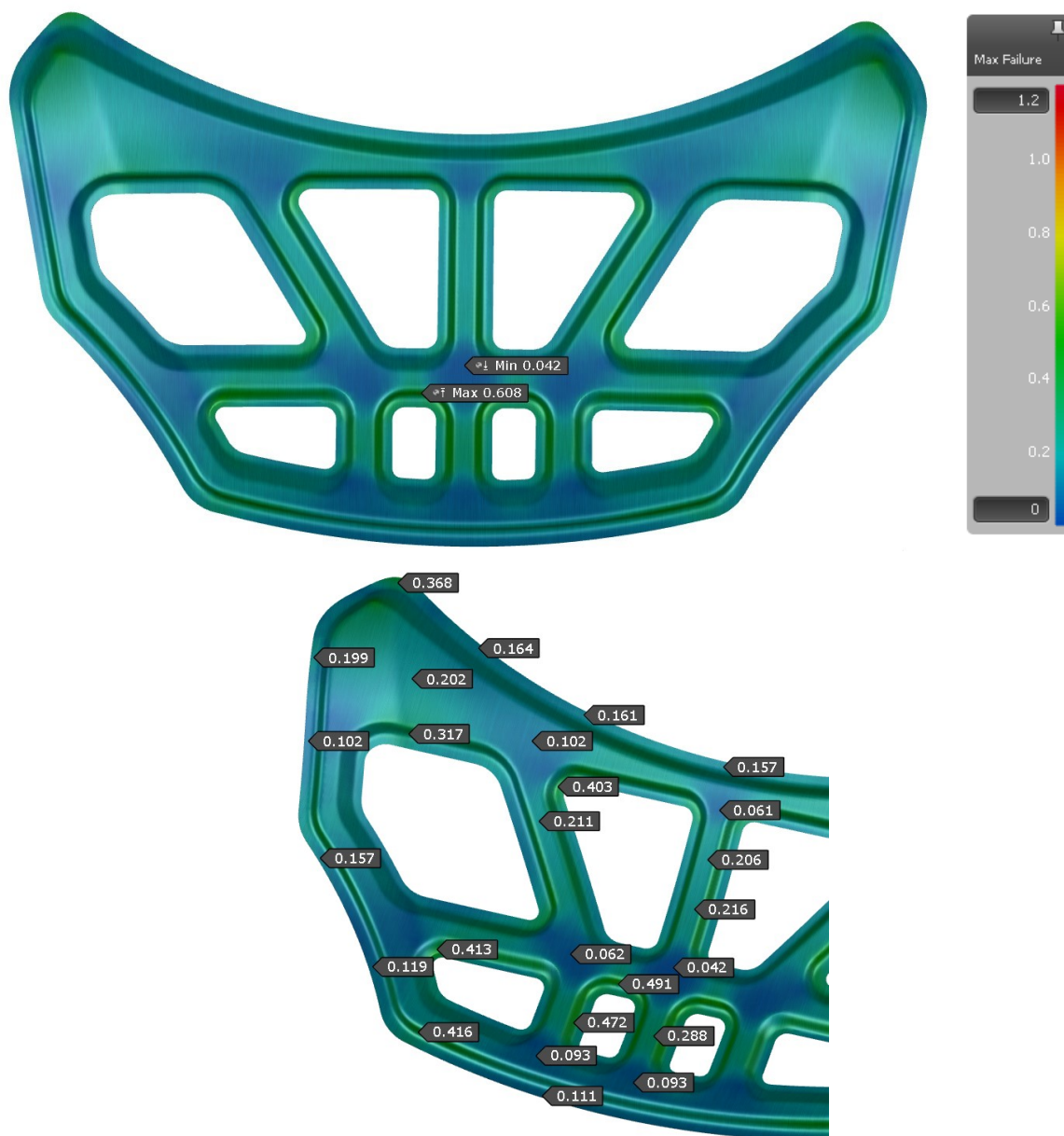


Obrázek 102 Vyhodnocení tvářitelnosti výztužné kapoty

10.2.2 Vyhodnocení porušení

Na přiloženém obrázku je zobrazena maximální hodnota porušení 0,608, která se nachází pod hranicí rizika odtržení stanovenou na 0,8. Z hlediska porušení lze hodnotit tento návrh jako vyhovující. V krajních výřezech, které jsou upraveny, se nevyskytuje nejvyšší porušení, což potvrzuje vhodně upravenou geometrii. Dalšími úpravami vnitřních výřezů, ve kterých se aktuálně nachází maximální hodnota porušení, by bylo možné tuto hodnotu dále snížit.

Na celé ploše dílů se vyskytují modré oblasti, v nichž se hodnota porušení blíží k nule. Nejvíce kritická místa jsou označena světle zelenou barvou a nachází se převážně na stěnách výřezů a obloucích dílu.

