

# **Optimalizace dílu automobilové karoserie s využitím numerických simulací v programu Autoform**

Bc. Štěpán Broža

---

Diplomová práce  
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Štěpán Broža
Osobní číslo:	T19494
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Studijní obor:	Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Optimalizace dílu automobilové karoserie s využitím numerických simulací v programu Autoform.

### Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést 3D konstrukci modelu dílu automobilové karoserie.
3. Provést simulaci dílu automobilové karoserie v software autoform.
4. Navrhnout optimalizace dílu a procesu tváření.

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, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 9788021447479.  
BANABIC, Dorel. Sheet metal forming processes: constructive modelling and numerical simulation. Berlin: Springer, [2010], xiii, 301 s. ISBN 978-3-540-88112-4.  
WANG, Darren, ed. Handbook of metal forming process. New York: NY research press, [2015], vi, 212 s. ISBN 978-1-63238-253-5.

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

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

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

L.S.

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- 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 autorského zákona 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá simulací tváření a jejich výhody pro práci v praxi. Práce prvně obsahuje teoretické znalosti ohledně tváření, materiálech vhodného pro tváření a jeho testování, poté je přiblížena problematika simulací. V praktické části je na jednom dílci provedeno více simulací s různými podmínkami, kde lze vidět dané výhody a možnosti, které simulační programy nabízejí.

Klíčová slova: tváření, plošné tváření, simulace, AutoForm.

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the simulation formation and their advantages for practice. The work firstly contains theoretical knowledge about forming, material suitable for forming and its testing, then the problem of simulations is approached. In the practical part, several simulations with different conditions are performed on one part, where you can see the advantages and possibilities that the simulation programs offer.

Keywords: forming, surface forming, simulation, AutoForm.

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Ovsíkovi Ph.D. za odborné vedení, čas, který mi věnoval, jak při zpracování teoretické části, tak i za pomoc při tvoření simulací a diskuzi nad výsledky a také za dobré rady po celou dobu tvorby práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>1 MATERIÁLY NA PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....</b>	<b>12</b>
1.1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PLECHU PRO TVÁŘENÍ.....	13
1.1.1 Pohliníkové plechy .....	13
1.1.2 Pozinkované plechy .....	13
1.1.3 Pocínované plechy .....	14
1.1.4 Pochromované plechy .....	14
1.1.5 Plechy s povlakem z plastické hmoty .....	14
1.2 ROZMĚROVÁ PŘESNOST A KVALITA PLECHŮ.....	15
1.3 STÁRNUTÍ PLECHŮ.....	15
1.3.1 Proces stárnutí po rychlém ochlazení.....	16
1.3.2 Proces stárnutí po tváření za studena .....	16
1.3.3 Způsob snížení vlivu procesu stárnutí.....	16
<b>2 TVÁŘENÍ.....</b>	<b>17</b>
2.1 ROZDĚLENÍ TVÁŘENÍ.....	18
2.1.1 Tváření za studena.....	18
2.1.2 Tváření za tepla .....	18
2.1.3 Tváření za poloohřevu.....	19
2.2 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ.....	19
2.2.1 Kování .....	19
2.2.2 Válcování .....	20
2.2.3 Protlačování.....	20
2.2.4 Tažení .....	21
2.3 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....	21
2.3.1 Stříhání .....	21
2.3.2 Ohýbání .....	23
2.3.3 Tažení .....	26
2.3.4 Rovnání .....	27
<b>3 METODY MĚŘENÍ.....</b>	<b>29</b>
3.1 ZJIŠŤOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PLECHŮ .....	29
3.1.1 Zkouška tahem .....	30
3.1.2 Zkouška tvrdosti.....	31
3.2 ZJIŠŤOVÁNÍ TVÁŘITELNOSTI PLECHŮ POMOCÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK.....	31
3.2.1 Zkouška hloubením podle Erichsena .....	31
3.2.2 Zkouška na rozšiřovacím otvoru podle Siebela a Pompa .....	32
3.2.3 Zkouška tažením v kuželové tažnici podle Fukuiho .....	33
3.2.4 Zkouška kalíškovací.....	33
3.2.5 Zkouška podle Gross – Engelhardta .....	34
3.2.6 Zkouška lámavosti .....	34

3.2.7	Zkouška dvojitým a střídavým ohybem.....	35
3.2.8	Komplexní vyhodnocení tvářitelnosti – index tvářitelnosti, Liletovo kritérium.....	36
<b>4</b>	<b>SIMULACE TVÁŘENÍ.....</b>	<b>38</b>
4.1	VLASTNOSTI SYSTÉMU PRO SIMULACI.....	38
4.2	ANALÝZA TVÁŘENÍ KOVŮ.....	38
4.2.1	Okrajové podmínky pro simulaci.....	39
4.2.2	Popis výsledků.....	40
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>NASTAVENÍ SIMULACE.....</b>	<b>47</b>
6.1	SOFTWARE NX.....	47
6.1.1	Konstrukce 3D modelu.....	47
6.2	SOFTWARE AUTOFORM.....	47
6.3	PARAMETRY DÍLU.....	48
6.3.1	Materiál 1.4512.....	48
6.3.2	Materiál HCT780T.....	49
6.3.3	Materiál DX56D.....	50
6.4	VOLBA PARAMETRŮ STROJE.....	51
6.5	POSTUP NASTAVENÍ SIMULACE.....	52
6.5.1	Nastavení dílu.....	52
6.5.2	Plán kroků tváření.....	54
6.5.3	Generace funkčních ploch nástroje.....	55
6.5.4	Vytvoření plechu.....	57
6.5.5	Nastavení procesu a mazání.....	58
6.5.6	Nastavení výpočtu.....	59
<b>7</b>	<b>PŘEDBĚŽNÉ ANALÝZY.....</b>	<b>60</b>
7.1	PŘEDBĚŽNÁ ANALÝZY PRO MATERIÁL HCT780T.....	60
7.2	PŘEDBĚŽNÁ ANALÝZY PRO MATERIÁL 1.4512.....	61
7.3	PŘEDBĚŽNÁ ANALÝZY PRO MATERIÁL DX56D.....	62
<b>8</b>	<b>OPTIMALIZACE DÍLU.....</b>	<b>63</b>
<b>9</b>	<b>VÝSLEDKY SIMULACE.....</b>	<b>64</b>
9.1	TVÁŘITELNOST.....	64
9.1.1	Materiál 1.4512.....	65
9.1.2	Materiál DX56D.....	68
9.2	PORUŠENÍ.....	71
9.2.1	Materiál 1.4512.....	71
9.2.2	Materiál DX56D.....	73
9.3	ZVLNĚNÍ.....	75



9.3.1	Materiál 1.4512 .....	75
9.3.2	Materiál DX56D.....	77
9.4	ZTENČENÍ.....	79
9.4.1	Materiál 1.4512 .....	79
9.4.2	Materiál DX56D.....	81
<b>10</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>83</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>96</b>

## ÚVOD

Automobilový průmysl klade stále větší nároky na používané materiály při výrobě plošným tvářením. Požadavky jsou, aby výrobek byl co nejlehčí a zároveň vykazoval nejlepší vlastnosti, splňoval jak optimální podmínky pro provoz, tak i bezpečnost pro cestující v automobilu a také pro výrobu. V současné době se rozrůstá využití plošného tvářením. Použití simulace tyto možnosti výrazně rozšiřuje a přispívá k úspoře materiálu i času.

Cílem této práce je přiblížit možnosti využití numerických simulací, které napomáhají určit nejvhodnější materiál a postup jeho výroby ke splnění požadavků daného dílce. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou popsány materiály vhodné ke tvářením, jejich testování a dále jednotlivé způsoby tvářením. V závěru této části je přiblížena simulace tvářením, její princip a možnosti využití.

V praktické části je uveden dílec – kapota, na které jsou prováděny simulace. Pro porovnání jsou vytvořeny simulace o třech různých materiálech, jejichž výsledky jsou vyhodnoceny a vybrány dva vhodnější materiály kde jsou provedeny další simulace o třech různých tloušťkách pro každý materiál, ke znázornění možného většího využití plechu.

Na závěr je provedena diskuze a zhodnocení všech získaných výsledků z jednotlivých simulací. Na základě jejich porovnání je zvolena nejlepší možnost pro simulace tvářením daného dílu. Na tomto celém procesu je vidět, co simulace tvářením vyžaduje a jaké možnosti nabízí.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MATERIÁLY NA PLOŠNÉ TVÁŘENÍ

Pro tváření jsou rozhodující vlastnosti materiálu, u kterých se sledují hlavní faktory, ovlivňující tvářitelnost, jako jsou chemické složení, textura materiálu a mikrostruktura. Z hlediska mechanických hodnot pro ocelové hlubokotažné plechy má zejména vliv obsah uhlíku. Pro kvalitní hlubokotažné plechy je obsah uhlíku maximálně 0,07 %. Mimo uhlík jsou v oceli obsaženy další prvky:

- **Mangan** – snižuje houževnatost, avšak zvyšuje tvrdost a pevnost ocelového plechu. Využití tohoto prvku u ocelí je nutné, protože váže síru pro dobře tvářitelné sulfidy manganu. Obsah prvku je doporučen maximálně 0,40 %.
- **Křemík** – je obsažen pouze v uklidněných ocelích, a v neuklidněných se vyskytuje stopově. Toto je zapříčiněno tím, že křemík zpevňuje materiál, a to vede ke zhoršení plastických vlastností. Doporučené množství je maximálně 0,03 %.
- **Fosfor a síra** – jsou nežádoucími prvky pro hlubokotažné oceli a doporučené množství má být co nejnižší, maximálně 0,25 %.
- **Dusík a kyslík** – vytváří nekovové vměstky neboli oxidy a nitridy. Prvky mají vliv na stárnutí oceli a snižují plastické vlastnosti hlubokotažných ocelí. Z hlediska skupenství plynů, tyto prvky patří k nejvíce škodlivým v oceli. Pro běžné hlubokotažné oceli je maximální obsah 0,006 %.
- **Doprovodné prvky** – se dostávají do oceli ze surového železa a ocelového odpadu. Většinou tyto prvky zvyšují pevnost materiálu. Jejich doporučené množství má být co nejnižší a maximální obsah je pro Cu 0,15 %, Ni 0,1 % a Cr 0,03 %.

Nízkouhlíkové hlubokotažné plechy jsou buď neuklidněné a to např. 11 301, 11 304, 11 321 a 11 331 anebo uklidněné např. 11 305 a 11 325. Uklidněné obsahují navíc oproti neuklidněným přísady stabilizačních prvků, např. hliník, titan, vanad, bór, zirkonium a niob. Jejich obsah je malý např. u hliníku se pohybuje v rozmezí 0,025 až 0,035 %.

Mikrostruktura hlubokotažné oceli má výrazný vliv na mechanické vlastnosti a tvářitelnost. Jako základní složka struktury u nízkouhlíkových ocelí je ferit a cementit. Hlavně jeho tvar, velikost a množství zrna feritu, rozložení cementitu a vměstků. Pro tvářitelnost je nejlepší, aby cementit pocházel z globulích a dosahoval co nejrovnoměrnějšího rozložení v základní feritické fázi. Pokud se vyskytuje v lamelárním tvaru, tak je méně vhodný. Nejméně přijatelný je v řádcích. Z hlediska feritických zrn je nejvhodnější zploštělý tvar pro

hlubokotažné oceli stabilizované hliníkem neboli u uklidněných ocelí. Velikost zrna se odráží v kvalitě povrchu u výtažku. Zrna s velikostí čísla 5 a 6 vytváří drsnější povrch než zrna s velikostí 7 a 8. Také nerovnoměrná velikost zrn zapříčiňuje nerovnoměrné deformace tvářeného plechu hlavně při tažení, jelikož mohou vznikat praskliny. Pro hlubokotažné oceli je možný rozdíl velikosti jednotlivých zrn maximálně v rozdílu dvou čísel. Pro počet, velikost a druh nekovových vměstků se používá pojem mikročistota oceli.

Pomocí mechanických a technologických zkoušek lze odhadnout, jak se bude plech chovat při tváření v praxi. Mezi nejvíce sledované parametry patří mez kluzu, pevnosti a jejich poměr, tažnost, minimální poloměr ohybu, kontrakce, součinitel tažení, tvrdost, hloubka vtisku, exponent zpevnění a hodnoty plošné a normálové anizotropie. Způsob zjišťování těchto parametrů je popsán v kapitole 4. [1, 2, 3]

## **1.1 Povrchové úpravy plechu pro tváření**

Povrchově upravený plech se získá nanesením povlaku na kovový podklad, čímž se docílí ochrany proti korozi a získání určitých funkčních i estetických vlastností. Tloušťka kovového podkladu se nejvíce pohybuje v rozmezí 0,2 až 2 mm. Nejčastější povrchové úpravy jsou pohliníkování, pozinkování, pocínování a pochromování. Další možnostmi jsou lakování, nanesení PVC, PE nebo PVF folií, aj. [1, 6]

### **1.1.1 Pohliníkové plechy**

Pohliníkování se provádí ponorem do lázně z roztaveného hliníku a pro snížení výsledné tloušťky vrstvy se do roztavené lázně přidávají daná množství prvků, např. Si, Mg a Be. Výsledná tloušťka se pohybuje v rozmezí 20 až 30  $\mu\text{m}$ . Pohliníkové plechy se využívají pro výrobu na součásti, u kterých je požadována odolnost proti korozi, zvýšeným teplotám a vlivem chemických látek. Pohliníkování plechu je dražší než třeba pozinkování. [1, 4]

### **1.1.2 Pozinkované plechy**

Na pozinkované plechy se nanáší vrstva zinku buď ponorem do roztaveného zinku, kde tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí 15 až 30  $\mu\text{m}$ . Druhá možnost pozinkování je pomocí elektrolytického způsobu, kde se využívá galvanické pokovování, zde je ocelový plech katodou, zinek anodou a zředěná kyselina sírová jako elektrolyt a výsledná tloušťka je 3 až 5  $\mu\text{m}$ .

Rozdíl těchto technologií je takový, že u pokovení pomocí ponoru je potřeba před celým procesem zvažovat mechanické a technologické vlastnosti materiálu i vlastnosti povlaku z důvodu tepelného účinku roztaveného zinku. Toto teplotní ovlivnění základního materiálu nevzniká při použití elektrolytického způsobu pozinkování. Výsledný pozinkovaný plech se hodí na ohýbání, stříhání a také eventuelně k mělkému tažení, ale vyskytuje se zde riziko porušení souvislosti pozinkované vrstvy. [1, 5]

### 1.1.3 Pocínované plechy

Pocínování se provádí stejnými metodami jako u pozinkování. Pocínování slouží k ochraně proti korozi a také i jako mezivrstva pro možnost nanášení dalších vrstev nanášených pomocí lakování. Využití tohoto povlaku je zejména v potravinářském průmyslu pro výrobu obalů, ale také se využívá ve strojírenství. Stejně jako u pozinkování zde elektrolytickým způsobem nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu, proto dosahuje lepších tvářecích výsledků. [1,5]

### 1.1.4 Pochromované plechy

Pochromování se používá u spousty výrobků jako náhradní varianta pocínování. Rozdíl mezi pocínováním a pochromováním je ten, že pochromovaný výrobek je levnější, ale také nelze pájet. [1, 6]

### 1.1.5 Plechy s povlakem z plastické hmoty

Tyto povlaky se vyrábějí na kontinuálních linkách pomocí laminování, kde jde o naválcování fólie na plech pomocí lepidla. Používají se pro zvýšení korozní odolnosti, zlepšení vzhledu, izolačních vlastností a také pro zlepšení odolnosti vůči chemikáliím a otěru. Základním materiálem je buď černý, nízkouhlíkový nebo pozinkovaný plech. Mezi méně používané patří nerezový a hliníkový materiál. Typ plastické hmoty je volen dle:

- ekonomického hlediska,
- vlastností finálního výrobku,
- použití technologie nanášení.

Dále je důležité, aby povlak z plastické hmoty dosahoval žádané životnosti, schopnosti splnit požadovanou jakost povrchu, dobré přilnavosti a plasticity, která je alespoň stejná jako kovový podklad nebo lepší. Mezi dobré povlaky patří např. PVC. [1, 6]

## 1.2 Rozměrová přesnost a kvalita plechů

Na výsledné kvalitě i rozměrové přesnosti plechů se odráží výrobní historie, to znamená, jaký je způsob zkujňování, odlévání, válcování a tepelné zpracování. Vliv tepla na vlastnosti válcovaných plechů za tepla se projeví na výsledné struktuře plechu i rozměrové přesnosti. U těchto plechů je potřeba odstranit okuje a to např. mořením. Z takového plechu lze dále válcovat za studena tenké a velmi tenké plechy. Při válcování za studena je stupeň deformace cca 70 %, ale pomocí válcování za studena se tvoří vláknitá struktura, která má orientaci ve směru válcování a dochází k velkému zpevnění materiálu. Případné odstranění zpevnění, deformační textury a dosažení vhodné mikrostruktury plechu se získává pomocí rekrytalizačního žíhání. Podmínky těchto procesů mají velký vliv na výsledné vlastnosti a to např. mez pevnosti a kluzu, anizotropii, tažnost a náchylnost ke stárnutí plechu.

Z hlediska kvality povrchu je zahrnuta čistota, povrchové chyby a mikromeetrie povrchu plechu, takže pro plechy určené pro tváření je potřeba, aby byl povrch rovný a čistý. Nesmí obsahovat šupiny, okuje, trhliny nebo dutiny, nekovové vměstky a pro větší kvalitu plechu ani zbarvení vlivem tepelného zpracování. Tedy povrch tenkého plechu určený ke zpracování tváření z pohledu mikromeetrie je hladký pokud povrchová drsnost  $R_a \leq 0,63 \mu\text{m}$ , matný při  $R_a = 0,63 \mu\text{m}$  anebo zdrsňený pro  $R_a > 2 \mu\text{m}$ . Vedle hodnoty  $R_a$  je důležitý i profil výstupků, kde je vhodnější dostatečně velký nosný povrch bez ostrých výstupků, a tím je i vytvořen velký prostor pro mazivo. Z pohledu tloušťky plechů se dělí na velmi tenké, které jsou do 0,4 mm, poté tenké v rozmezí 0,4 až 3,99 mm a tlusté nad 4 mm. [1, 6]

## 1.3 Stárnutí plechů

U stárnutí se jedná o pomalý proces, kde samovolně probíhají změny vlastností materiálu mechanické, fyzikální a chemické. Dochází ke změně struktury např. z metastabilního stavu do stavu blízko od rovnovážného. Tento proces vzniká z důvodu hromadění atomů volného dusíku a uhlíku u dislokací. Čím rychleji dochází k hromadění, tím rychlejší je proces stárnutí. Vzniklé shluky atomů na dislokacích brání v pohybu dislokací, a ty jsou nutné pro tváření. Děj je charakteristický pro neuklidněné oceli o obsahu  $C < 0,1 \%$ . Pro proces stárnutí při teplotě 20 °C je cca dvacetkrát větší podíl vlivu dusík než uhlík. Tedy prvky, které brání stárnutí jsou dle toho, o kolik sníží koncentraci uhlíku a dusíku v železe. Prvky jsou seřazeny vzestupně vůči afinitě k uhlíku a dusíku a jsou to tyto:

- P, Cr, Mn – zpomalují stárnutí,

- Si – vyznačuje se velkou afinitou k dusíku a také uklidňuje ocel,
- Al – má velmi vysokou afinitu k dusíku a zpomaluje difúzi uhlíku v železe  $\alpha$ ,
- Ti – má velmi vysokou afinitu k dusíku a uhlíku, stejně působí Zr, V, Nb. [1, 7]

### 1.3.1 Proces stárnutí po rychlém ochlazení

Rychlost ochlazení po zakalení neuklidněné oceli má výrazný vliv na výslednou tvrdost a rychlost stárnutí oceli. Čím rychleji je provedeno ochlazení, tím více se v železe  $\alpha$  vyskytuje uhlík a dusík. Také čím více dojde k porušení rovnovážného stavu, tím více dochází k vylučování uhlíku a dusíku. Lze říci, že např. při teplotě 20 °C je dosažena vyšší tvrdost než u teploty 100 °C. Pro vyšší teploty také probíhá proces stárnutí rychleji. [1, 7]

### 1.3.2 Proces stárnutí po tváření za studena

Při tváření za studena dochází k deformaci krystalické mřížky. Toto zapříčiní, že vytěsněné atomy dusíku a uhlíku v železe  $\alpha$  difundují do oblasti dislokací, kde následně překáží jejich pohybu a potřebu překonat zvýšeným napětím. Rozdíl mezi zvýšeným napětím a napětím k vytvoření deformace před stárnutím se označuje jako index stárnutí. Pro hlubokotažné oceli, které jsou náchylné k deformačnímu zpevnění se tento index pohybuje mezi 40 až 80 MPa. Stárnutí má také vliv na vznik Lüdersovy deformace, kterou také ovlivňuje i teplota. Z těchto podmínek je stanoveno, za jakou dobu musí být zpracován po tváření za studena, aby tato deformace nepřevyšovala 1 % a dosahovalo se kvalitních výtazků. Čím menší je teplota, tím větší doba na zpracování materiálu. [1, 7]

### 1.3.3 Způsob snížení vlivu procesu stárnutí

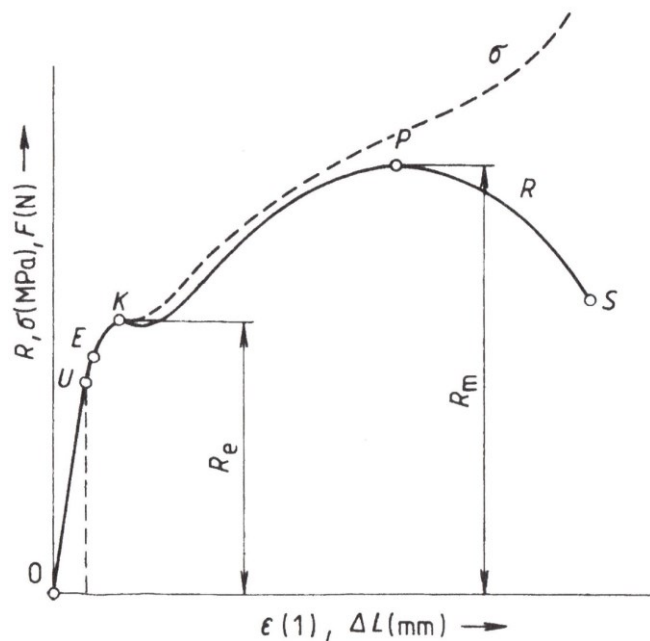
Jsou možné čtyři způsoby, které mohou zamezit nebo aspoň snížit vliv procesu stárnutí při běžné teplotě:

- **Úpravou chemického složení** – zejména snížení obsahu dusíku při výrobě oceli.
- **Tepelné zpracování** – zde je několik způsobů ovlivnění, např. pomalé ochlazování za žíhacích teplot.
- **Tváření za studena** – pomocí úběru na válečkových rovnačkách nebo válcovacích stolicích.
- **Snížení skladovací doby a teploty oceli** – např. při 0 °C je dvacetkrát pomalejší stárnutí než při teplotě 20 °C. [1, 7]



## 2 TVÁŘENÍ

Tváření je technologický proces pro zpracování materiálu, u kterého dochází ke změně tvaru bez odběru třísky. U kovů je potřeba překročit mez pružnosti, ale nesmí se přesáhnout mez pevnosti. Pro tváření se využívají tvárné materiály, a to jsou materiály, které tyto dvě meze mají od sebe v dostatečné vzdálenosti. Při procesu probíhají fyzikální změny a změny struktury materiálu, a to ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Průběh závislosti deformace materiálu na tlaku lze zobrazit na diagramu tahové zkoušky.



Obr. 1. Diagram tahové zkoušky [8]

Z nuly do bodu U, kde se nachází mez úměrnosti, tak křivka stoupá přímočaře a platí zde Hookův zákon, tedy deformace je přímo úměrná napětí. Do meze pružnosti (bodu E) platí, že po odlehčení se tvar vrací do původního stavu, jedná se o deformaci elastickou. Po mez kluzu (bod K) se jedná o tečení materiálu a odtud až po mez pevnosti (bod P) je oblast úspěšného tváření. V bodě P je nejvyšší možné napětí, při překročení je riziko porušení soudržnosti materiálu. Při dosáhnutí bodu S dochází k úplnému přetržení materiálu.

Technologie má velmi vysokou produktivitu práce, vysoké využití materiálu a velmi dobrou rozměrovou přesnost tvářených výrobků. Na druhou stranu je cena strojů a nástrojů vysoká a technologie má omezení s rozměry konečného výrobku. [2, 8, 9]

## 2.1 Rozdělení tváření

Na tváření má vliv druh materiálu, kde jsou vhodné pro tváření materiály s velkým rozsahem plasticity. Jako další ovlivňující podmínky jsou teplota, rychlost deformace, velikost deformace, stav napjatosti, chemické složení a fyzikální stav materiálu. Tváření se dále rozděluje podle teploty na tváření za studena nebo za tepla. A podle změny tvaru na tváření objemové a plošné. [2, 9]

### 2.1.1 Tváření za studena

Jedná se o tváření za pokojové teploty. Působením deformační práce, dochází ke změně tvaru neboli posunu objemů. Tímto se zvyšuje vnitřní pnutí materiálu, čímž se zpevní materiál. Při tváření se zrna materiálu prodlužují a natačí ve směru deformace. Dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti, ale klesá vrubová houževnatost a tvárnost. U tváření za studena je omezení maximální hranicí deformace, za kterou se materiál začne trhat. Pokud chceme ve tváření pokračovat, je potřeba materiál zotavit. To znamená zahřátí na určitou teplotu, čímž dosáhneme zmenšení vnitřního pnutí, ale ke změně tvaru zrn nedojde. [2, 9, 10, 11]

### 2.1.2 Tváření za tepla

Tváření za tepla probíhá nad rekrystalizační teplotou materiálu. Rekrystalizace způsobuje, že nedochází ke zpevnění vůbec, nebo mizí bezprostředně po dokončení. Proces tváření začíná na 70 % teploty tání materiálu, což je začátek tvářecí teploty. V porovnání s tvářením za studena jsou zde potřeba až desetkrát menší síly, čehož je dosaženo tím, že se materiál nezpevňuje. Vlivem tepla dochází k okujení a hrubnutí zrn, a tím je způsoben nekvalitní povrch a hrubé zrno nepříznivě ovlivňuje kvalitu dalšího technologického zpracování.

Jde o mnohem nákladnější a delší proces, než který je u tváření za studena. U tváření za tepla vzniká z dendritické struktury ingotu vzniká vláknitá struktura vlivem tepla. Tuto strukturu nelze změnit dalším tvářením ani tepelným zpracováním a vláknitá struktura výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu.

Je velmi důležité, aby byla správně zvolena tvářecí teplota, která je v oblasti ohraničena horní a dolní teplotou tváření. Během procesu dochází k poklesu teploty k dolní hranici teploty tváření, a pokud proces tváření nebyl dokončen, je potřeba volit další ohřev materiálu. Musí dojít k prohřátí celého průřezu za co nejkratší čas, protože dochází ke ztrátám opalem. [2, 9, 10, 11]

### 2.1.3 Tváření za poloohřevu

Jde o kompromis mezi tvářením za studena a za tepla. Používá se pro získání lepších mechanických a fyzikálních vlastností, přesnosti a jakosti povrchu. Maximální teplota je omezena oxidací povrchu. [9, 11]

## 2.2 Objemové tváření

Pomocí tlakových sil dochází k výrazné změně tvaru a zvětšení plochy původního polotvaru za studena nebo poloohřevu. Proces tváření probíhá převážně za tepla. K objemovému tváření patří kování, válcování, protlačování a tažení. [2, 12, 13]

### 2.2.1 Kování

Pro kování je zpravidla přehřátý polotvar, který se pomocí úderů nebo tlakem tváří a získá se výkovek. Teplota polotvaru je dle použitého materiálu, ale pohybuje se kolem 1 000 °C pro nelegovanou konstrukční ocel, a to z důvodu že při nižší teplotě by mohlo docházet k trhlinám a při vyšších zase ke spalování povrchu. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku klesá rozsah teplot pro kování a také kujnost daného materiálu. Kování může být buď volné nebo zápustkové.

#### Volné kování

U volného kování jde o tváření pomocí cílených úderů na polotvar, a přitom může docházet k volné změně materiálu mezi kovacími nástroji, jako je např. kladivo a kovadlina. Jedná se o výrobky pro kusovou výrobu nebo pro předkovky určeny k zápustkovému kování. Kování je buď ruční, tedy pomocí kladiva a kovadliny, nebo strojní, kde se využívají buchary nebo lisy.

#### Zápustkové kování

U zápustkového kování je polotvar rozehřátý na kovací teplotu uložen v dutině dvoudílné formy neboli zápustce a je tvářen pomocí úderů nebo tlaku. Daný výkovek obsahuje následně výronky, které se odstraní k dosažení konečného tvaru. Zápustka je z nástrojové oceli odolné vůči vyšším teplotám a vydrží 10 000 až 100 000 výrobků. Výhodou zápustkového kování je malá ztráta materiálu, velká přesnost opakování a schopnost vyrobitelnosti složitých tvarů. [2, 8, 13, 14]

### 2.2.2 Válcování

Jde o tváření kovu za tepla mezi dvěma otáčejícími se válci. Materiál je důsledkem působení prodlužován a stlačován, tedy dochází ke zmenšení průřezu. Prvním krokem je výroba předvalku neboli polotvaru na předvalovacích stolicích a následně je na dovalovacích zařízeních vyroben hotový výrobek neboli vývalek, např. tyčová ocel, plech, železniční materiál nebo tvarová ocel.

Pro válcování jsou válce hladké anebo kalibrované. Tyto válce jsou uloženy pomocí čepů v ložiskách stojanu a tento celek tvoří válcovací stolic. Z pravidla na vytvoření konečného výrobku je potřeba těchto válcovacích stolic více buď za sebou, nebo vedle sebe. Podle počtu válců se poté nazývají dvouválcové, trojválcové, aj. Další rozeznání válcování je dle uložení os válců a to podélné, příčné a kosé. Plechy a kovové pásy se mohou také válcovat za studena, čímž se získá zpevnění materiálu a hladkost povrchu. [8, 15]

### 2.2.3 Protlačování

Protlačování je buď za tepla, nebo za studena. U protlačování za tepla jde o protlačování profilů a za studena protlačování dutých těles.

#### Protlačování za tepla

Protlačováním za tepla lze vyrábět plné profily ale i duté profily, které kvůli složitému průřezu nelze vyrábět pomocí válcování. Princip technologie je, že plasticky formovatelný materiál je protlačován průtlačníkem přes průtlačnici. Průtlačník může obsahovat trn pro dutinu. Polotvary z ocele pro protlačování za tepla mají 1 250 °C, jsou posypané skleněným práškem a protlačují se přes skleněnou desku. Tato deska funguje jako ochrana proti okujím, mazací film a tepelný izolátor. Mimo ocel se také využívá cín, zinek, olovo, hliník, hořčík a jejich slitiny.

#### Protlačování za studena

Protlačováním za studena se mohou vyrábět plné nebo duté profily, které jsou válcovitého nebo hranolovitého tvaru. Průběh protlačování je, že průtlačník stlačuje materiál v průtlačnici a materiál poté teče mezerou mezi nimi proti pohybu průtlačníku, nebo je vytlačován ve směru do otvoru v průtlačnici anebo kombinace těchto dvou neboli sdružení protlačování. Poslední možností protlačení je stranové, kde se materiál vtlačuje do bočních mezer průtlačnice. Délka dutého profilu, který je vyroben protlačováním za studena může

být až šestinásobkem jeho průměru. Vhodným materiálem pro protlačování za studena je ocel o malém obsahu uhlíku. [2, 11, 15]

#### **2.2.4 Tažení**

Jedná se o protahování polotvaru otvorem průvlastku, kde dochází ke zmenšení průřezu a zvětšení délky, používá se pro výrobu drátů, trubek a profilů. Polotvar může být např. tyč válcovaná za tepla, která se musí očistit od okují a poté se zešpičatí jeden konec, za který se uchopí kleštěmi a následuje proces tažení. Také lze táhnout dutá tělesa. U výsledných výrobků se dosahuje přesných rozměrů, tvarů a také se docílí zlepšení mechanických vlastností a jakosti povrchu.