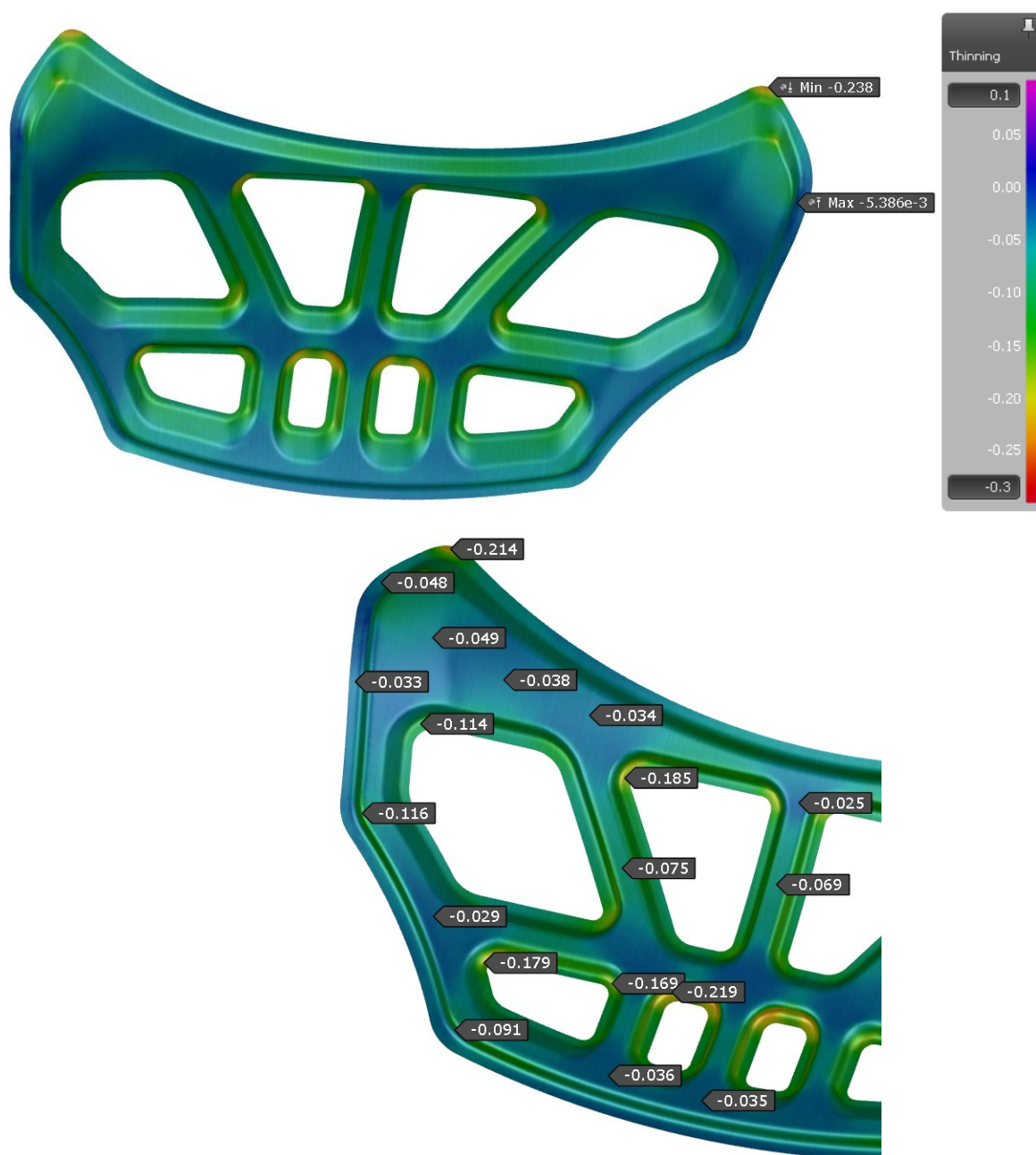


Obrázek 103 Vyhodnocení porušení výztužné kapoty

10.2.3 Vyhodnocení ztenčení

Největší ztenčení je stejně jako u pohledové kapoty v oblasti oblouků a dosahuje hodnoty -0.238, což odpovídá 23,8 %. Nejmenší ztenčení je v oblasti napěchování materiálu a činí -0,0054, tedy 0,54 %. Podmínka pro maximální přípustné ztenčení do 25 % je tedy splněna.

Další výrazné hodnoty ztenčení se nacházejí v oblastech výřezů, což je typické pro tažené díly s touto geometrií. Naopak k nejmenšímu ztenčení dochází v modrých oblastech, případně v oblastech s mírným přesahem do zelených oblastí (do 15 %), které společně pokrývají převládající plochu dílu.



Obrázek 104 Vyhodnocení ztenčení výztužné kapoty

10.2.4 Vyhodnocení zvlnění

Zvlnění vzniká podle očekávání v místech napěchování materiálu na bocích kapoty. V rámci analýzy tváritelnosti jsou tyto oblasti zobrazeny modře (Compress). Jedná se o zelenou oblast s maximální hodnotou 0,056, tedy 5,6 %. Při porovnání s kritickou hodnotou 30 % je bezpečnostní podmínka splněna.



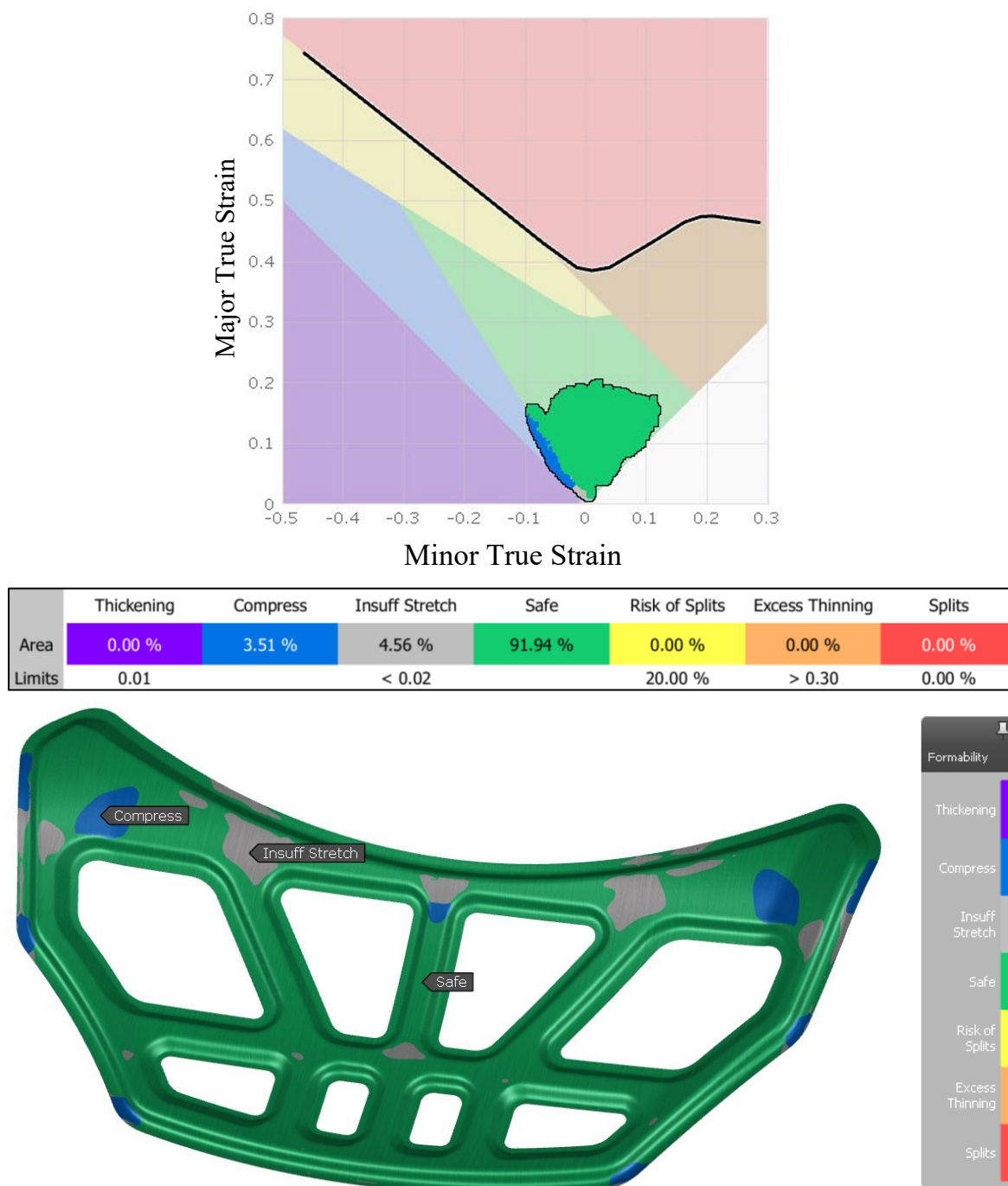
Obrázek 105 Vyhodnocení zvlnění výztužné kapoty

10.2.5 Porovnání dosažených výsledků

V detailně popsané analýze a jejich výsledcích je hodnocen materiál DX56D+Z, který v předběžných výsledcích vykazuje pouze minimální problémovou oblast potenciálního porušení. Tato oblast je úpravou geometrie zcela eliminována. Ve výřezech je dosaženo pouze zelené bezpečné oblasti a současně je mírně zvýšeno bezpečné přetvoření z 99,37 % na 99,51 %. Aby byly dodrženy stanovené podmínky, výsledná minimální tloušťka plechu zůstává na hodnotě 0,8 mm.