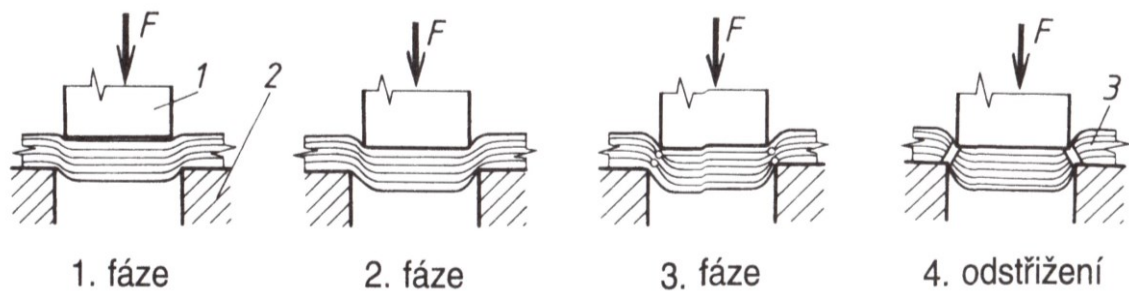
Při technologii tažení je nástroj nepohyblivý a po vyčerpání plasticity materiálu je potřeba provést mezioperační žihání. Potřebné pro tažení je snížení vnitřního pnutí. To se dosáhne mazivem a tím se sníží součinitel tření, odvádí teplo a zajistí hladký povrch. Proces probíhá za studena, ve více stupních a celý proces je omezován pevností daného materiálu. Při správně zvolené tažné síle je umožněno optimální využití tažných stolic bez rizika porušení vstupního materiálu. [9, 13]

### **2.3 Plošné tváření**

Plošné tváření je technologie, při které je dvouosá napjatost a provádí se za studena i za tepla. Mezi tyto technologie patří stříhání, ohýbání, tažení a rovnání. [9, 12]

#### **2.3.1 Stříhání**

Stříhání je nevíce používaným procesem tváření. Využití nachází při přípravě polotvarů, součástek z plechu pro konečné použití, nebo pro výrobky na další technologie (ohýbání, protlačování, tažení) a na dokončovací operace. Dokončovací operace se nazývají podle způsobu odstranění materiálu, a to je děrování, vystřihování, ostřihování, přistřihování atd. Stříhání lze dělit podle teploty, a to na stříhání za studena, které je pro měkčí oceli a plechy. A pro stříhání za tepla pro tvrdší a tužší materiály, které se ohřívají cca na 700 °C.



Obr. 2. Princip stříhání [15]

1 – střížník, 2 – střížnice, 3 - materiál

Princip stříhání je, že na materiál působí protilehlé řezné hrany a způsobují smykové napětí, čímž je oddělena část materiálu. Stříhání probíhá ve třech fázích, kdy první fáze je v oblasti pružných deformací. Dojde ke stlačení, ohnutí a vtlačení materiálu do otvoru střížnic. Druhá fáze je v oblasti plastických deformací, zde napětí překročí mez kluzu a na hranách střížnice a střížníku se přibližuje k mezi pevnosti. Třetí fáze je vznik trhlin, které se zvětšují, a následně dojde k oddělení materiálu. Výstřížek se oddělí, než střížník projde celou tloušťkou stříhaného materiálu a následně je výstřížek vytlačen. Okraje střížných ploch nejsou zcela rovinné a střížná plocha má určitou drsnost, která není v ploše rovnoměrně rozdělená. Oblasti vzniku prvních trhlin jsou drsnější než ostatní střížné plochy. K oddělení materiálu nedojde v přesně žádané rovině, protože materiál je elastický, tvárný a napětí způsobuje tlak nožů po celé ploše. Po odstříhnutí na ploše stříhu rozeznáváme čtyři různá pásma. První pásmo je zaoblení, druhé utržení, třetí smyk a čtvrté pásmo odtlačení. Stříhání dělíme na:

- stříhání rovnoběžnými noži,
- stříhání skloněnými noži,
- stříhání kotoučovými noži,
- stříhání noži na profily a tyče. [9, 10, 12, 15]

### Speciální způsoby stříhání

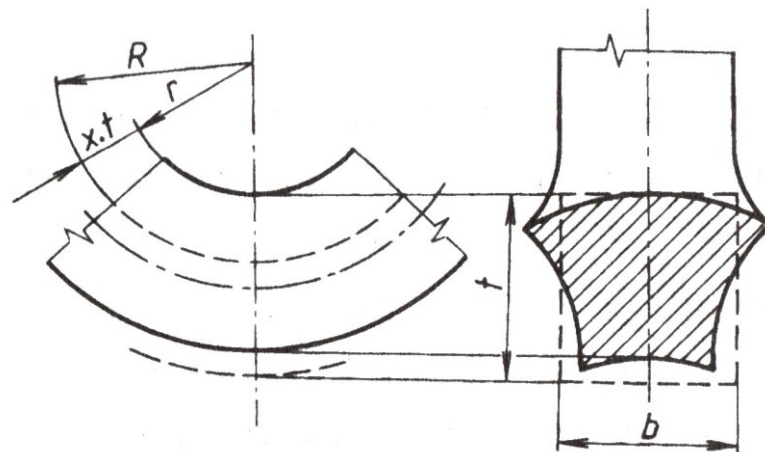
**Stříhání pomocí pryže** je používáno pro stříhání výstřížku z tenkého plechu. Jako nástroj slouží ocelová deska o tloušťce 6 až 10 mm a obrys je stejný s obrysem konečného výrobku. Jako protinástroj je využívána pryž, která se nachází v rámu nebo je volně položena na součástce či polotvaru. Tímto principem jde ostříhovat nebo děrovat otvory a také kombinace ostříhování a děrování. Pryžová deska má tloušťku 150 mm a skládá se z více kusů. Rám z oceli je stejně namáhaný jako střížná deska, která musí být hladká, aby

nezanechala stopy na výstřižku. Jedná se o jednoduchý a levný nástroj, který dokáže stříhat více součástí najednou a lze kombinovat s tažením, ale vzniká zde hodně odpadu, je zde omezení tloušťkou a malou životností pryže.

**Stříhání se zvýšenou rychlostí** se zakládá na zmenšení objemu s vyčerpanou plasticitou na minimum. Výsledkem jsou dráhy trhlin velmi blízké od střižných hran a následně jsou kolmé a rovinné střižné plochy. Toto vše se odehrává pouze v kritických rychlostech. [9, 15]

### 2.3.2 Ohýbání

Jde o proces, kde je materiál trvale deformován do různého úhlu ohybu s menším nebo větším zaoblením hran. K ohýbání se používají ohýbadla, která se skládají z ohybníku a ohybnice. Výsledný produkt se nazývá výlisek nebo ohybek. Pro požadovaný tvar ohnutím se používají stejné zákony plasticity, jako u ostatních způsobů, a to překročením meze kluzu, kde se vyskytuje do oblasti plastické deformace. Při ohybu na vnější straně dojde k natažení a na vnitřní ke stlačení. Oblasti přechodu mezi natažením a stlačení se říká neutrální osa, a zde nepůsobí žádné napětí na materiál, tudíž nedochází k natažení ani ke stlačení. Neutrální osa není totožná při ohybu s osou těžiště, ale je posunuta směrem k vnitřní straně.



Obr. 3. Posunutí neutrální osy v místě ohybu [11]

$b$  – původní šířka,  $r$ , vnitřní poloměr ohybu,  $R$  – poloměr ohybu neutrální osy,  $t$  – původní tloušťka,  $x$  – součinitel určující polohu neutrální osy

Neutrální osa se používá pro určení rozvinuté délky, kterou bude mít polotvar před samotným ohýbáním. Významné to je hlavně u tlustých plechů, protože rozdíl mezi osou těžiště a neutrální je znatelnější než u tenkých plechů. Vzdálenost  $x$  charakterizuje polohu neutrální osy a závisí na poměru  $R/t$ . Hodnoty součinitele  $x$  lze určit z tabulek pro daný poměr. [9, 11, 15]

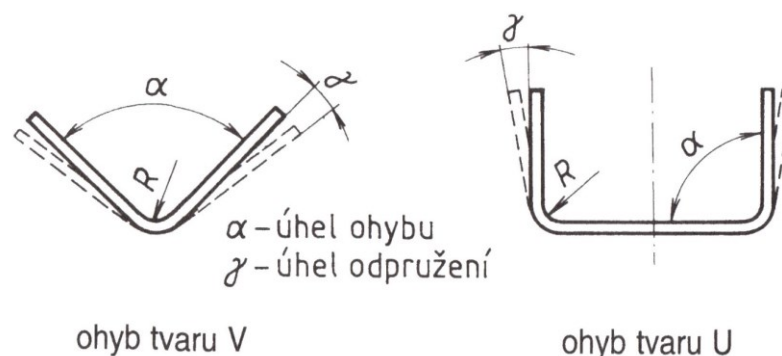
### Praskání a tvoření vln

Při překročení kritické hodnoty poloměru ohybu  $R/t$ , tak nastane praskání materiálu. Na toto má vliv jak zpevnění materiálu, tak i stav materiálu (předchozí zpracování), a také průběh vláken. Směr vláken a osa ohybu by měly být vzájemně kolmé nebo minimálně pod úhlem  $30^\circ$ . Pro dvojitý ohyb by měly být v úhlu kolem  $45^\circ$ . Pro stříhané polotvary je potřeba, aby se ořep nacházel na vnitřní straně nebo se musí odbrousit.

Zvlnění profilu se tvoří převážně u tenkých stěn. Tomuto lze předejít bočním přitlačováním materiálu k nástroji nebo použitím dodatečné tahové síly při ohýbání. [9]

### Odpružení

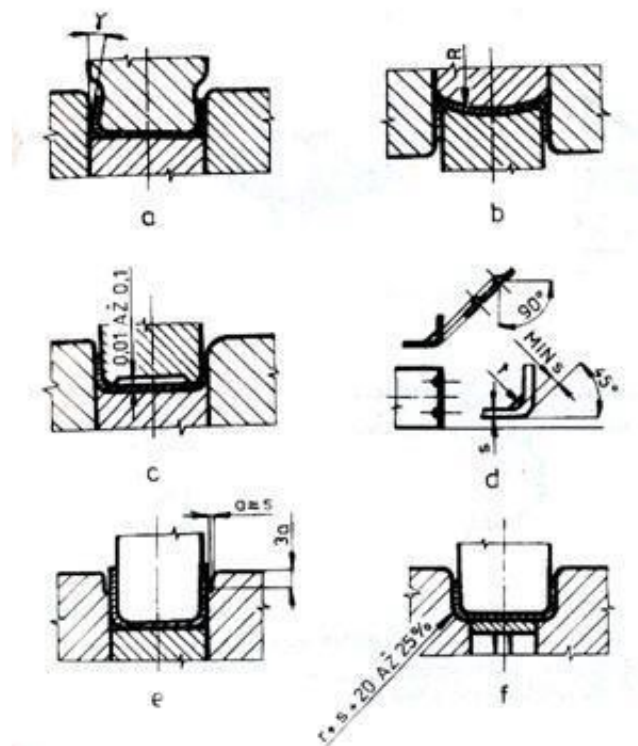
Zpětné odpružení je důležité pro ohýbání. Jedná se o částečný posun materiálu směrem k výchozímu tvaru. Toto se děje působením pružné deformace materiálu kolem neutrální osy. Úhel odpružení od požadovaného úhlu se značí jako úhel  $\gamma$ . Toto odpružení je závislé na materiálu, způsobu ohýbání a poloměru ohybu.



Obr. 4. Odpružení materiálu při ohybu [15]

Odpružení se snaží předejít, a to metodami jako jsou korekce nástroje, kde se nástroj vyrobí tak, aby výsledný úhel byl zvětšen o úhel odpružení. Tento úhel se určuje buď pomocí empirických vzorců nebo z tabulek. Pomocí kalibrace se dosáhne místní plastické deformace, čímž lze dosáhnout snížení odpružení nebo jeho vymizení. Této deformace se dosáhne zvýšením lisovacích sil na konci cyklu. Pomocí prolisů na výlisku, se zde odpružení téměř zcela odstraní. [1, 9, 11, 15, 17]





Obr. 5. Konstrukční úpravy čelistí ohýbadel [9]

*a – podbroušení o úhel  $\gamma$ , b – zaoblení čelisti a přidržovače, c – zpevnění rohů rázem, d – vylisování opěrných žeber, e – postupném ohýbání s odlehčením pevné čelisti o tloušťku materiálu, f – zpevnění materiálu deformačním poloměrem*

### **Postupy ohýbání**

Ohýbání lze provádět volně nebo v pevném nástroji. Tyto postupy je možné rozdělit podle použitého stroje.

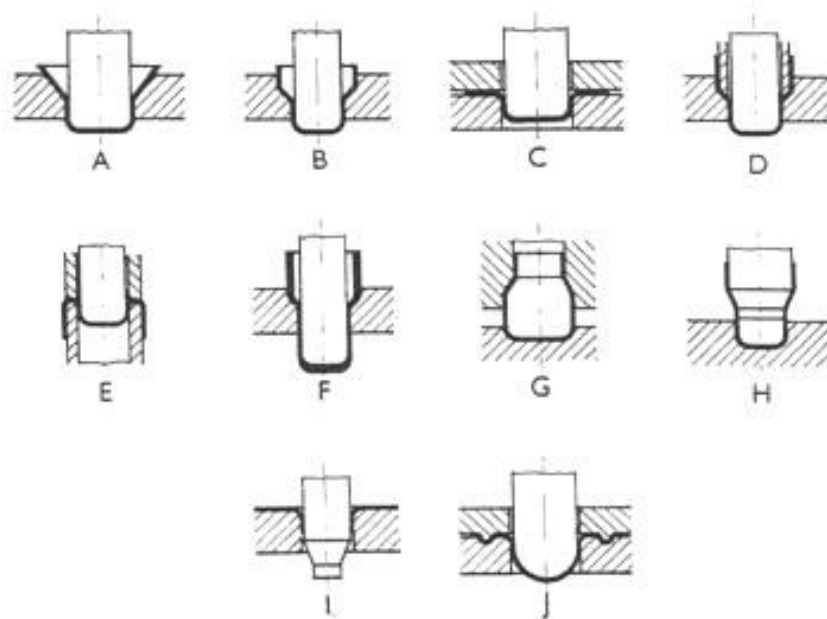
**Ruční ohýbání** na ručních strojích neboli ohýbačkách. Všechny procesy nelze dělat na lisu, a proto jsou pro ně speciální ohýbací procesy, které se ovládají i ručně (pro ohyb dlouhých pruhů a plechů).

**Ohýbání na lisech** v ohýbacím stroji neboli ohýbadle. Zde pohyblivá část čelist vykonává přímočaré vratné pohyby. Ohýbání lze provádět na mechanických, hydraulických lisech nebo na speciálních strojích. Ohýbadla jsou většinou celkem jednoduchá.

**Ohýbání na válcích**, kde samotné válce jako nástroj vykonávají otáčivý pohyb. Například řada válců, která postupně mění profil. [1, 11]

### 2.3.3 Tažení

Jedná se o technologický proces, kde se z rovinného plechu v jedné anebo více operacích vyrobí duté těleso. Nástrojem pro tuto technologii je tažidlo, které se skládá z tažníku a tažnice, případně přídržovače. Výchozí polotvar se nazývá přístřih (rovný plech) a výrobek je výtažek. Je to hodně rozšířená metoda pro zpracování plechu, čímž lze poměrně jednoduše vyrobit různé prostorové součásti. Podle tvaru výlisku je tažení děleno na mělké a hluboké, se ztenčením a bez ztenčení stěny, rotační a nerotační a na tažení nepravidelných tvarů. [9, 12]



Obr. 6. Způsoby tažení [9]

*A, B – tažení bez přídržovače, C, D – tažení s přídržovačem, E – zpětné tažení, F – tažení se ztenčením stěny, G – zužování, H – rozšiřování, I – lemování, J – napínání*

#### **Princip tažení**

Princip tažení lze lehce vysvětlit na jednoduchém válcovém tvaru se dnem. Podobným způsobem to lze aplikovat i na hranaté a nepravidelné tvary. Tlačení tažníku do tažnice dochází k posuvu plechu přes tažnou hranu. U této hrany dochází k nejrychlejšímu opotřebenosti nástroje. K tažení je použita síla, která je kontrolována z podmínky pevnosti válcové části nádoby tak, aby nedošlo k přetržení. Musí se zvažovat vliv tření a zpevnění materiálu. [2, 9, 11, 15, 19]

### **Tvorba vln**

Jde o technologický proces, při kterém dochází k velkému přesunu části materiálu. Tato část objemu materiálu je během tažení vytlačována a tím se zvětšuje výška nádoby a zmenšuje tloušťka stěny. Snaha materiálu se vlnit vzniká hlavně při vysokém stupni deformace. V kombinaci malého stupně deformace a velké tloušťky materiálu nedochází k tvorbě vln, protože jsou malé a vyhlazují se otvorem tažnice. Proti vzniku vln se předchází přidržovačem, ale vzniká tím pěchování materiálu pod přidržovačem a k růstu tloušťky výsledného výrobku.