Vyhodnocení materiálu DC04_1 mm

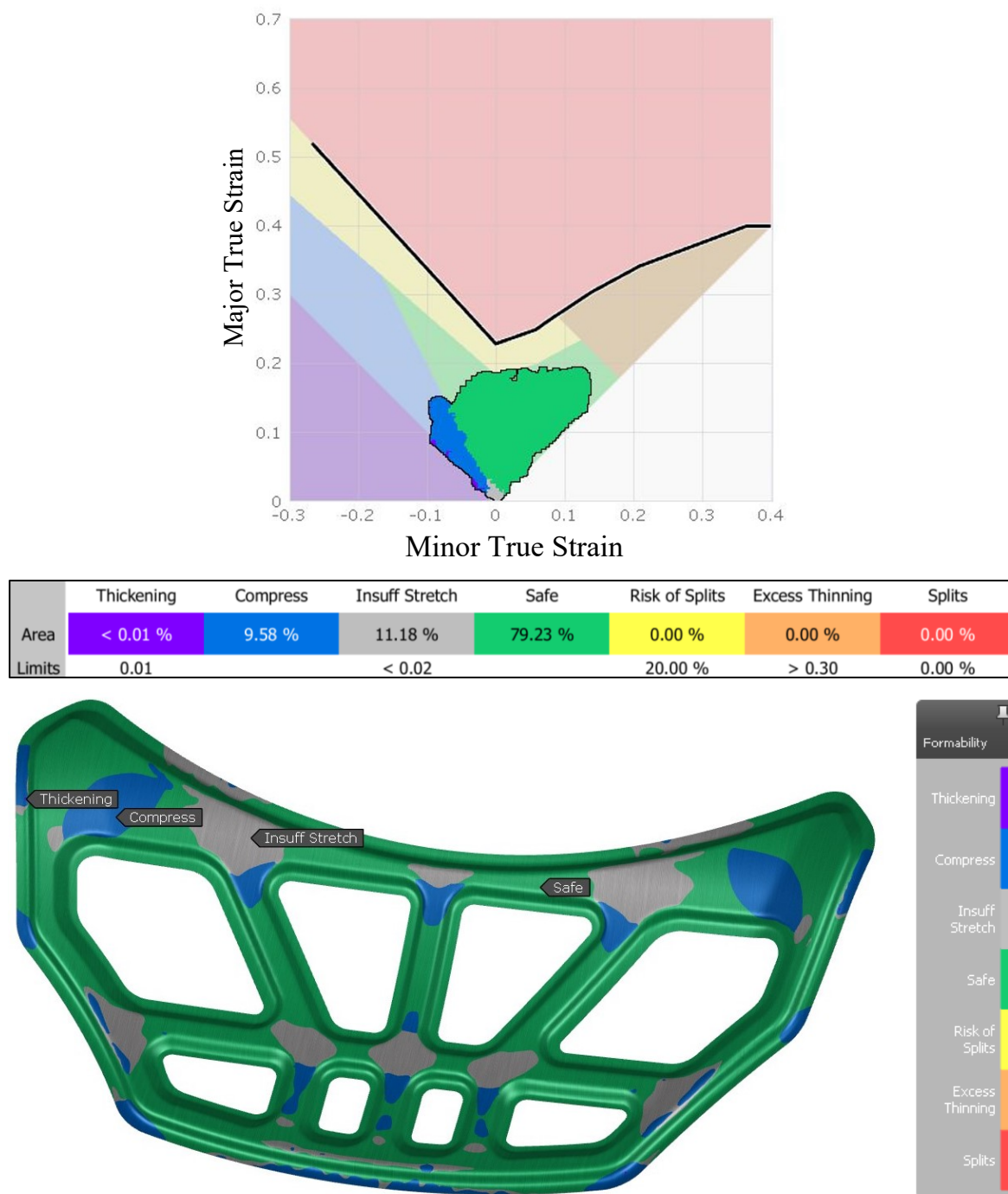
Naopak horší tváritelnost vykazuje materiál DC04. Po optimalizaci sice dochází k eliminaci veškerých nežádoucích deformací, avšak na úkor snížení bezpečně přetvořené oblasti z 96,25 % na 91,94 %. Tloušťka plechu zůstává ponechána na původní hodnotě 1 mm, jelikož je sice jejím zmenšováním zachována stejná hodnota přetvoření, ale dochází k překročení hraničních hodnot ostatních sledovaných výsledků. Materiál DC04 při tloušťce 1 mm po optimalizaci vykazuje následující výsledky: porušení: min. 2,6 %, max. 52,5. Ztenčení: min. 0,57 %, max. 24,8 %. Zvlnění: max. 7,6 %.



Obrázek 106 Optimalizace materiálu DC04_1 mm

Vyhodnocení materiálu DP450_0,8 mm

Na závěr je provedena analýza pro vysokopevnostní ocel DP450, u níž tloušťka zůstává stejně jako v předběžných simulacích na hodnotě 0,8 mm. Vysokopevnostní oceli obecně vykazují horší tváritelnost, přičemž po optimalizaci zůstává hodnota bezpečně pretvořené oblasti na úrovni okolo 79 %. Oproti výsledkům z předběžné analýzy však nedochází ke vzniku trhlin. Je dosaženo těchto výsledků: Porušení: min. 3,4 %, max. 80,8. Ztenčení: min. 0,38 %, max. 26,8 %. Zvlnění: max. 8,6 %.



Obrázek 107 Optimalizace materiálu DP450_0,8 mm

Největším problémem všech tří analyzovaných případů je ztenčení, které se pohybuje na hraniční hodnotě. U oceli DP450 ji dokonce mírně překračuje. Tento stav je způsoben snahou o dosažení co nejmenší tloušťky plechu. Oblasti oblouků a stěny výřezů vykazují největší ztenčení, což je pro danou geometrii u tohoto materiálu typické.

Příznivějších výsledků z hlediska ztenčení i porušení lze dosáhnout navýšením tloušťky plechu, avšak každé zvýšení o 0,1 mm zvyšuje hmotnost kapoty o 0,65 kg. Je proto nezbytné zohlednit celkovou hmotnost nejen výztužné části, ale i kompletní sestavy.

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V diskuzi výsledků jsou hodnoceny tři materiály pro pohledovou i výztužnou kapotu, na základě simulací pro optimalizované dílce. Kromě uvedených výsledků v průběhu práce jsou přiložené tabulky doplněny o výpočty se dvěma dalšími tloušťkami plechu. U každého materiálu jsou zvoleny tři hodnoty tak, aby výsledky výrazně nepřesáhly stanovené meze.

11.1 Analýza výsledků tvářitelnosti optimalizované pohledové kapoty

Při porovnání hliníkových slitin vykazuje nejlepší tvářitelnost materiál EN AW-6111-T4P, u kterého zůstává bezpečná oblast nad hranicí 99,72 %, a to i při zvyšující se tloušťce plechu. Hodnoty ztenčení nepřesahují 0,02 %, a proto jsou považovány za zanedbatelné.

U slitiny EN AW-6016-T4P jsou dosaženy taktéž velmi dobré výsledky, přičemž bezpečná hranice přesahuje 98 % a zároveň není vyhodnocena žádná nebezpečná oblast.

Nejméně vhodných výsledků dosahuje slitina EN AW-6181-T4, u níž při tloušťce 0,6 mm dosahuje bezpečná oblast 97,19 %, zatímco při tloušťce 0,8 mm klesá na 88,96 %. Se zvyšující se tloušťkou plechu narůstá nepřetvořená oblast z 2,81 % na 11,03 %.

Na základě hodnot uvedených v Tabulce 15 lze konstatovat, že až na výjimky dochází u hodnocených materiálů k nárustu nepřetvořené oblasti se zvyšující se tloušťkou. Nejvhodnější volbou je podle těchto výsledků slitina EN AW-6111-T4P při tloušťce 0,6 mm.