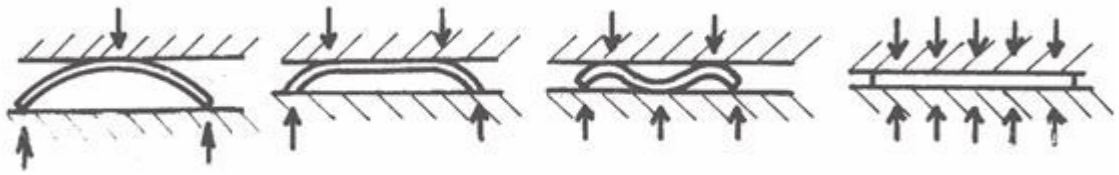
### **Mazání a technologické zásady**

Pro zmenšení tření mezi materiálem a nástrojem se využívá mazání, tímto se také docílí snížení tažné síly. Dalším efektem je velké zlepšení povrchu. Mazání se aplikuje ze strany tažnice a zejména mezi materiál a přidržovač. Na hrubé výtažky lze použít odpadní strojní olej, ale pro jemné výtažky se musí použít živočišné tuky nebo rostlinné a minerální oleje. Pro rovnoměrné mazání je potřeba přidávat do maziv plniva pro zvýšení viskozity. Pokud se bude výtažek posléze povrchově upravovat, nemělo by se použít mazání tukem a plnivo vločková tuha.

Vedle mazání je potřeba dodržovat technologické zásady, které jsou, že výška výtažku by měla být co nejmenší. Dávat přednost výtažku rotačního tvaru s rovným dnem, vzniklé rohy u hranatých výrobků zaoblit. Používat příruby na výtažku pouze v nevyhnutelném případě. Tolerovat rozměry tak, aby se předešlo kalibraci výtažku a zvolit materiál podle dobrých tažných vlastností. [1, 9]

#### **2.3.4 Rovnání**

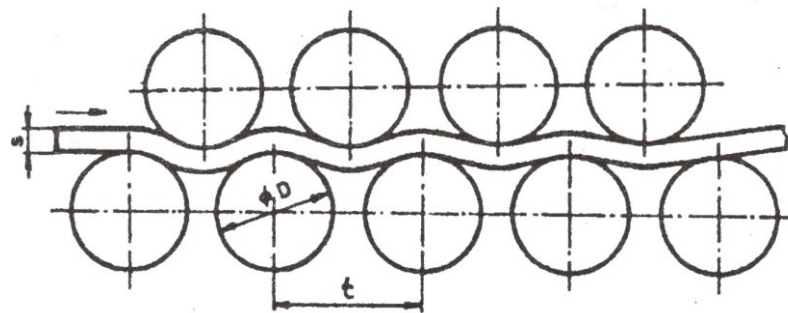
Technologie rovnání se používá pro odstranění nežádoucí deformace. Deformace může být způsobena manipulací s materiálem nebo důsledkem technologické výroby polotvarů. Rovnání je víceméně ohýbaní polotvarů, při kterém se dochází k odstranění nežádoucích deformací. Jako u ohybu zde působí odpružení po uvolnění rovnacích sil, tímto dojde k zachování zbytkového zakřivení. Pro odstranění zbytkového zakřivení u rovinných čelistí se použije dotlačecí síla, kde se síla navyšuje i po úplném dosednutí čelistí.



Obr. 7. Tlakové rovnání pomocí rovných desek [9]

Rovnění může být buď ruční, údery kladivem na materiál nebo pomocí sedlíku. Pro tlusté plechy se ručního rovnání využívá pomocí autogenního hořáku. Důležité je materiál zahřívát pouze v tenkých pruzích.

Nejvíce využívané strojové rovnání je pomocí válců, které se skládá ze vstupních, rovnacích a výstupních válců. Rychlost válců se pohybuje v rozmezí 0,1 až 2 m/s. Principiálně jde o střídavě ohýbání materiálu, zbylá pnutí lze zmenšit pomocí menších střídavě rovnacích ohybů. Zbytkové pnutí má velký vliv na pevnost součásti a velikost odpružení.



Obr. 8. Válcová sestava [1]

Další možnost strojového rovnání je pomocí lisů. Lis se využívá pro velmi tenké a měkké materiály, ale i naopak u tvrdých materiálu. Pro tenké materiály jsou hladké čelisti a pro tvrdé materiály jsou bodové nebo bradavkové čelisti. Tyto čelisti se využívají, protože lisovací síla roste do velmi vysokých hodnot. [1, 9, 20, 21]

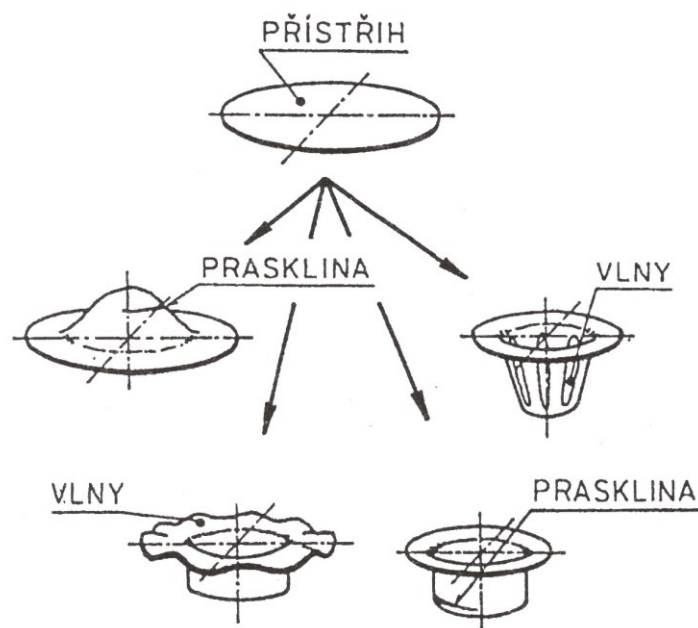


Obr. 9. Bodové a bradavkové rovnání [9]

### 3 METODY MĚŘENÍ

Kvůli stále se zvyšujícím požadavkům na tvářitelnosti plechů, roste také význam predikce a výsledné posouzení vhodnosti plechu pro tváření u dané technologie. Provádí se buď zkoušky mechanických vlastností, nebo pomocí technologických zkoušek, které napodobují zkoušky tvářitelnosti plechu.

Nejlépe odpovídající zkoušky procesu technologie jsou přímé metody zkoušení, protože se provádějí za provozních podmínek. Cíl těchto zkoušek je určit, zdali z daného plechu lze vytvořit výtazek o dané kvalitě a rozměrové přesnosti, aniž by došlo ke vzniku vad. Vyhodnocení zkoušky proběhne buď kvalitativně, nebo kvantitativně. Kvalitativní kontrola je např. vizuální a u kvantitativní se sleduje velikost a směr deformace na různých místech výtazku. Možné vady výtazků jsou na Obr. 10. [1, 8]



Obr. 10. Příklady vad výtazků [1]

#### 3.1 Zjišťování mechanických vlastností plechů

Pro posouzení mechanických vlastností plechů se nejvíce využívají zkoušky tahem a tvrdosti. Dále se zkouška chemického složení, kde se sleduje množství přítomných prvků, které výrazně ovlivňují tvářitelnost. A pomocí metalografické zkoušky se zjišťuje tvar, velikost a rovnoměrné rozložení feritických zrn, a také tvar a jakým způsobem jsou vylučovány křehké strukturní složky, řádkovitost a vměstky. [1, 8]

### 3.1.1 Zkouška tahem

Tato zkouška je dle normy ČSN EN 1002-1, a provádí se pro tenké plechy na plochých zkušebních tyčích. Hodnoty  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $Z$  a  $A$  zjištěné tahovou zkouškou jsou dostačující pro hrubé hodnocení plechu, ale neposkytují podrobnější informace o mechanických vlastnostech, které mohou velmi ovlivňovat tváritelnost plechu. Z výsledků zkoušky tahem se určuje:

- **Mez kluzu ( $R_e$ ), mez pevnosti ( $R_m$ ) a jejich poměr ( $R_e/R_m$ ).**
- **Kontrakce ( $Z$ )** – určuje poměr rozdílu počáteční plochy a nejmenší plochy příčného průřezu zkoušeného vzorku po přetržení.
- **Tažnost ( $A$ )** – říká jaké je trvalé prodloužení měřené délky po přetržení zkušebního vzorku.
- **Plošná anizotropie** – jedná se o směrovou závislost mechanických i fyzikálních vlastností v rovině plechu vůči směru válcování. Jde o důsledek strukturní a krystalografické struktury a jsou spojeny s metalurgickými podmínkami výroby. Pro měření jsou zkušební tyče dle ČSN 42 0321 odebrány z tabulí plechu pod úhly  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování. U hlubokého tažení symetrický výtažků, plošná anizotropie způsobuje vznik cípů na vnějším okraji a také zvyšuje rozměrové odchylky hlubokých výtažků. Proto je potřeba pro tažení nepravidelných tvarů směr s nejlepšími plastickými vlastnostmi orientovat do míst předpokládaných nejtěžších podmínek deformace. Potom je plošná anizotropie v určité míře pozitivní při procesu tažení.
- **Normálová anizotropie** – jde o nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu vůči mechanickým vlastnostem v kolmém směru. Hodnota normálové anizotropie vyjadřuje odolnost plechu vůči jeho ztenčení při procesu tažení. Čím vyšší tato hodnota je, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení. Určuje se pro směry tažení v úhlech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ .
- **Exponent deformačního zpevnění** – nám říká o schopnosti materiálu ke zpevnění při plastické deformaci. Tento exponent lze zjistit třemi způsoby a to jednobodovou, dvoubodovou anebo full curve metodou. [1, 8, 22, 23]

### 3.1.2 Zkouška tvrdosti

Zkouškou tvrdosti dosáhneme rychlých, ale zase méně podrobných výsledků pro posouzení mechanických vlastností, hlavně hodnoty pevnosti. Pro hlubokotažné tenké plechy se nejvíce využívá Vickersova metoda měření tvrdosti. Může být i použita Rockwellova metoda. A zase pro tlusté plechy se může využít Brinellova metoda. U měření je důležité pamatovat na to, že tloušťka plechu musí být osmkrát větší než hloubka vpichu a dle toho volit velikost zatížení. Následně se využijí koeficienty a pomocí přepočtu naměřených hodnot tvrdosti se získá přibližná pevnost materiálu. Pro posouzení plechu je potřeba tuto zkoušku doplnit o zkoušku hloubení nebo zkoušky tvářitelnosti a tím získat kompletnější informace o tvárných vlastnostech. [1, 8, 24]

## 3.2 Zjišťování tvářitelnosti plechů pomocí technologických zkoušek

U zkoušek na mechanické vlastnosti se nezískají informace o napěťových – deformačních stavech, které probíhají u tváření. Proto byly vytvořeny zkoušky tvářitelnosti, které napodobují stav materiálu při dané technologii, patří sem např. zkouška hloubením podle Erichsena, zkouška na rozšiřovacím otvoru podle Siebela a Pompa, zkouška kalíškovací, zkouška podle Gross – Engelhardta, tažení v kuželové tažnici (Fukuiho), aj. [1, 8]

### 3.2.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

Pomocí této zkoušky se posuzuje hlubokotažnost tenkých plechů. Na Obr. 11 lze vidět hodnocení dle trhliny a schéma zkoušky dle normalizace ČSN 42 0406 a ČSN 40 0407, kde je plech upnut mezi přidržovač a tažnici. Ve tvaru koule o  $\varnothing$  20 mm je tažník, který se přisouvá do středu plechu a tím vytváří prohloubení. Jako kritérium této zkoušky je velikost tohoto prohloubení, při kterém dojde ke vzniku trhliny po celé tloušťce plechu. Výhodami této zkoušky je rychlost a jednoduchost. Jako nevýhody sem patří ne příliš vysoká přesnost výsledků, nezjistí se z toho informace o anizotropii a při zatěžování ručně místo hydraulicky jsou výsledky určitým způsobem ovlivněny obsluhou, protože výsledná hloubka závisí na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku. [1, 8, 25]

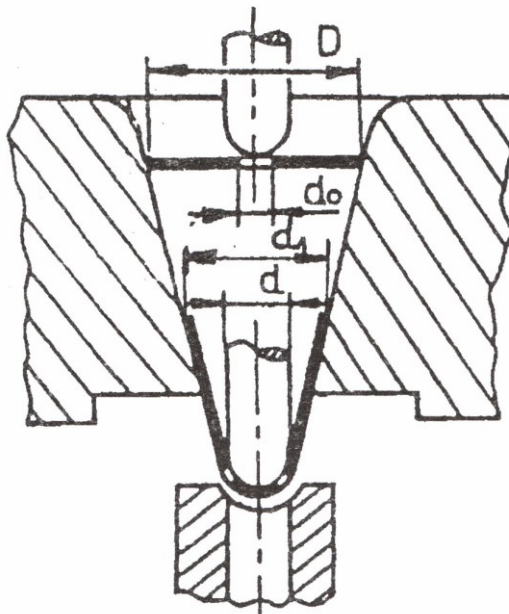




### 3.2.3 Zkouška tažením v kuželové tažnici podle Fukuiho

Princip Fukuiho zkoušky lze vidět na Obr. 13., kde je znázorněno, že ve zkoušce probíhá tažení kruhového rondelu v kuželové tažnici, dokud nevznikne trhlina. Kruhový rondel může mít otvor a v tomto případě zde vzniká trhlina. Pokud rondel otvor nemá, tak trhlina vzniká na dně kuželového výtažku. Není zde vliv přidržovací síly, jelikož se u zkoušky nevyužívá přidržovače. Často je zvolen průměr přístřihu šestkrát větší než díra a průměr tažníku dvakrát větší než díra. Sledované kritérium je popsáno ve vztahu (1), kde  $D$  je průměr přístřihu. Ze vztahu lze také vyčíst, že čím menší vyjde hodnota  $m_F$ , tím je testovaný plech vhodnější pro hluboké tažení. [1, 27]

$$m_F = \frac{d_1}{D} [-] \quad (1)$$



Obr. 13. Princip zkoušky podle Fukuiho [1]

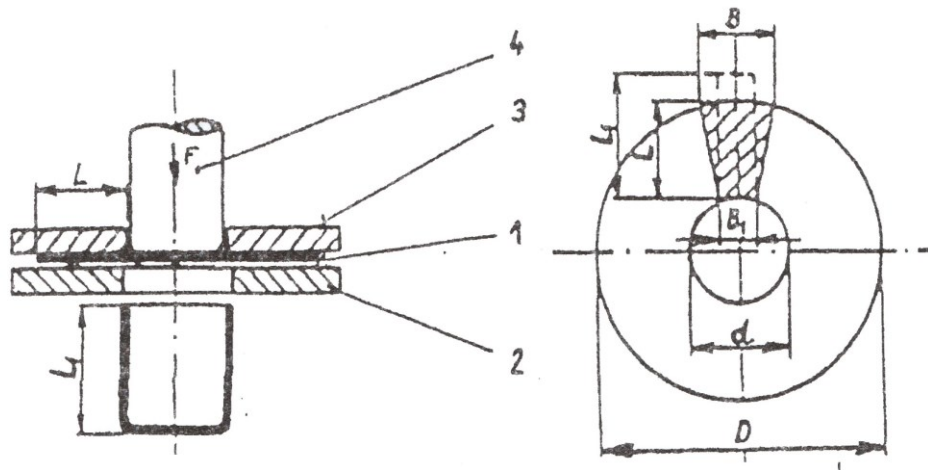
### 3.2.4 Zkouška kalíškovací

Zkoušky kalíškovací se používá pro hodnocení hlubokotažnosti tenkých plechů. Princip zkoušky je vidět na Obr. 14. U této zkoušky se sleduje kritérium  $m$ , které je dáno vztahem (2), kde  $d$  je průměr tažníku a  $D$  průměru rondelu.