Tabulka 15 Porovnání tvářitelnosti optimalizované pohledové kapoty

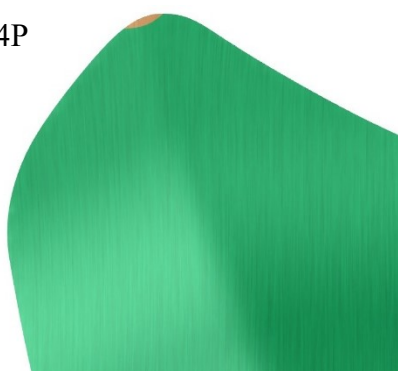
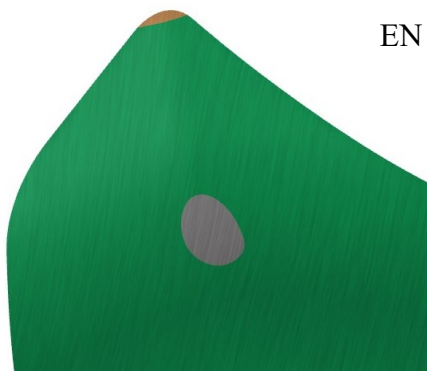
Materiál	Tloušťka plechu	Kontrolovaná oblast [%]:				
		Porušení	Ztenčení	Riziková	Bezpečná	Nepřetvořená
6181-T4	0,6 mm	0	0	0	97,19	2,81
	0,7 mm	0	0,01	0	92,65	7,34
	0,8 mm	0	0,01	0	88,96	11,03
6016-T4P	0,6 mm	0	0	0	98,05	1,95
	0,7 mm	0	0	0	98,20	1,80
	0,8 mm	0	0	0	98,32	1,68
6111-T4P	0,6 mm	0	0,02	0	99,98	0
	0,7 mm	0	0,01	0	99,97	0,02
	0,8 mm	0	0	0	99,72	0,28

Díky úpravě geometrie vychází u slitiny EN AW-6111-T4P plně přetvořená plocha dílu, a to i v oblasti oblouku, společně s eliminací nepřetvořené šedé oblasti. U materiálu EN AW-6016-T4P se naopak v místě oblouku nevyskytují nežádoucí deformace.

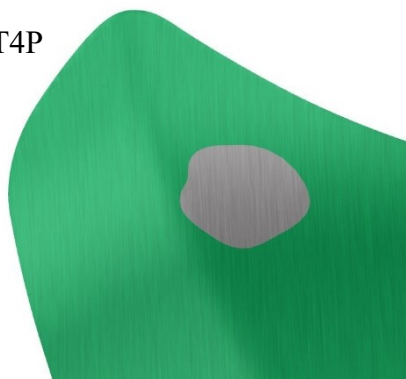
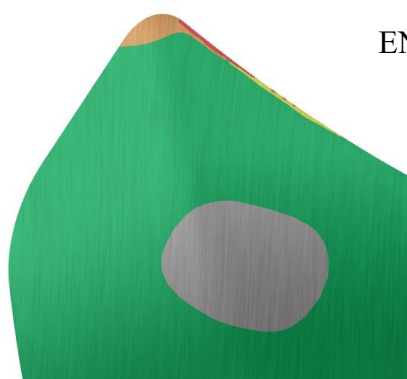
Před optimalizací:

Po optimalizaci:

EN AW-6111-T4P



EN AW-6016-T4P



Obrázek 108 Porovnání oblasti oblouku po úpravě geometrie a optimalizaci

11.2 Analýza výsledků deformací optimalizované pohledové kapoty

Hodnoty porušení jsou u slitiny EN AW-6181-T4 v blízkosti stanovené meze, konkrétně v rozmezí 79,2 % – 80,8 %. Ztenčení nepřesahuje 21,3 % a zvlnění zůstává nízké.

U slitiny EN AW-6016-T4P je naopak porušení výrazně pod mezní hodnotou, maximálně 62,7 %, ztenčení je nejnižší mezi všemi variantami, nepřekračuje 19,9 %. Zvlnění je patrné pouze u jediné varianty, a to v mírně zvýšené na hodnotě 2,8 %. Z pohledu všech stanovených kritérií je tato slitina hodnocena jako plně vyhovující.

Slitina EN AW-6111-T4P vykazuje porušení v rozmezí 82,9 % – 88,6 %, což výrazněji přesahuje hranici 80 %, avšak pouze lokálně na hraně dílu, bez výskytu trhlin či oddělení. Maximální ztenčení je 21,1 % a zvlnění je nejnižší z dostupných variant.

Za nejvhodnější variantu je nadále považována slitina EN AW-6111-T4P, která dosahuje vyrovnaných výsledků i přes překročení stanovené mezní hodnoty porušení.

Ve spojení s předchozím hodnocením tvářitelnosti se tímto potvrzuje její univerzální použitelnost. Z hlediska zvlnění jsou všechny vypočtené hodnoty považovány za zanedbatelné, jelikož ani v jednom případě nedochází k přiblížení mezní hranici 30 %.

Tabulka 16 Porovnání deformací optimalizované pohledové kapoty

Materiál	Tloušťka plechu	Porušení [%]		Ztenčení [%]		Zvlnění [%]	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
6181-T4	0,6 mm	7,0	79,2	1,4	19,4	0	1,2
	0,7 mm	3,4	80,8	0,37	20,9	0	1,40
	0,8 mm	2,3	80,2	0,09	21,3	0	1,10
6016-T4P	0,6 mm	6,5	62,7	1,50	19,2	0	2,80
	0,7 mm	7,1	60,4	1,50	19,9	0	0,51
	0,8 mm	7,1	58,9	1,50	19,9	0	0,59
6111-T4P	0,6 mm	8,6	88,6	2,10	21,1	0	0,18
	0,7 mm	7,6	83,5	2,00	20,7	0	0,04
	0,8 mm	6,7	82,9	1,80	20,3	0	0,15

11.3 Analýza výsledků tvářitelnosti optimalizované výztužné kapoty

Ocel DX56D+Z vykazuje bezpečnou oblast nad 99,26 %, nepřetvořená oblast je zároveň minimální (max. 0,06 %). Maximální napěchování vychází taktéž nízké, maximálně 0,7 %. Další oblasti se nevyskytují, takže lze tento materiál považovat za velmi dobře tvářitelný.

U materiálu DC04 je bezpečná oblast výrazně nižší, minimálně 91,56 %. Tento výsledek je ovlivněn zvýšenými hodnotami nepřetvořených zón (max. 4,97 %) a napěchováním (max. 3,51 %). Ostatní problematické oblasti se již nevyskytují, ale materiál vykazuje poměrně horší výsledky než popisovaný DX56D+Z.

Alternativa DP450 vykazuje bezpečnou oblast v mezích 79,23 % - 82,31 %, přičemž její hodnota se zvyšuje díky specifické struktuře DP oceli. Nepřetvořená oblast se přibližuje hodnotě 10 % a zvýšené napěchování (max. 9,58 %) je pro tento materiál typické.

Z dostupných výsledků a s ohledem na zmíněné využití vychází nejlépe ocel DX56D+Z díky své skvělé tvářitelnosti a eliminaci nežádoucích oblastí tvářitelnosti. Nejvhodnější volbou jsou tloušťky 0,7 mm a 0,8 mm, kde bezpečná oblast přesahuje 99,34 %. Zbylé materiály zůstávají v přijatelných mezích, přičemž zvlnění je ve všech případech minimální.

Tabulka 17 Porovnání tváritelnosti optimalizované výztužné kapoty

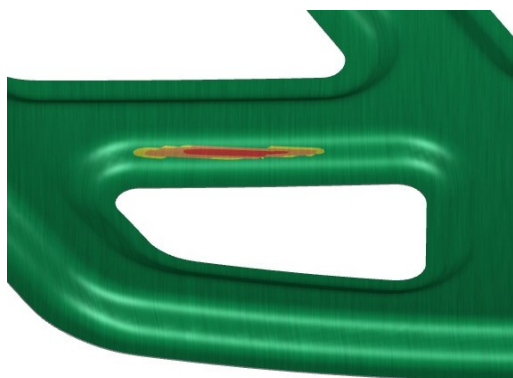
Materiál	Tl. plechu	Kontrolovaná oblast [%]:						
		Porušení	Ztenčení	Rizik.	Bezp.	Nepřetv.	Napěch.	Zvlnění
DX56D+Z	0,7 mm	0	0	0	99,34	0,06	0,60	0
	0,8 mm	0	0	0	99,51	0,03	0,45	0
	0,9 mm	0	0	0	99,26	0,05	0,69	0
DC04	0,9 mm	0	0	0	92,30	4,40	3,30	0
	1,0 mm	0	0	0	91,94	4,56	3,51	0
	1,1 mm	0	0	0	91,56	4,97	3,47	0
DP450	0,8 mm	0	0	0	79,23	11,18	9,58	0,01
	0,9 mm	0	0	0	80,71	10,28	9,01	0,01
	1,0 mm	0	0	0	82,31	9,42	8,27	0,01

Po úpravě výřezu výztužné části kapoty dochází k eliminaci nežádoucích deformací. U oceli DX56D+Z a DC04 je dosaženo plně přetvořené bezpečné oblasti. Ocel DP450 rovněž nevykazuje nežádoucí deformace, avšak okolo výřezu s méně příznivým přetvořením.