$$m = \frac{d}{D} [-] \quad (2)$$

U průměru rondelu se jedná o maximální zjištěný průměr pomocí experimentu kruhového přístřihu, z kterého se může získat válcový kalíšek bez porušení. Tato zkouška se hodí pro symetrické rotační výtažky. Zkouška se neustále opakuje, a přitom se zvětšuje průměr

rondelu, z tohoto důvodu je celkem časově náročná. Mezi výhody této zkoušky patří, že lze vyhodnotit anizotropii mechanických vlastností, která se zde projevuje tvorbou cípů válcových výtažků. [1, 28]



Obr. 14. Princip kališkovací zkoušky [1]

1 – rondel, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 – tažník

### 3.2.5 Zkouška podle Gross – Engelhardta

Jde o kališkovací zkoušku s přidržením příruby dle Gross – Engelhardta. Měří se zde tažná síla potřebná ke zhotovení kališku. Rondel jako zkušební vzorek je zatížen tažením s přidržovačem, dokud se nedosáhne síly  $F_2$  k překročení meze pevnosti, následně je přidržovačem sevřena zbývající část příruby a tažník působí s narůstající silou až do úplného odtržení dna  $F_1$ . Sledované kritérium je stanoveno dle vztahu (3), tomuto kritériu se říká přirozený stupeň hlubokotažnosti  $T$ . Pro kvalitní plechy je hodnota větší než 40 %. [1]

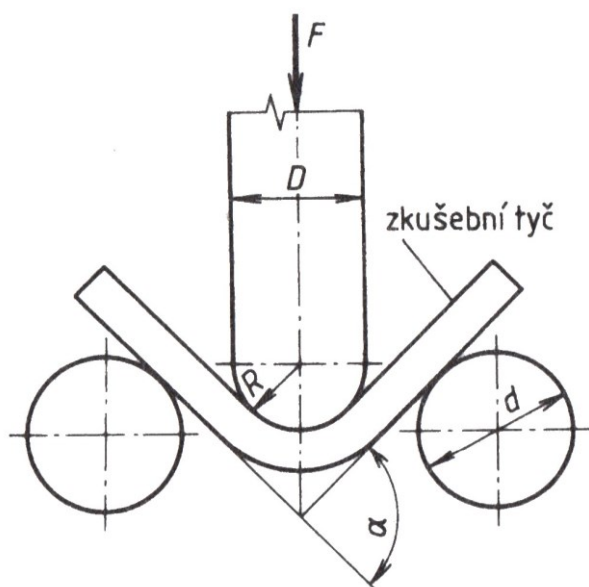
$$T = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

### 3.2.6 Zkouška lámavosti

Na zkoušku lámavosti může být použit jakýkoliv lis či stroj na tlak, který je schopný vyvinout dostatečnou sílu a také je potřeba úhloměr, který dokáže proměřit úhel  $\alpha$  pod zatížením. Zkouška je prováděna dle normy ČSN 42 0401 a zkušební tyč je o délce 200 až 400 mm a šířce 24 až 50 mm. Nejlepší výsledky zkoušky jsou získány, pokud je osa ohýbání ve směru vláken plechu. Dle Obr. 15. lze vidět princip zkoušky, kde vzdálenost podpěr  $l$  je dle vztahu (4).

$$l = d + 3 \cdot s_0 [mm] \quad (4)$$

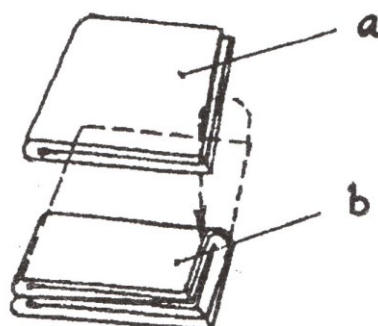
Zkouška se provádí pro zjištění, zdali je plech vhodný ke tváření ohýbáním. Sledované kritérium je úhel  $\alpha$  neboli poloměr ohybu  $r$ , při kterém nedojde ke vzniku trhliny v místě ohybu. Jako trhlina není považováno rozevření způsobené rozšířením drsného povrchu nebo zvrásnění povrchu v ohýbaném místě. Pomocí této zkoušky lze také kontrolovat svary. [1,8]



Obr. 15. Princip zkoušky lámavosti [8]

### 3.2.7 Zkouška dvojitým a střídavým ohybem

Jako další zkoušky pro ohybatelnost plechů jsou zkoušky dvojitým a střídavým ohybem. Pro dvojitý ohyb je princip znázorněn na Obr. 16., kde lze vidět, že se použije zkušební vzorek ve tvaru čtverce s odjehlenými hranami. Hrana čtverce má 200 mm a po provedení zkoušky se u kvalitního plechu pro tváření ohybem nevytvoří trhlina v namáhaných oblastech.



Obr. 16. Princip zkoušky dvojitým ohybem [1]

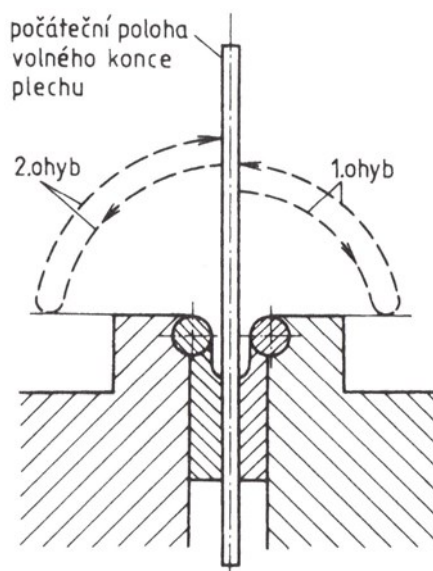
*a – první ohyb, b – druhý ohyb*

Pro střídavý ohyb je princip zkoušky znázorněn na Obr. 17., kde lze vidět, že zkušební vzorek je upevněn v unašeči s ohýbací pákou a dle schématu probíhá střídavý ohyb plechu. Výsledkem zkoušky je stanovení odolnosti plechu proti porušení střídavým ohybem o  $90^\circ$  přes válcové plochy s poloměrem dle normy. V Tab. 1. jsou uvedeny rozměry zařízení podle normy ČSN ISO 7799, kde  $R$  je poloměr plochy, přes kterou je plech ohýbán,  $h$  je vzdálenost uchopení unašeče,  $h_1$  je vzdálenost sevření plechu od poloměru ohýbacího válce a  $s_0$  je tloušťka plechu.

Tab. 1. Rozměry zařízení pro zkoušku se střídavým ohybem dle ČSN ISO 7799 [1]

R [mm]	$1 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,1$	$5 \pm 0,1$	$7,5 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$
h [mm]	25-50				
$h_1$ [mm]	1,5	3			
$s_0$ [mm]	0,3 – 0,5	0,5 – 1	1,05 – 1,5	nad 1,5	

Jako zkušební vzorky jsou pásy o šířce 20 mm a délce 100 mm. U ocelových plechů se provádí zkouška do 3 mm a pro neželezné plechy v rozmezí 1 až 6 mm. Pro tenké plechy lze využít zkušební vzorek s předpětím, ale musí být do 2 % z jmenovité pevnosti materiálu plechu. Zkouška je provedena 60 ohyby za minutu. Jako výsledný počet ohybů se počítá až úplné zlomení vzorku a nezapočítává se ohyb, při kterém došlo pouze k poškození. [1, 8]



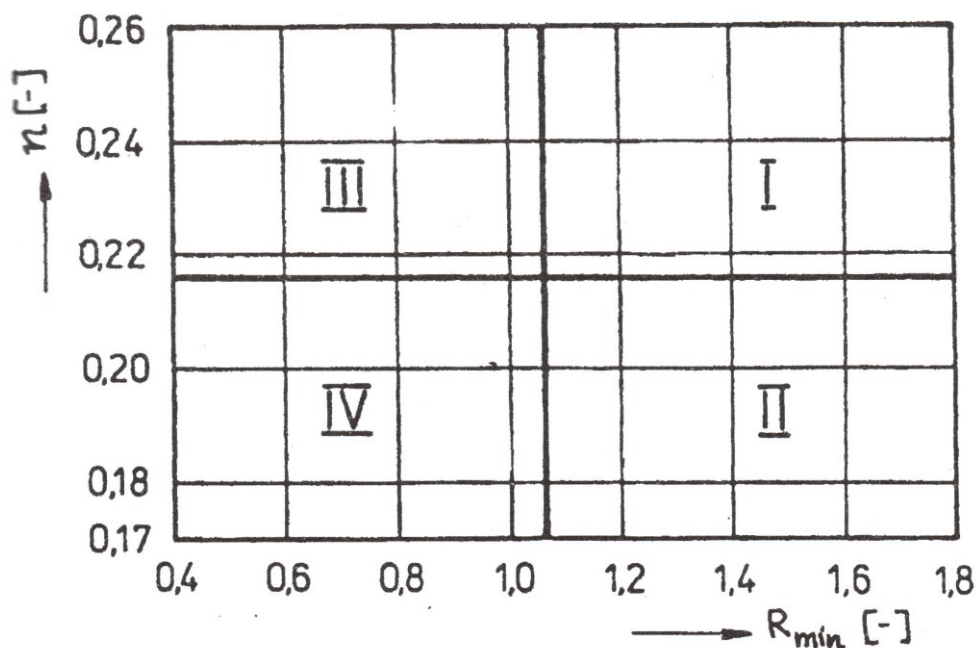
Obr. 17. Princip zkoušky střídavým ohybem [8]

### 3.2.8 Komplexní vyhodnocení tvářitelnosti – index tvářitelnosti, Liletovo kritérium

Jelikož je plech vystaven různým stavům napjatosti a deformací během procesu tváření, tak nelze určit tvářitelnost plechu pouze jedním ukazatelem. Např. je problém použít výsledky ze zkoušky tahem pro tažení výtahů nepravidelných tvarů z hlediska rozdílných podmínek

deformace, protože u nepravidelných výtažků se objevují i oblasti mimo tahových deformací, a to oblast tlakově tahového namáhání materiálu. Dalším vlivem na hlubokotažnost plechu je také exponent deformačního zpevnění a normálové anizotropie. Kde normálová anizotropie se zase projeví ihned v počáteční fázi plastické deformace a exponent deformačního zpevnění se projeví až v procesu tažení po dosažení určitého stupně deformace plechu. Pro výtažky s nehomogenním stavem napjatosti se pomocí volby vhodného plechu dle hodnot exponentu zpevnění a normálové anizotropie získá stejnoměrnější rozložení napětí z míst, kde je větší počáteční napětí do míst, kde je menší počáteční napětí.

Pro komplexní vyhodnocení bylo zavedeno kritérium index tvárnosti, tento index je určen součinem minimální hodnoty normálové anizotropie ( $R_{min}$ ) a exponentu zpevnění ( $n$ ). Tento součin je poté vynásoben tisícem a čím vyšší výsledná hodnota je, tím se plech více hodí pro hluboké tažení. Vyhodnocování plechů pro hluboké tažení je pomocí Liletova kritéria, kde jsou jednotlivé oblasti v diagramu pro rychlé rozřazení vhodnosti či nevhodnosti plechu na Obr. 18. [1, 29]



Obr. 18. Vyhodnocení plechů k tažení dle Lileta [1]

*I – oblast pro nejsložitější operace tažení, II – oblast pro tažení s převládajícím tlakovým napětím, III – oblast pro tažení (převážně dvojosé tahové napětí), IV – oblast pro nevhodné hluboké tažení*

## 4 SIMULACE TVÁŘENÍ

Simulace tváření je stejně důležitý samotný tvářecí nástroj jako např. lis. Dle vývojového trendu jsou požadavky na dílec takové, aby měl minimální hmotnost a zároveň splňoval velký stupeň tuhosti. Pro jednotlivý proces je důležitá jak geometrie dílu, tak z jakého materiálu je díl vyroben. Všechno toto je zahrnuto v simulaci, která pomůže zvolit nejvhodnější postup výroby k vysokému a optimálnímu stupni protváření. Tato simulace také zahrnuje veškeré změny fyzikálních vlastností a jednotlivých spojů, které vznikají při výrobě. Výsledkem simulace je také snížení prototypů a následných testů, jako jsou únavové a pevnostní výpočty, crash testy, sledování vnitřního pnutí a rozložení tloušťky. Tedy simulace snižuje čas, spotřebu materiálu a výslednou cenu. [30, 31]

### 4.1 Vlastnosti systému pro simulaci

Pro výpočet simulací v procesech je využíváno numerické metody konečných prvků. Je více možností řešení dané simulace a tyto možnosti lze rozdělit do dvou základních skupin. V první skupině jde o jednoduché řešení, využívající implicitní numerickou metodu k řešení výpočtu energetických pohybových rovnic. Výsledky jsou pro konstrukci výrobku a zjištění, zdali je vůbec možné daný díl vytvořit tvářením. Rychlost tohoto výpočtu je v řádu minut.

V druhé skupině jde o přesné řešení, zobrazující realističtější průběh procesu. Toto řešení zahrnuje veškeré podmínky procesu a řeší se pomocí explicitní numerické metody pro řešení energetických pohybových rovnic. Výsledek slouží jako podpora návrhu např. lisovacího stroje a lze získat v řádu hodin. Záleží jak na složitosti dílce, tak i na optimalizaci parametrů okrajových podmínek, jako může být počet úrovní adaptivního síťování, zjemňování konečnoprvkové sítě přístřihu v průběhu simulace nebo nastavení výkonných algoritmů pro generování adaptivního síťování. Pak se lze dostat i na čas, který je v rádech desítek minut. Obecně platí že čím menší je element sítě, tím se zvětšuje doba potřebná pro výpočet.

Rychlost a přesnost simulace je ovlivněna i dle zvoleného programu či specifického modulu pro danou operaci, např. program AutoForm je specializovaný pouze na hluboké tažení, a tedy i přesné řešení počítá pomocí implicitní časové integrace, čímž dosahuje rychlejších výpočtů, ale zase není vhodný pro rychlé procesy jako může být crash test. [30, 31]

### 4.2 Analýza tváření kovů

K dosažení dokonalého návrhu, řízení a optimalizace tvářecího procesu je potřeba znát informace o toku kovu, přestupu tepla a napětí. Také jsou potřeba technologické informace

jako je mazání, způsob ohřevu a chlazení, tvaru manipulace s materiálem a dále informace o nástrojích a tvářecích zařízeních. Pomocí těchto parametrů lze popsat mechanika procesů plastické deformace v závislosti na:

- **kinematických vazbách** – tvaru, rychlosti, deformace a deformační rychlosti,
- **limity tvářitelnosti** – určuje, zdali je možné dílec vyrobit pomocí dané operace,
- **predikci napětí, sil a energie** – pro provedení tvářecí operace. [32, 33, 34]

#### 4.2.1 Okrajové podmínky pro simulaci

Při tvoření simulací je prvním krokem tvorba sítě konečných prvků. Tato metoda může být využita pro velkou škálu úloh pouze s malými ohraničeními, které se týkají geometrie vzorku. Tato metoda je klíčovým krokem pro sestavení soustav lineárních algebraických rovnic. Jde o rozdělení na konečný počet prvků, které buď vyplní celý objem, nebo plochu tělesa a tímto je snadno matematicky vyjádřitelné. Na této metodě jsou založeny skoro všechny výpočetní programy.

Následujícími kroky při tvoření simulace je potřeba nadefinovat materiál výrobku a využitý stroj s postupem jednotlivých kroků operace. Také je potřeba definice dalších ploch tažníku, tažnici, přidržovač a plochu přístřihu. Těmito plochy je tvořeno základní schéma nástroje pro prosté tažení. [32, 33, 34]

#### Tažník

Tažník je součástí nástroje, která se aktivně podílí na tažení dílce. Jeho tvar odpovídá dutině hotového výtažku pro jednokrokový tah a u vícekrokového tažení vždy odpovídá požadovanému výsledku v daném kroku. Obvykle koná vratný přímočarý pohyb, který končí při dosažení požadovaného výtažku.

V simulaci je tvořen dle vloženého výtažku pomocí jeho ploch po určení směru tažení. Rozdíl postupu tvorby je dle jednotlivých programů. Např. vybráním ploch nebo automatická tvorba dle importovaného dílce. Poté lze tažník lze dále definovat např. tak, aby plocha, která tvoří tažník nebyla jednotná, a tak se dosáhlo místního odlehčení, vybrání, aj.

#### Tažnice

Tažnice, stejně jako tažník se aktivně podílí na tažení dílce. Její tvar je vnější skořepina výtažku a oproti tažníku je proto zvětšena o tloušťku výtažku ve směru tahu.

Obdobně jako u tažníku je v simulaci tvořena stejně. Tvorba může být opět automatická dle importovaného dílce a také lze poté upravovat. Pokud je výrobek symetrický, tak při tvorbě jak tažnice, a i také tažníku lze této symetrie využít pomocí jedné z hlavních os, čímž se docílí urychlení výpočtu. Využití symetrie nijak nemá vliv na změnu výpočtu a nijak neovlivňuje analýzu lisovatelnosti.

### **Přidržovač**

Funkce přidržovače je, že sevře přístřih k tažnici a poté následuje deformace tažníkem přístřihu do požadovaného tvaru. Dle potřebné velikosti přidržení, mohou být v přidržovači navrhnutá brzdící žebra, které dosahují zpomalení tažení, zabraňují tvoření vln na okraji výtažku, zvyšují intenzitu tažení, aj. Z toho plyne, že přidržovač má výrazný vliv na průběh tažení a výslednou kvalitu výtažku. Při vhodném tvaru a optimální přidržovací síle, která má velikost, tak aby se netvořily vlny, ale zase aby nedošlo k utržení dna, je pozitivně ovlivněna celá analýza lisovatelnosti.

### **Přístřih**

U přístřihu se jedná o tvar nedeformovaného plechu, ze kterého se tvářením dosáhne výsledného výrobku. Tvar přístřihu se odvíjí od složitosti výtažku a jeho optimalizací se modifikuje jejich velikost a úspora materiálu. [32, 33, 34]

#### **4.2.2 Popis výsledků**

Výsledky simulace nám znázorňují vlastnosti součásti při tvářením a predikci možných problémů během tvářením, jedná se o lisovatelnost, ztenčení, zvlnění a porušení dílu. Tyto predikce jsou užitečné pro optimalizaci výroby, ale mnohem efektivnější jsou s vizuální kontrolou odborníkem, který rozhodne o zlepšení vstupních podmínek pro lepší optimalizaci. Čímž se i docílí kratšího času celkové optimalizace a dosažení nejoptimálnějšího řešení.

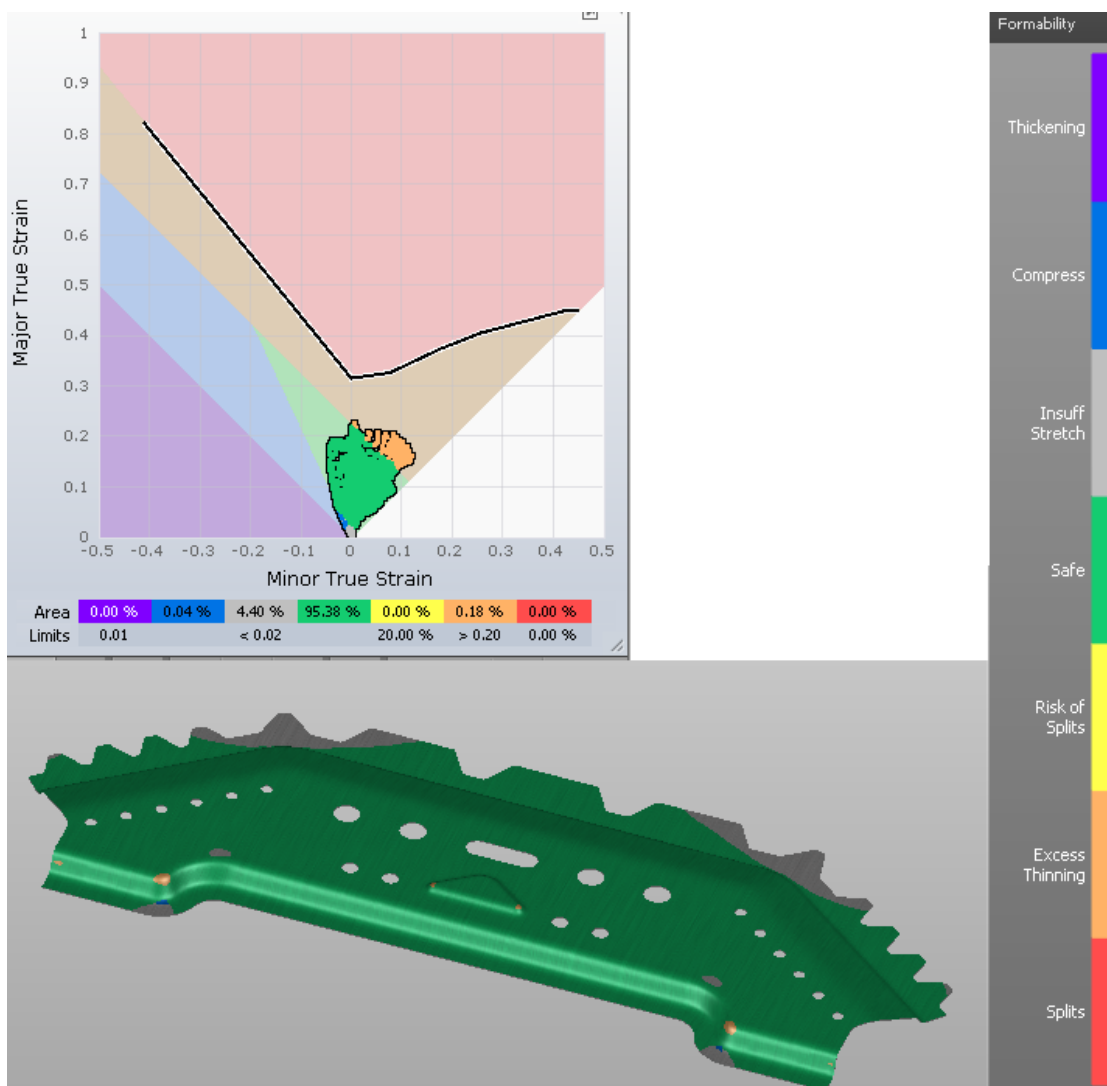
V každé analýze, ať už jde o ztenčení, napětí nebo deformaci je potřeba znát mezní hodnoty daného výrobku. Tyto hodnoty ukazují kritická místa při tažení. Maximální hodnoty mohou být rizikem pro přerušení materiálu a minimální hodnoty zase místa, kde není, nebo je málo využít materiál procesem tažení, anebo zde může docházet k napěchování materiálu. [33, 34, 35]



### Lisovatelnost – formability

Analýza lisovatelnosti zobrazuje deformace dílce při tažení. Cílem je dosáhnout co největší deformace, tak aby byly splněny ostatní podmínky jako je eliminace porušení, zvlnění a ztenčení. Větší deformací se získají lepší vlastnosti hotového výtažku.

Výsledek simulace ukazuje na dílci, pomocí barevných oblastí a jejich procentuálním vyjádřením, kde se, jak bude materiál chovat při tažení. Mezi tyto oblasti patří silné zvlnění, mírné zvlnění, nedostačující protahování (nevyužitý materiál), deformace na okraji kolize, a porušení. [33, 34, 35]

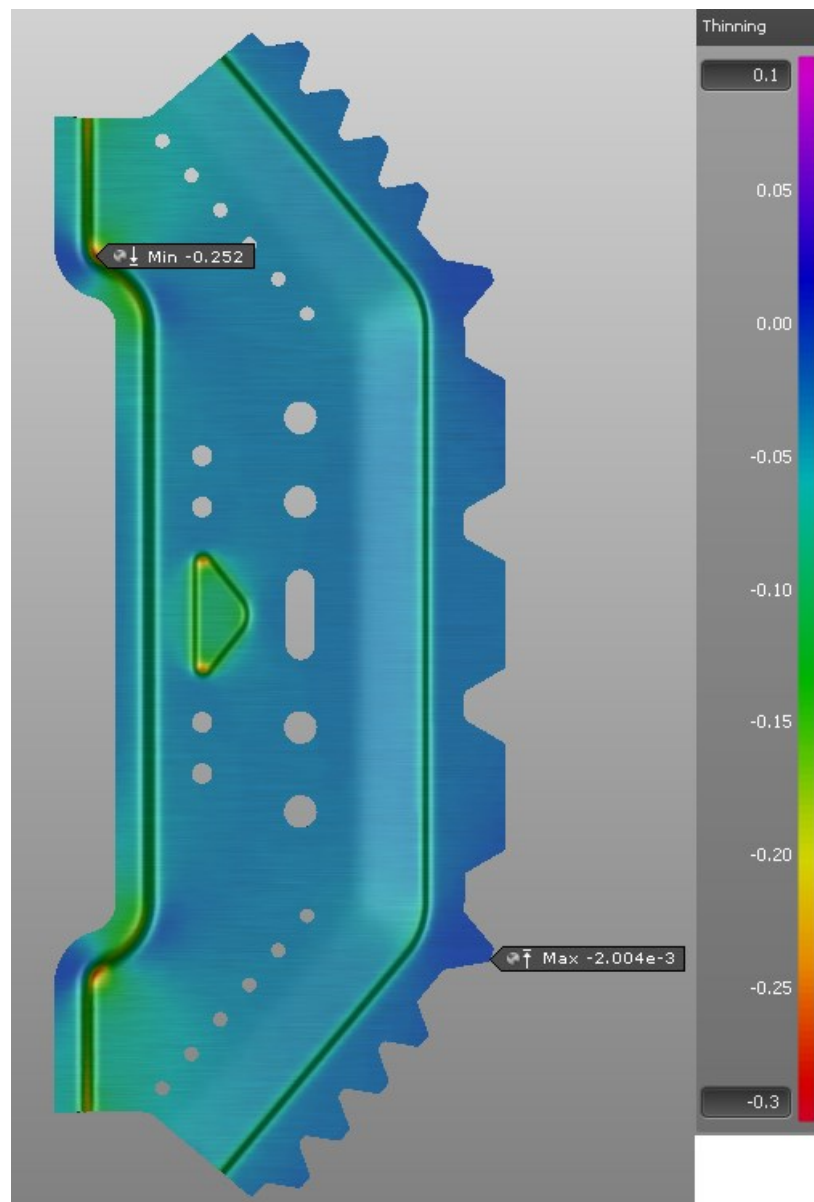


Obr. 19. Příklad výsledku lisovatelnosti v programu AutoForm

### Ztenčení – thinning

Tyto výsledky zobrazují, o kolik procent je materiál ztenčen, nebo naopak napěchován. Jelikož při procesu tažení dochází ke ztenčování stěny je tento údaj důležitý pro vyhodnocení

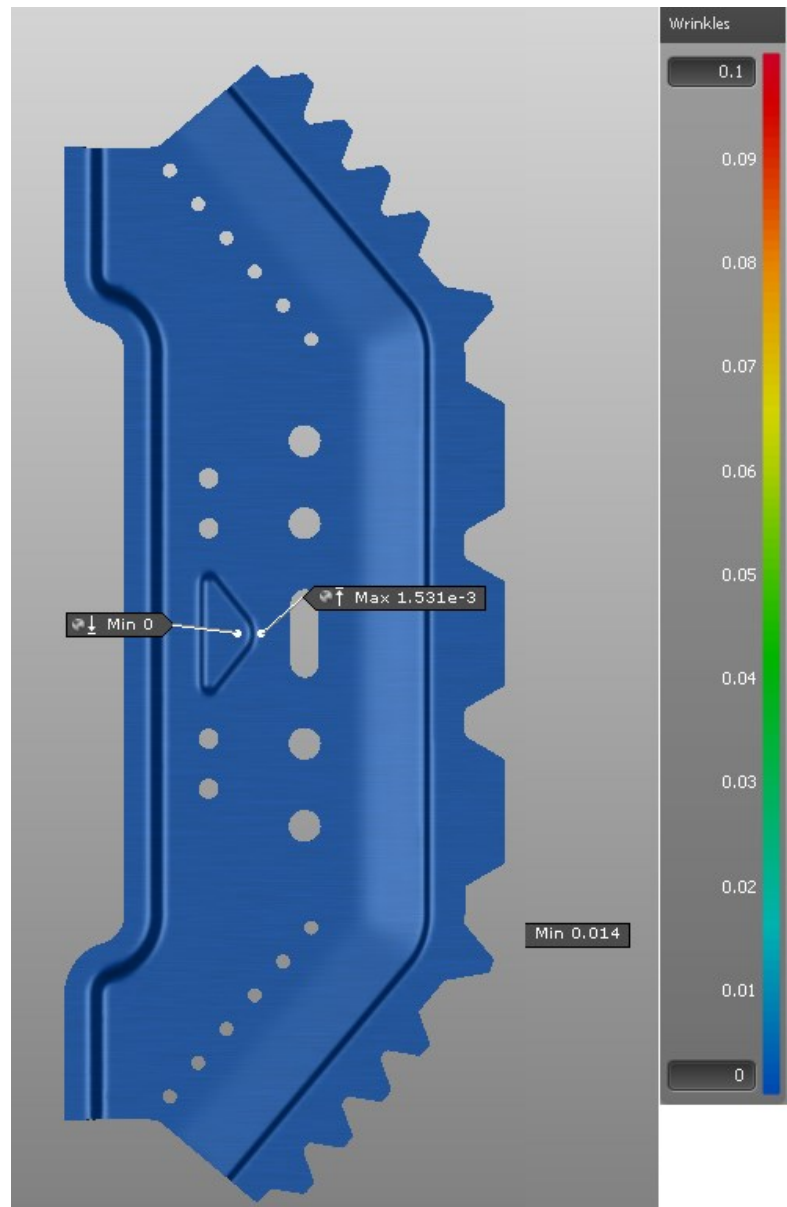
lisovatelnosti. Ztenčení stěny v simulaci vyjadřují záporné hodnoty, a naopak kladné vyjadřují napěchování v daném místě. [33, 34, 35]



Obr. 20. Příklad výsledku ztenčení v programu AutoForm

### Zvlnění – wrinkling

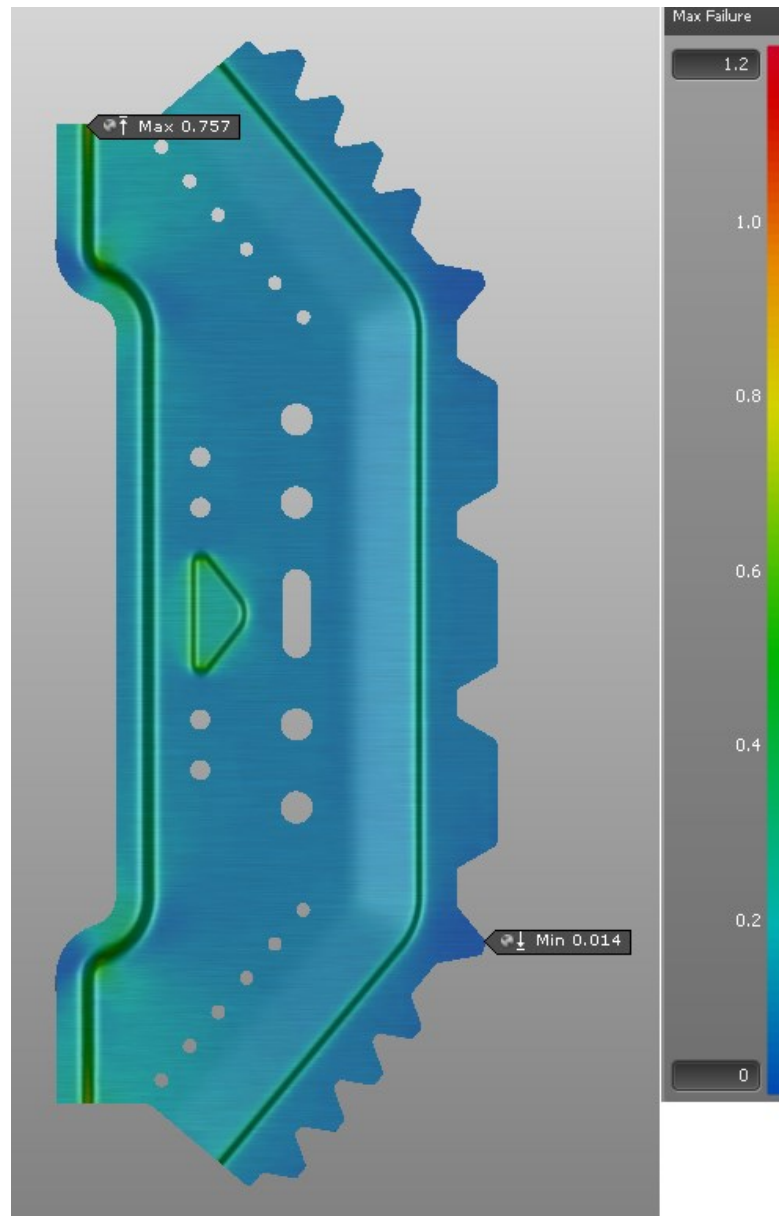
Tento výsledek ukazuje riziko zvlnění na výtažku. Platí zde, že čím větší je hloubka výtažku tím větší je riziko zvlnění na stěnách. Tomuto zvlnění se předchází přídržovací silou, která je omezena rizikem utržení dna. [33, 34, 35]