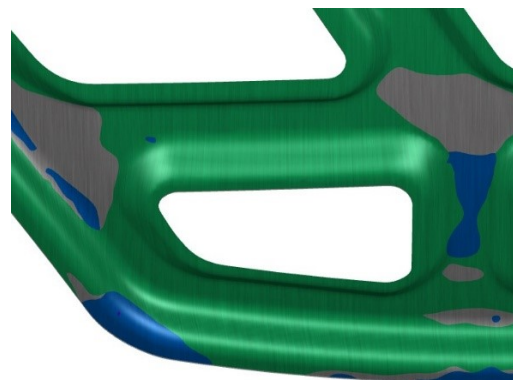
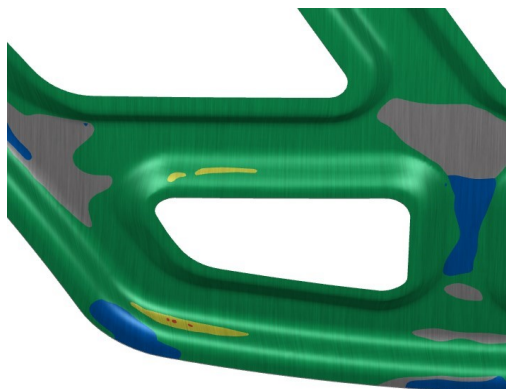
Před optimalizací:

Po optimalizaci:

Ocel DC04



Ocel DP450



Obrázek 109 Porovnání oblasti výřezu po úpravě geometrie a optimalizaci

11.4 Analýza výsledků deformací optimalizované výztužné kapoty

Ocel DX56D+Z dosahuje maximálního porušení 64,5 % a ztenčení mírně překračuje hranici 25 % u tloušťky 0,7 mm (max. 25,6 %), zatímco u ostatních variant je pod touto hodnotou. Zvlnění je nejvyšší taktéž u varianty 0,7 mm, ale při zvýšení tloušťky plechu hodnota klesá.

Ocel DC04 vykazuje mírnější porušení 53,4 %, ztenčení je v mezích 24,5 % – 25,2 %. Zvlnění dosahuje podobných hodnot jako u oceli DX56D+Z, a to v jednotkách procent. Materiál vykazuje stabilní chování bez výrazných překročení mezních parametrů deformace.

Maximální porušení u oceli DP450 dosahuje u jedné varianty hraniční hodnoty 80,8 %. Ztenčení se u všech tří variant pohybuje taktéž nad stanovenou hranicí 25 %, ale hodnoty do 30 % jsou stále z hlediska zvoleného materiálu přijatelné. Oproti zvoleným nízkouhlíkovým ocelím jsou veškeré hodnoty oceli DP450 hraniční.

Z pohledu deformací vykazuje nejlepší výsledky ocel DC04, která dosahuje v určitých variantách nejnižších hodnot. Nicméně v kombinaci s předchozím hodnocením tváritelnosti však zůstává ocel DX56D+Z nejvhodnější volbou, konkrétně pro tloušťku 0,8 mm.

Tabulka 18 Porovnání deformací optimalizované výztužné kapoty

Materiál	Tloušťka plechu	Porušení [%]		Ztenčení [%]		Zvlnění [%]	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
DX56D+Z	0,7 mm	4,0	62,4	0,90	25,6	0	9,9
	0,8 mm	4,2	60,8	0,54	23,8	0	5,6
	0,9 mm	4,1	64,5	1,00	23,8	0	5,9
DC04	0,9 mm	2,7	53,4	0,17	25,2	0	6,4
	1,0 mm	2,6	52,5	0,57	24,8	0	7,6
	1,1 mm	2,5	51,0	0,63	24,5	0	6,5
DP450	0,8 mm	3,4	80,8	0,38	26,8	0	8,6
	0,9 mm	3,2	78,8	0,09	27,1	0	8,5
	1,0 mm	3,2	77,9	0,01	27,1	0	8,3

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá optimalizací tvaru plechového dílu a technologického procesu plošného tváření v softwaru AutoForm. Cílem je navrhnout vhodnou geometrii sestavy složené z pohledové a výztužné části kapoty automobilu. Dále zvolit odpovídající materiály a upravit výrobní parametry procesu tváření tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků z hlediska tvářitelnosti, eliminace defektů a výrobní efektivity.

Teoretická část práce je uspořádána s cílem poskytnout potřebný základ pro praktickou část. Nejprve jsou popsány klíčové pojmy jako napětí, deformace, elasticko-plastické chování a deformační zpevnění, které tvoří základní rámec pro pochopení chování plechových dílů během tváření. Podrobně jsou rozebrány jednotlivé technologie plošného tváření, především hluboké tažení. V této kapitole nechybí ani popis maziv a jejich vlivu na proces.

Součástí druhé kapitoly je detailní přehled tvářitelných materiálů, především ocelí a hliníkových slitin z hlediska jejich mechanických vlastností, chemického složení a vhodnosti pro daný způsob tváření. Třetí kapitola se věnuje přímo software AutoForm z hlediska jeho možností využití, požadovaných vstupů a získaných výstupů.

Důležitou úlohu hraje i čtvrtá kapitola, která se v první části věnuje mechanickým a technologickým zkouškám plechů. Dále jsou popsány experimentální metody stanovení diagramu mezních deformací (FLD), který slouží jako základní nástroj pro vyhodnocení simulačních výsledků.

V praktické části je nejprve v plochách vytvořen 3D model sestavy kapoty, který zahrnuje pohledovou i výztužnou část. Model je zpracován v programu CATIA V5 a následně je každý díl zvlášť importován do simulačního softwaru AutoForm.

U pohledové části sestavy jsou porovnávány tři slitiny hliníku, přičemž u všech variant dochází po optimalizaci ke snížení tloušťky z původních 0,8 mm na 0,6 mm. Při porovnání výsledků simulací však nejlepších výsledků z hlediska deformací a tvářitelnosti dosahuje slitina EN AW-6111-T4P, kde je díl plně přetvořen s minimální kritickou oblastí při zachování požadovaných mechanických vlastností. Důraz je kladen právě na minimalizaci tloušťky a co největší přetvoření.

U výztužné části sestavy jsou porovnávány dvě nízkouhlíkové oceli a jedna vysokopevnostní. Nejlepších výsledků dosahuje materiál DX56D+Z, který vykazuje největší

bezpečnou tvářitelnost a bezproblémový průběh simulací včetně splnění podmínek deformací. U této oceli není tloušťka materiálu snižována a zůstává na hodnotě 0,8 mm, která je z hlediska výrobní proveditelnosti a mechanických požadavků vyhodnocena jako optimální. Přesto je možné uvažovat i o případném snížení na 0,7 mm, za předpokladu detailnějšího prověření dosažených výsledků.

Ocel DP450 dosahuje výrazně horších výsledků, zejména kvůli svému chemickému složení, a to i po optimalizaci. Tloušťka zůstává na hodnotě 0,8 mm. Stejně tak ocel DC04 zůstává na hodnotě 1 mm při méně vhodných výsledcích oproti oceli DX56D+Z.