Obr. 21. Příklad výsledku zvlnění v programu AutoForm

### **Porušení – max failure**

Tímto výsledkem jsou znázorněny oblasti nejnáchylnější k porušení. Náchylnost k porušení je vyjádřena číslem. Sleduje se maximální hodnota a pokud by toto číslo přesáhlo hodnotu 1, tak v této oblasti dojde k porušení výtažku. V praxi je využíváno, aby hodnota maximálního porušení byla 0,8 neboli 80 % využití zásoby plasticity materiálu při tažení. Tato hodnota se využívá, protože při konečném ladění kritických rozměrů s cílem dodržet tolerance, může dojít ke změně nástroje. Při úpravě nástroje a při neovlivnitelných vnějších vlivech může dojít k dalším deformacím a hodnota 0,8 dává dostatečnou rezervu pro plastickou deformaci. [33, 34, 35]



Obr. 22. Příklad výsledku porušení v programu AutoForm

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je vytvořit simulace pro plošné tváření v programu AutoForm R8. Byly vytvořeny a z optimalizovány tři simulace se stejnými parametry, ale s rozdílným materiálem. Následným porovnáním těchto výsledků byl znázorněn vliv materiálu a po získání těchto výsledků byly dva materiály vyhodnoceny jako vhodnější a pokračovalo se s nimi dále v optimalizaci. Na obou materiálech byly vytvořeny simulace o třech různých tloušťkách pro další znázornění možného využití materiálu. Výsledky jsou znázorněny graficky a mezi sebou porovnávány.

Úkoly diplomové práce:

- Vypracovat literární studii na dané téma.
- Provést 3D konstrukci modelu dílu automobilové karoserie.
- Provést simulaci dílu automobilové karoserie v programu AutoForm.
- Navrhnout optimalizace dílu a procesu tváření.

## 6 NASTAVENÍ SIMULACE

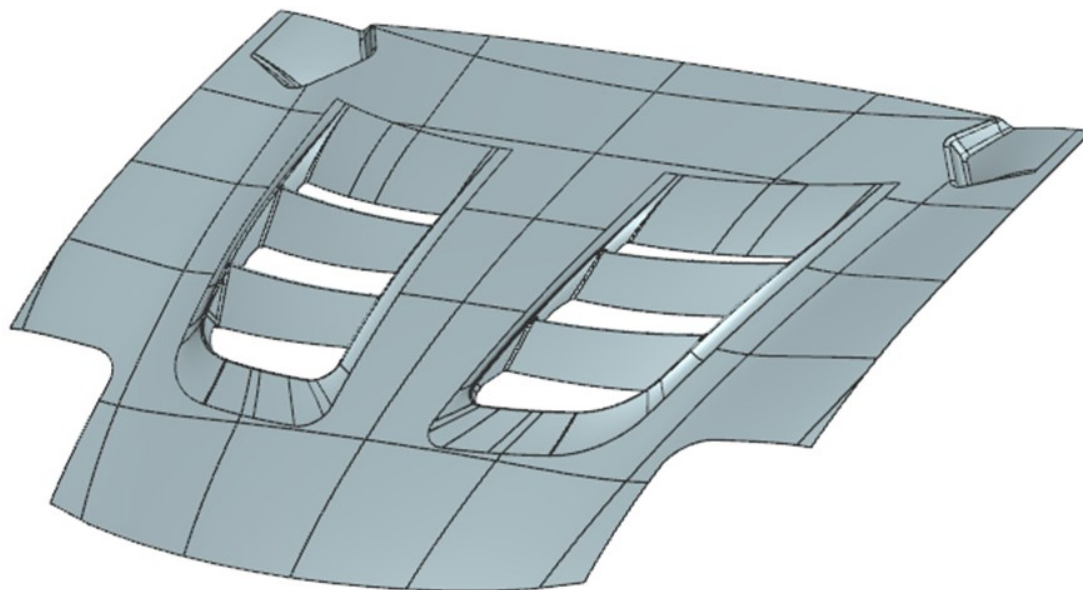
Prvně byla provedena konstrukce 3D dílu a poté nastavena simulace. Postup nastavení je popsán v kapitole 6.5.

### 6.1 Software NX

3D model byl vytvořen v programu NX verze 1926. Software NX slouží k tvorbě 3D modelů, a to buď pomocí pevných těles, ploch anebo plechů. Dále NX nabízí možnosti obrábění a počítání aplikované mechaniky. V této práci bylo využito modulu k tvorbě ploch a pevných těles ke zkonstruování požadovaného výrobku.

#### 6.1.1 Konstrukce 3D modelu

Jedná se o modifikovanou kapotu pro automobil Mazda RX7 o délce 1,1 m a šířce 1,5 m. Kapotu lze vidět na Obr. 23. V simulaci je použita polovina dílu, pro využití symetrie.



*Obr. 23. 3D model výrobku*

### 6.2 Software Autoform

Pro všechny simulace je použit software Autoform R8. Tento Software je specializovaný na hluboké tažení, a dosahuje rychlého a přesného výpočtu. Na druhou stranu není vhodný na rychlé procesy jako je např. crash test.

### 6.3 Parametry dílu

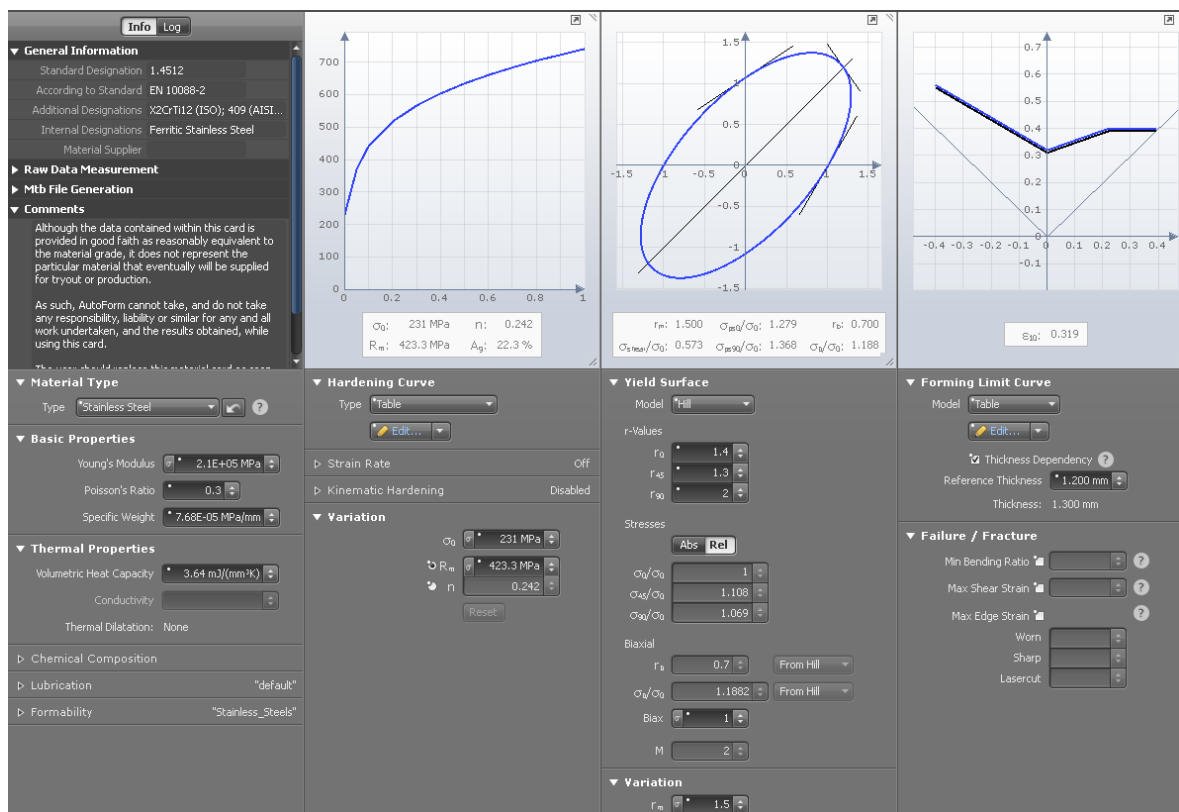
Analýza je prováděna na plechu o tloušťce 1,3 mm, 1,5 mm a 1,8 mm a byly zvoleny tři materiály pro které jsou níže na obrázcích uvedeny materiálové listy.

#### 6.3.1 Materiál 1.4512

U materiálu 1.4512 jde o titanem stabilizovanou feritickou nerezovou ocel. Tato ocel je nejvíce využívána v automobilovém průmyslu, hlavně pro výfukové systémy. Je většinou dodáváný jako válcovaný prvek a vyrábí se až do tloušťky 2,5 mm. Důležité vlastnosti materiálu pro tvářený jsou na Obr. 24. a v Tab. 2. je uvedeno chemické složení materiálu. [36]

Tab. 2. Chemické složení materiálu 1.4512 [36]

Uhlík [%]	Chrom [%]	Mangan [%]	Titan [%]	Křemík [%]	Fosfor [%]
0,0-0,3	10,5-12,5	0,0-1,0	0,0-0,65	0,0-1,0	0,0-0,04
Síra [%]	Železo [%]				
0,0-0,02	zůstatek				



Obr. 24. Materiálový list 1.4512

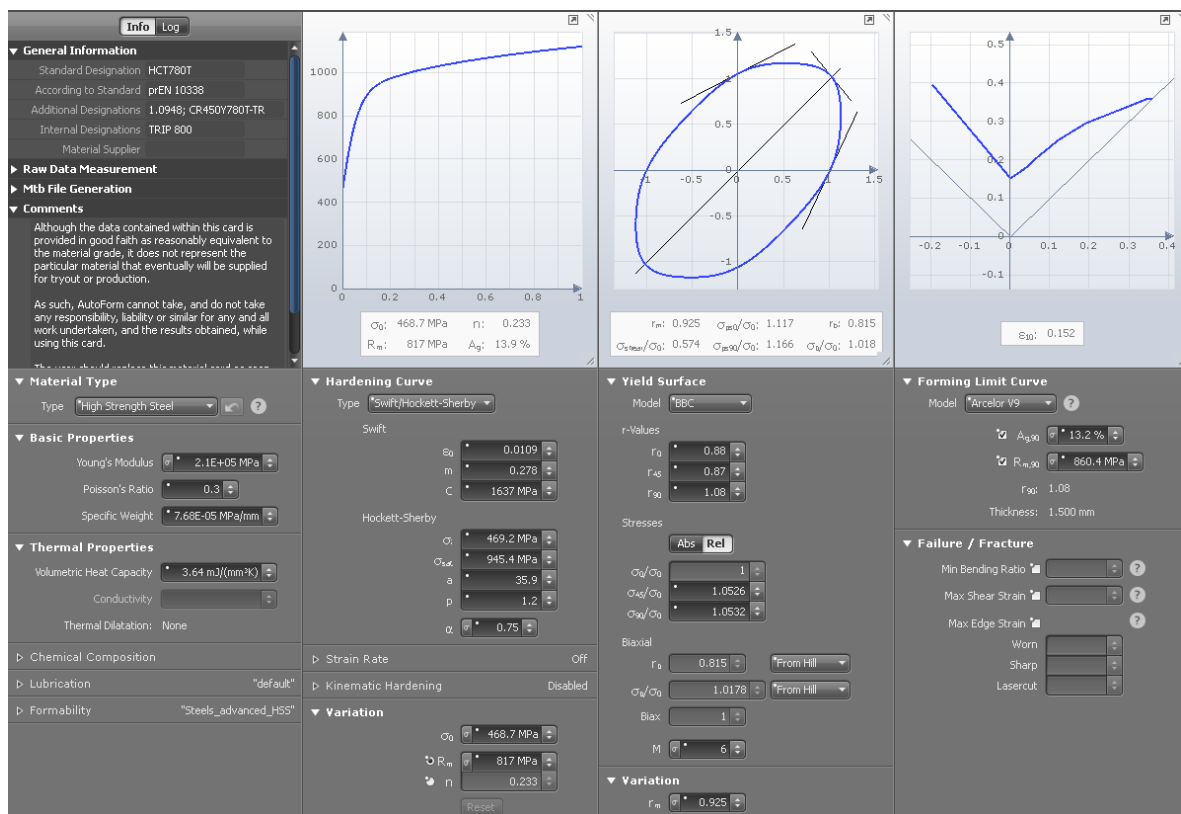


### 6.3.2 Materiál HCT780T

Materiál HCT780T patří mezi vysokopevnostní oceli (AHSS) pro automobilový průmysl a jedná se o materiály se specifikovaným složením, které dosahují dobrých hodnot pevnosti, tažnosti a houževnatosti. Jsou zkonstruované tak, aby splňovaly dnešní požadavky automobilového průmyslu jak z hlediska bezpečnosti, tak i z hlediska lehkosti. Důležité vlastnosti materiálu pro tvářeni jsou na Obr. 25. a v Tab. 3. je uvedeno chemické složení materiálu. [37]

Tab. 3. Chemické složení materiálu HCT780T [38]

Uhlík [%]	Křemík [%]	Mangan [%]	Fosfor [%]	Síra [%]	Hliník [%]
≤0,32	≤2,20	≤2,50	0,12	0,015	≤2,00
Vanad [%]	Bor [%]				
≤0,20	≤0,005				



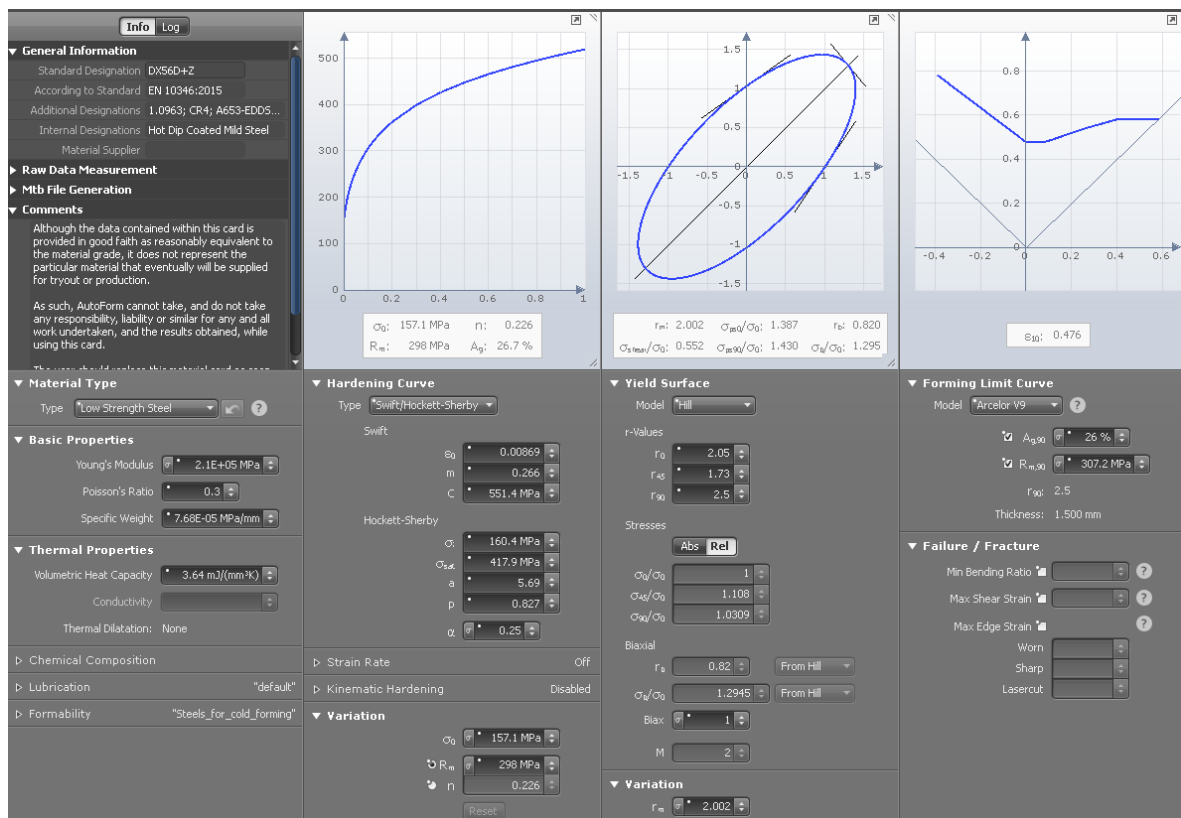
Obr. 25. Materiálový list HCT780T

### 6.3.3 Materiál DX56D

Materiál DX56D patří mezi ocele pro tváření za studena a má dobrou galvanickou ochranu proti korozi. V Tab. 4. je uvedeno chemické složení materiálu a na Obr. 26. jsou důležité vlastnosti pro tváření. [39]

Tab. 4. Chemické složení materiálu DX56D [39]


Uhlík [%]	Křemík [%]	Mangan [%]	Fosfor [%]	Síra [%]	Titan [%]
max. 0,12	max. 0,50	max. 0,60	max. 0,10	max. 0,045	max. 0,30



Obr. 26. Materiálový list DX56D

## 6.4 Volba parametrů stroje

Pro tváření byl zvolen stroj PressLine2200T a technický list stroje je na Obr. 27.