Na základě simulací je navržena optimální kombinace materiálů a parametrů tváření celé kapoty, která zahrnuje pohledovou a výztužnou část jako jednu funkční sestavu. Finální volba tloušťky plechu je tedy 0,6 mm pro pohledový díl a 0,8 mm pro výztužný díl. Tato kombinace odpovídá výborné tvářitelnosti, dostatečné pevnosti a efektivní úspoře hmotnosti. Celková hmotnost sestavy při těchto parametrech činí 6,88 kg.

Možností rozšíření práce by mohlo být například ekonomické zhodnocení optimalizovaných variant nebo výběr dalších dostupných a dobře tvářitelných materiálů, které by zajistily vhodné rozšíření nebo doplnění do stávajících uváděných výrobních procesů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KAKANDIKAR, Ganesh M. a NANDEDKAR, Vilas M. *Sheet Metal Forming Optimization: Bioinspired Approaches*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-9614-9.
- [2] HOSFORD, William F. a CADDELL, Robert M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [3] CALLISTER, William D. a RETHWISCH, David G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 978-1-11940-543-6.
- [4] BANABIC, Dorel. *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Heidelberg: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-88112-4.
- [5] BHADESHIA, Harshad a HONEYCOMBE, Robert. *Steels: Microstructure and Properties*. 4th ed. Oxford: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-100270-4.
- [6] NEE, Andrew Y. C. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. London: Springer, 2015. ISBN 978-1-4471-4669-8.
- [7] ALTAN, Taylan a TEKKAYA, A. Erman. *Sheet Metal Forming: Fundamentals*. Materials Park: ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-842-8.
- [8] FU, Ming Wang. *Design and Development of Metal-Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation*. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-46462-6.
- [9] HU, Ping; MA, Ning; LIU, Li-zhong a ZHU, Yi-guo. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming: Analysis, Simulation and Engineering Applications*. London: Springer, 2013. ISBN 978-1-4471-4098-6.
- [10] CABALLERO, Francisca G. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. Elsevier, 2022. ISBN 978-0-12-819733-2.
- [11] VALBERG, Henry S. *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-51823-9.
- [12] HINGOLE, Rahulkumar Shivajirao. *Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming*. Heidelberg: Springer, 2015. ISBN 978-3-662-44496-2.

- [13] LIM, Yongseob; VENUGOPAL, Ravinder a ULISOY, Galip. *Process Control for Sheet-Metal Stamping: Process Modeling, Controller Design and Shop-Floor Implementation*. London: Springer, 2014. ISBN 978-1-4471-6283-4.
- [14] NIELSEN, Chris V. a MARTINS, Paulo A. F. *Metal Forming: Formability, Simulation, and Tool Design*. London: Elsevier, 2021. ISBN 978-0-323-85255-5.
- [15] LU, Zipeng; LI, Di; CAO, Linlin; CUI, Hongjian a XU, Jiachuan. Springback Control in Complex Sheet-Metal Forming Based on Advanced High-Strength Steel. Online. *Coatings*. 2023, roč. 13, č. 5, article 930. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings13050930>. [cit. 2025-02-13].
- [16] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 2nd ed. South Norwalk: Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3492-1.
- [17] ALTAN, Taylan a TEKKAYA, A. Erman. *Sheet Metal Forming: Processes and Applications*. Materials Park: ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-844-2.
- [18] EMMENS, Wilko C. *Formability: A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-21903-0.
- [19] KAKANDIKAR, Ganesh M.; AGRAWAL, Anupam a KUMAR, D. Ravi. *Metal Forming Processes: Developments in Experimental and Numerical Approaches*. Boca Raton: CRC Press, 2023. ISBN 978-1-032-12890-0.
- [20] WANG, Darren. *Handbook of Metal Forming Process*. New York: NY Research Press, 2015. ISBN 978-1-63238-253-5.
- [21] MULAY, Amrut; SINGH, Swadesh Kumar a KOCANDA, Andrzej. *Analysis and Optimization of Sheet Metal Forming Processes*. Boca Raton: CRC Press, 2024. ISBN 978-1-032-57941-2.
- [22] DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 5. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [23] PEREIRA, Rui; PEIXINHO, Nuno a COSTA, Sérgio L. A Review of Sheet Metal Forming Evaluation of Advanced High-Strength Steels (AHSS). Online. *Metals*. 2024, roč. 14, č. 4, article 394. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met14040394>. [cit. 2025-01-23].

- [24] TRZEPIECIŃSKI, Tomasz a NAJM, Sherwan Mohammed. Current Trends in Metallic Materials for Body Panels and Structural Members Used in the Automotive Industry. Online. *Materials*. 2024, roč. 17, č. 3, article 590. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17030590>. [cit. 2025-01-23].
- [25] *AutoForm*. Online. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/>. [cit. 2025-01-19].
- [26] ZHANG, Huiju; WEI, Wenbo; LONG, Sifang; ZHOU, Manyi a LI, Chunhui. Optimization of Stamping Process Parameters for Sustainable Manufacturing: Numerical Simulation Based on AutoForm. Online. *Sustainability*. 2025, roč. 17, č. 1, article 341. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su17010341>. [cit. 2025-02-13].
- [27] MACHÁLEK, Jakub; ČADA, Radek a FRODLOVÁ, Barbora. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM-STAMP 2G*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2715-5.
- [28] WANG, Haibo; NIU, Qiang a YAN, Yu. Study of Anisotropic Behavior in Sheet Metal Forming. Online. *Materials*. 2024, roč. 17, č. 9, article 2031. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17092031>. [cit. 2025-01-21].
- [29] DU, K.; HUANG, S.; WANG, H.; FANXING, Y.; HONGJUN, H. et al. Effect of Different Yield Criteria and Material Parameter Identification Methods on the Description Accuracy of the Anisotropic Behavior of 5182-O Aluminum Alloy. Online. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022, roč. 31, č. 2, s. 1077–1095. ISSN 1544-1024. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06295-x>. [cit. 2025-01-19].
- [30] BUTUC, Marilena C.; VINCZE, Gabriela; SANTOS, Rafael; PEREIRA, António; SANTOS, Abel D. et al. Formability of third generation advanced high strength steel: experimental and theoretical approach. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024, roč. 281, č. 1, article 109559. ISSN 1879-2162. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109559>. [cit. 2025-02-03].
- [31] LUBLINER, Jacob a PAPADOPOULOS, Panayiotis. *Introduction to Solid Mechanics: An Integrated Approach*. 2nd ed. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-18877-5.

- [32] WANG, Z. R.; HU, W. L.; YUAN, S. J. a WANG, X. S. *Engineering Plasticity: Theory and Applications in Metal Forming*. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-23730-3.
- [33] ELSAYED, Ahmed; GONZALEZ, Diego a YAKUSHINA, Evgenia. Development of the Forming Limit Diagram for AA6016-T4 at Room Temperature Using Uniaxial Tension of Notched Samples and a Biaxial Test. Online. *Crystals*. 2023, roč. 13, č. 7, article 1134. ISSN 2073-4352. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/cryst13071134>. [cit. 2025-02-05].
- [34] HOU, Yong; MYUNG, Dongjoon; PARK, Jong Kyu; MIN, Junying; LEE, Hyung-Rim et al. A Review of Characterization and Modelling Approaches for Sheet Metal Forming of Lightweight Metallic Materials. Online. *Materials*. 2023, roč. 16, č. 2, article 836. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16020836>. [cit. 2025-02-13].
- [35] SHEN, Xiulin; LU, Xu; GUO, Jinxuan; LIU, Ying; QI, Junyi et al. Nondestructive Testing of Metal Cracks: Contemporary Methods and Emerging Challenges. Online. *Crystals*. 2023, roč. 14, č. 1, article 54. ISSN 2073-4352. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/cryst14010054>. [cit. 2025-01-19].
- [36] JAMIL, Muhammad; KHAN, Aqib M.; HEGAB, Hussien; KUMAR GUPTA, Munish; SHARMA, Neeraj et al. Internal Cracks and Non-Metallic Inclusions as Root Causes of Casting Failure in Sugar Mill Roller Shafts. Online. *Materials*. 2019, roč. 12, č. 15, article 2474. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12152474>. [cit. 2025-01-21].
- [37] Číselné označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN 573-1:2005 (42 1401). Online. Feron. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-nezelezných-kovu/?typ=2>. [cit. 2025-03-15].
- [38] EN AW 6181 | Al SiMg0.8. Online. Thyssenkrupp. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials-processing-europe.com/en/aluminum/alloy-group-6000-or-en-aw-6016-or-en-aw-6061a-or-en-aw-6063a-or-en-aw-6082a-or-en-aw-6181/en-aw-6181-or-al-silmg08>. [cit. 2025-03-15].
- [39] 6016 T4P Aluminum Alloy Sheet Used in Automobile Fender. Online. JIMA Aluminum. Dostupné z: <https://www.aluminumalloyplate.com/sale-27100985-6016-t4p-aluminum-alloy-sheet-used-in-automobile-fender.html>. [cit. 2025-03-15].

- [40] 6111 Automotive Aluminum for Structural Parts. Online. HAOMEI Auto Aluminium. Dostupné z: <https://www.autoaluminumsheet.com/product/6111-automotive-aluminum-for-structural-parts.html>. [cit. 2025-03-15].
- [41] STEEL PRO GROUP. *DX56D Steel: Properties, Processes, Characteristics, Application*. Online. 2025. Dostupné z: <https://steelprogroup.com/galvanized-steel/grades-galvanized-steel/dx56d-steel-guideline/>. [cit. 2025-04-01].
- [42] STEEL PRO GROUP. *DC04 Steel | 1.0338: Composition, Properties, Processing and Uses*. Online. 2025. Dostupné z: <https://steelprogroup.com/galvanized-steel/grades-galvanized-steel/dco4-steel-guide/>. [cit. 2025-04-01].
- [43] SALZGITTER FLACHSTAHL. *DX56D+Z (CR4*) Mild, galvanised steel grades for cold forming*. Online. 2022. Dostupné z: https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationsmaterial/produktinformationen/feuerverzinkte_produkte/eng/dx56d.pdf. [cit. 2025-04-01].
- [44] PSD AERO. *DC04 steel - Fe P04 - St 14 - ES*. Online. 2025. Dostupné z: https://psdaero.com/steel-metal-alloy-aerospace/steel-sheet-dc04/?utm_source=chatgpt.com. [cit. 2025-04-01].
- [45] THYSSENKRUPP. *Dual-phase steel | HCT450X - HCT980XG*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials-processing-europe.com/en/c-steel/cold-rolled-sheet/multiphase-steel/dual-phase-steel-or-hct450x-hct980xg>. [cit. 2025-04-01].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Deformace, translace a rotace linie v materiálu [2].....	15
Obrázek 2 Tahové diagramy dvou případů napětí-deformace [3]	16
Obrázek 3 Mechanismy plastické deformace [4].....	17
Obrázek 4 Typy procesu hlubokého tažení [7]	20
Obrázek 5 Schéma brzdné drážky [2]	21
Obrázek 6 Schéma mechanického lisu [13].....	23
Obrázek 7 Schéma hydraulického lisu [13]	23
Obrázek 8 Vrásnění při hlubokém tažení [14]	24
Obrázek 9 Schéma procesu stříhání materiálu [17]	25
Obrázek 10 Schéma fáze procesu stříhání materiálu [16]	26
Obrázek 11 Schéma ohybu plechu V a U s použitím matrice [19].....	26
Obrázek 12 Schéma tříbodového ohybu plechu V a U [19]	27
Obrázek 13 Rozdíl mezi vysekáváním (vlevo) a prorážením (vpravo) [17].....	27
Obrázek 14 Fáze procesu vysekávání a prorážení [17].....	28
Obrázek 15 Průběh procesu válcování [17]	28
Obrázek 16 Skupiny standardních válcovaných produktů [17]	29
Obrázek 17 Hydroformování plechu pomocí razníku [16].....	29
Obrázek 18 Hydroformování plechu pomocí matrice [16].....	30
Obrázek 19 Mechanismy mazání včetně Stribeckovy křivky [21]	31
Obrázek 20 Přehled ocelí používaných v automobilovém průmyslu [23].....	34
Obrázek 21 Vztah mezi prodloužením a zmenšením průřezu [16].....	39
Obrázek 22 Možné výstupy návrhu procesu při použití AutoForm [4].....	41
Obrázek 23 Identifikace rizikových oblastí deformace	42
Obrázek 24 Identifikace rizikových oblastí ztenčení	43
Obrázek 25 Zobrazení oblastí tvárnosti dílu	43
Obrázek 26 Tahová křivka a prodloužení [7]	44
Obrázek 27 Schéma měření tvrdosti podle Brinella [16].....	46
Obrázek 28 Schéma měření tvrdosti podle Rockwella [16]	46
Obrázek 29 Měření tvrdosti podle Vickerse [16]	47
Obrázek 30 Vzorky pro zkoušku anizotropie [29].....	48
Obrázek 31 Hloubení podle Erichsena [22].....	48
Obrázek 32 Tvary trhlin [22]	49
Obrázek 33 Princip kalíškové zkoušky [22]	49
Obrázek 34 FLD Diagramy experimentálních testů [4].....	50

Obrázek 35 Rozložení napětí při dvojosém testování [31]	50
Obrázek 36 Vzorek Nakajima testu [32]	51
Obrázek 37 Vzorek Hasek testu [4]	51
Obrázek 38 Zařízení pro hydraulickou zkoušku [22]	52
Obrázek 39 Schéma Marciniak testu [7]	53
Obrázek 40 Mezní deformace Goodwin a Keeler [18]	53
Obrázek 41 Příklady posunu kritických bodů [4]	54
Obrázek 42 Definice indexů závažnosti [4]	55
Obrázek 43 Ultrazvuková zkouška [36]	56
Obrázek 44 Magnetická zkouška [35]	56
Obrázek 45 Pohledová kapota	59
Obrázek 46 Výztužná kapota	59
Obrázek 47 Znázornění oblastí pohledové kapoty	62
Obrázek 48 Vyhodnocení plochých míst pohledové kapoty	62
Obrázek 49 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu EN AW-6181-T4_0,8 mm	63
Obrázek 50 Nevhodně přetvořené zóny v místě oblouku	64
Obrázek 51 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu EN AW-6016-T4P_0,8 mm	64
Obrázek 52 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu EN AW-6111-T4P_0,8 mm	65
Obrázek 53 Důsledek posouvání brzdných drážek	66
Obrázek 54 Úprava geometrie oblouku pohledové kapoty	67
Obrázek 55 Zobrazení sekcí v softwaru AutoForm R8	67
Obrázek 56 Vložení dílu do softwaru AutoForm R8	68
Obrázek 57 Nastavení parametrů síťování a detail zjemnění	68
Obrázek 58 Pohledová kapota po vytvoření síťování	68
Obrázek 59 Polární diagram vyhodnocení podřezání	69
Obrázek 60 Volba materiálu včetně tloušťky	69
Obrázek 61 Výsledky předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Part	70
Obrázek 62 Zobrazení plánu operací	71
Obrázek 63 Zvýraznění tažné a ostříhovací hrany	71
Obrázek 64 Přeskočení nepotřebných operací	72
Obrázek 65 Odsazení dílu od předtvořeného plechu	72
Obrázek 66 Nastavení parametrů přechodového profilu	73
Obrázek 67 Přechodová zóna pohledové kapoty	74
Obrázek 68 Nastavení předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Die Face	74
Obrázek 69 Výsledky předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Die Face	75

Obrázek 70 Nastavení a výběr obrysu polotovaru	75
Obrázek 71 Vizualizace obrysu polotovaru	76
Obrázek 72 Výběr křivky brzdných drážek	76
Obrázek 73 Rozdělení segmentů brzdných drážek	77
Obrázek 74 Nastavení profilu brzdné drážky Segmentu 1	77
Obrázek 75 Nastavení podmínek mazání.....	78
Obrázek 76 Výběr požadovaných výsledků simulace	78
Obrázek 77 Vyhodnocení tvářitelnosti pohledové kapoty	80
Obrázek 78 Vyhodnocení porušení pohledové kapoty	81
Obrázek 79 Vyhodnocení ztenčení pohledové kapoty.....	82
Obrázek 80 Vyhodnocení zvlnění pohledové kapoty	83
Obrázek 81 Porovnání plochých míst vlivem úpravy geometrie.....	83
Obrázek 82 Optimalizace materiálu EN AW-6016-T4P_0,6 mm	84
Obrázek 83 Optimalizace materiálu EN AW-6181-T4_0,6 mm	85
Obrázek 84 Porovnání nevhodných oblastí zvolených nízkouhlíkových ocelí	88
Obrázek 85 Zobrazení přetvoření a vzniklých trhlin oceli DP450	88
Obrázek 86 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu DX56D+Z_0,8 mm	89
Obrázek 87 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu DC04_1 mm	90
Obrázek 88 Předběžná analýza tvářitelnosti materiálu DP450_0,8 mm.....	91
Obrázek 89 Úprava geometrie oblouku výztužné kapoty a zobrazení odsazení.....	93
Obrázek 90 Úprava tvarových výřezů výztužné kapoty	93
Obrázek 91 Vložení dílu a určení směru lisování	94
Obrázek 92 Polární diagram vyhodnocení podřezání_S1	94
Obrázek 93 Výsledky předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Part_S1	95
Obrázek 94 Plán operací a ukázka operace F-40	96
Obrázek 95 Nastavení parametrů přechodové profilu_S1.....	97
Obrázek 96 Přechodová zóna výztužné kapoty s vyplněnými výřezy	98
Obrázek 97 Nastavení předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Die Face_S1	98
Obrázek 98 Výsledky předběžné analýzy tvářitelnosti sekce Die Face_S1	99
Obrázek 99 Nastavení a vizualizace obrysu polotovaru	99
Obrázek 100 Nastavení brzdných drážek výztužné kapoty	100
Obrázek 101 Nastavení podmínek mazání_S1	101
Obrázek 102 Vyhodnocení tvářitelnosti výztužné kapoty	102
Obrázek 103 Vyhodnocení porušení výztužné kapoty	103
Obrázek 104 Vyhodnocení ztenčení výztužné kapoty	104

Obrázek 105 Vyhodnocení zvlnění výztužné kapoty	105
Obrázek 106 Optimalizace materiálu DC04_1 mm.....	106
Obrázek 107 Optimalizace materiálu DP450_0,8 mm	107
Obrázek 108 Porovnání oblasti oblouku po úpravě geometrie a optimalizaci	109
Obrázek 109 Porovnání oblasti výřezu po úpravě geometrie a optimalizaci	111

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti nízkouhlíkových ocelí válcovaných za studena dle EN 10130 [24]..	35
Tabulka 2 Vlastnosti nerezových ocelí [7]	36
Tabulka 3 Rozdělení sérií hliníkových slitin pro tváření [24]	38
Tabulka 4 Velikosti rádiusů Hasek testu [4]	51
Tabulka 5 Porovnání mechanických vlastností vybraných slitin hliníku	60
Tabulka 6 Chemické složení slitiny EN AW-6181-T4 (v % hm.) [38]	61
Tabulka 7 Chemické složení slitiny EN AW-6016-T4P (v % hm.) [39]	61
Tabulka 8 Chemické složení slitiny EN AW-6111-T4P (v % hm.) [40]	61
Tabulka 9 Porovnání předběžných výsledků pro vybrané slitiny hliníku.....	66
Tabulka 10 Porovnání mechanických vlastností vybraných ocelí	86
Tabulka 11 Chemické složení oceli DX56D+Z (v % hm.) [43]	87
Tabulka 12 Chemické složení oceli DC04 (v % hm.) [44]	87
Tabulka 13 Chemické složení oceli DP450 (v % hm.) [45]	87
Tabulka 14 Porovnání předběžných výsledků tvářitelnosti pro vybrané oceli	92
Tabulka 15 Porovnání tvářitelnosti optimalizované pohledové kapoty	108
Tabulka 16 Porovnání deformací optimalizované pohledové kapoty	110
Tabulka 17 Porovnání tvářitelnosti optimalizované výztužné kapoty	111
Tabulka 18 Porovnání deformací optimalizované výztužné kapoty	112

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
A_g	[%]	Mezní tažnost
$A_{80,50}$	[%]	Smluvní tažnost
a	[mm ²]	Původní průřezová plocha
$\varepsilon_{1,2}$	[-]	Hlavní poměrné deformace
ε_{10}	[-]	Mezní poměrná deformace
F_b	[N]	Brzdná síla
F_d	[N]	Síla přidržovače
F_s	[N]	Střižná síla
L	[mm]	Délka dráhy deformace
l	[mm]	Délka po deformaci
l_0	[mm]	Délka před deformací
μ	[-]	Koeficient tření
n	[-]	Exponent deformačního zpevnění
$R_{p0.2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
r_m	[-]	Průměrný anizotropní koeficient
r	[-]	Plastický deformační poměr
τ	[MPa]	Aktuální smykové napětí
τ_e	[MPa]	Mez kluzu ve smyku
τ_m	[MPa]	Mez pevnosti ve smyku
σ_{ij}	[MPa]	Tenzor napětí druhého řádu
σ_0	[MPa]	Počáteční mez kluzu
W	[J]	Práce potřebná k deformaci

Zkratka	Význam
AHSS	Advanced High Strength Steel (Vysokopevnostní oceli)
AW	Aluminium Wrought (Válcované slitiny hliníku)
BCC	Body Centered Cubic (Krychlová prostorově středěná mřížka)
CAD	Computer Aided Design (Počítačová podpora konstrukce)
EN	European Norm (Evropská norma)
FCC	Face Centered Cubic (Krychlová plošně středěná mřížka)
FLD	Forming Limit Diagram (Diagram mezi tváření)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
RE	Rare Earth (Vzácné zeminy)
UTS	Ultimate Tensile Strength (Mez pevnosti v tahu)
% hm	Hmotnostní procento

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: PRESSLINE 2200T

PŘÍLOHA P I: PRESSLINE 2200T



Press Specifications

General	Press Classification		Tandem Large	
	Automation		Robots	
Performance	Max Stroke Rate	18 1/min		
	Min Stroke Rate	1 1/min		
	Tool Change Time	0.75 h		
Size	Press 1		Press 2 - 6	
	Ram Length	4000mm	Ram Length	3500mm
	Ram Width	3500mm	Ram Width	3500mm
	Bed Length	4000mm	Bed Length	3500mm
	Bed Width	3500mm	Bed Width	3500mm
	Shut Height	1250mm	Shut Height	1200mm
	Stroke	900mm	Stroke	800mm
	Pn. Actuation	Upper Pneumatics	Pn. Actuation	Upper Pneumatics
Force	Binder Force	5500 kN	Binder Force	5500 kN
	Ram Tonnage	22000 kN	Ram Tonnage	22000 kN
Transfer System	