Press Specifications

General	Press Classification	Tandem Large Robots	
	Automation		

---

Performance	Max Stroke Rate	18 1/min	Min Stroke Rate	1 1/min	Tool Change Time	0.75 h
-------------	-----------------	----------	-----------------	---------	------------------	--------

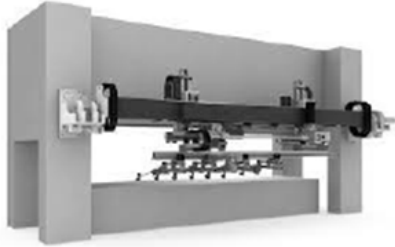
---

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

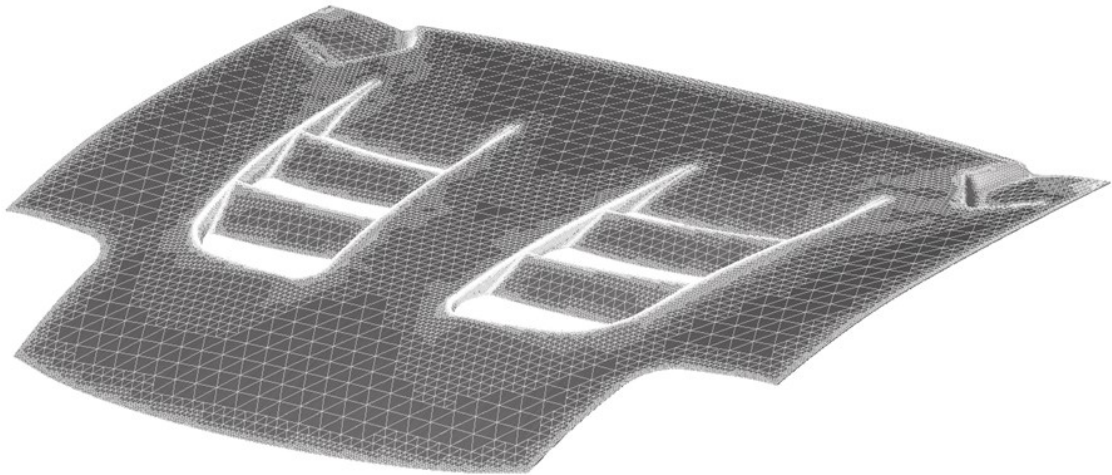
---

Transfer System


Obr. 27. Technický list stroje PressLine2200T

## 6.5 Postup nastavení simulace

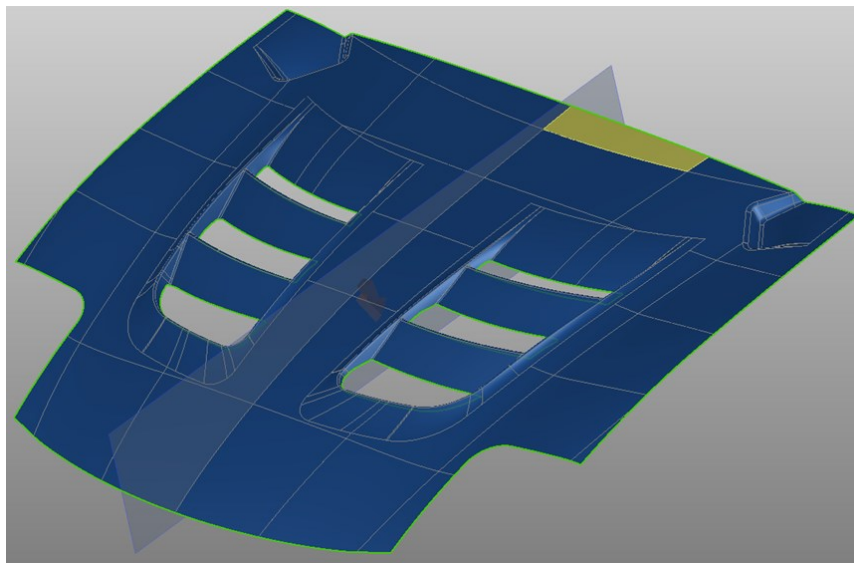
Výrobek zkonstruovaný v softwaru NX byl vložen do softwaru Autoform R8 a automaticky byla vygenerována FEM síť tvořena trojúhelníky. Tato síť lze vidět na Obr. 28.



Obr. 28. FEM síť

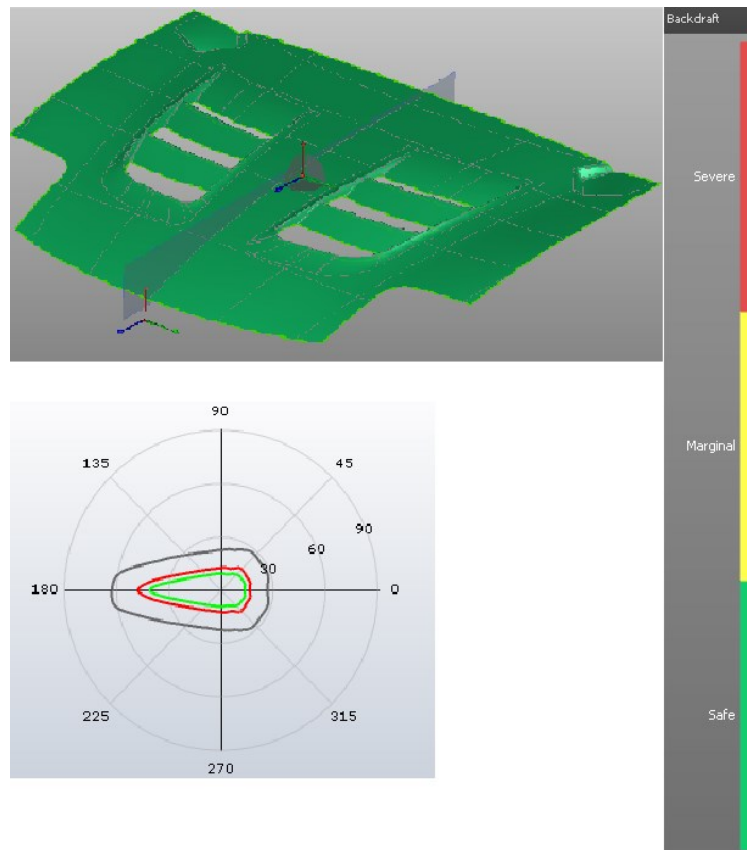
### 6.5.1 Nastavení dílu

Prvním krokem po vložení dílce do programu AutoForm je určení směru lisování, kde v tomto případě je určen směrem dolů a poté je využita symetrie dílce. Toto je znázorněno na Obr. 29.



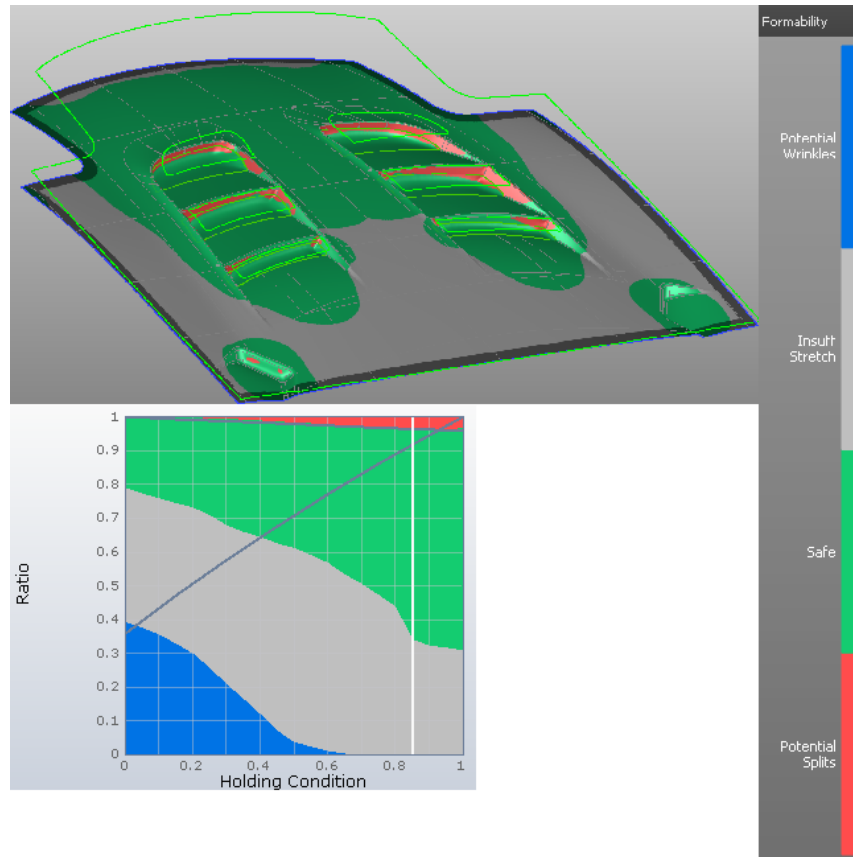
Obr. 29. Určení směru lisování a využití symetrie

Poté pomocí funkce Automatic tipping bylo provedeno vycentrování orientace směru vůči lisování. Podmínka pro splnění tohoto vycentrování je, aby kříž grafu nebyl mimo zelenou oblast a na Obr. 30. lze vidět, že podmínka je splněna.



*Obr. 30. Vycentrování orientace vůči lisování*

Dalším krokem v nastavování simulace bylo zvolení materiálu a jeho tloušťky, toto je uvedeno v kapitole 6.2. Nakonec byla provedena analýza tvárnosti či vyrobitelnosti pomocí funkce Formcheck a provedena optimalizace výrobku. Výsledky této analýzy lze vidět na Obr. 31., kde jsou pomocí červených oblastí znázorněna místa, na kterých by mohlo dojít k porušení. Zde je nastavení dílu kompletní a pokračuje se v plánu tvářecího stroje.



Obr. 31. Analýza tvářitelnosti při nastavení dílu

### 6.5.2 Plán kroků tváření

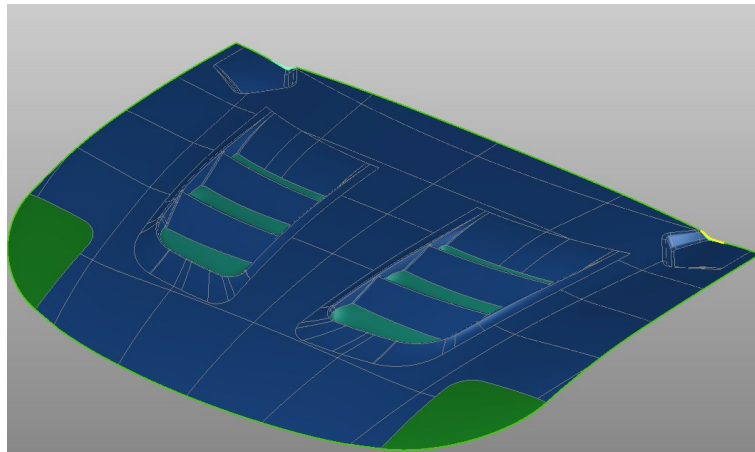
V plánu byl prvně zvolen stroj, který je uveden v kapitole 6.3 a poté určeny jednotlivé kroky tváření. Kroky tváření jsou vidět na Obr. 32., kde lze vidět, že v prvním kroku D-20 bylo ohýbání, následně v kroku F-30 došlo k ostřížení okraje. V dalším kroku F-40 je vystřížení děr. Kroky F-50 až F-70 jsou prázdné, proto bylo potřeba je vyřadit z analýzy, aby s nimi následně simulace nepočítala a nevytvořila se tak časová prodleva.

Features	D-20	F-30	F-40	(F-50)	(F-60)	(F-70)
Draw Region 1						
Outer Trim						
Large Hole 1						
Large Hole 2						
Large Hole 3						

Obr. 32. Plán kroků tváření

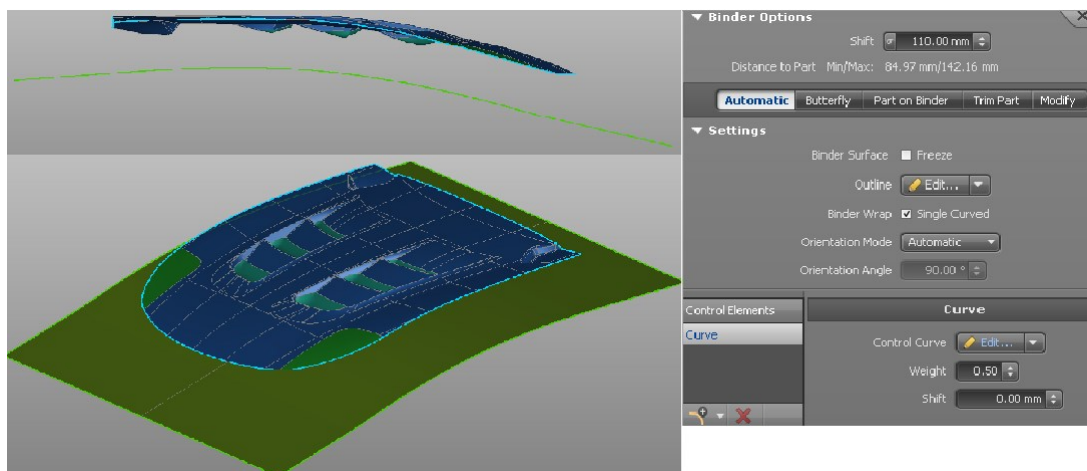
### 6.5.3 Generace funkčních ploch nástroje

Dále pro simulaci bylo potřeba nastavit tažník, a následně ho opět vycentrovat jako u lisování. I zde musí být kříž grafu v zelené oblasti. Podmínka byla splněna. Po vycentrování se musel tažník modifikovat, viz Obr. 33. tak, že na výrobku byly zaplněny všechny díry a dále byl u výrobku vytvořen plynulý přechod po okraji (viz v oblasti světel a změny výšky v zadní části kapoty, viz žlutá čára na obrázku), čímž se předešlo kritickým oblastem ostrého rohu a po vylisování byly tyto nadbytečné oblasti ostříženy.



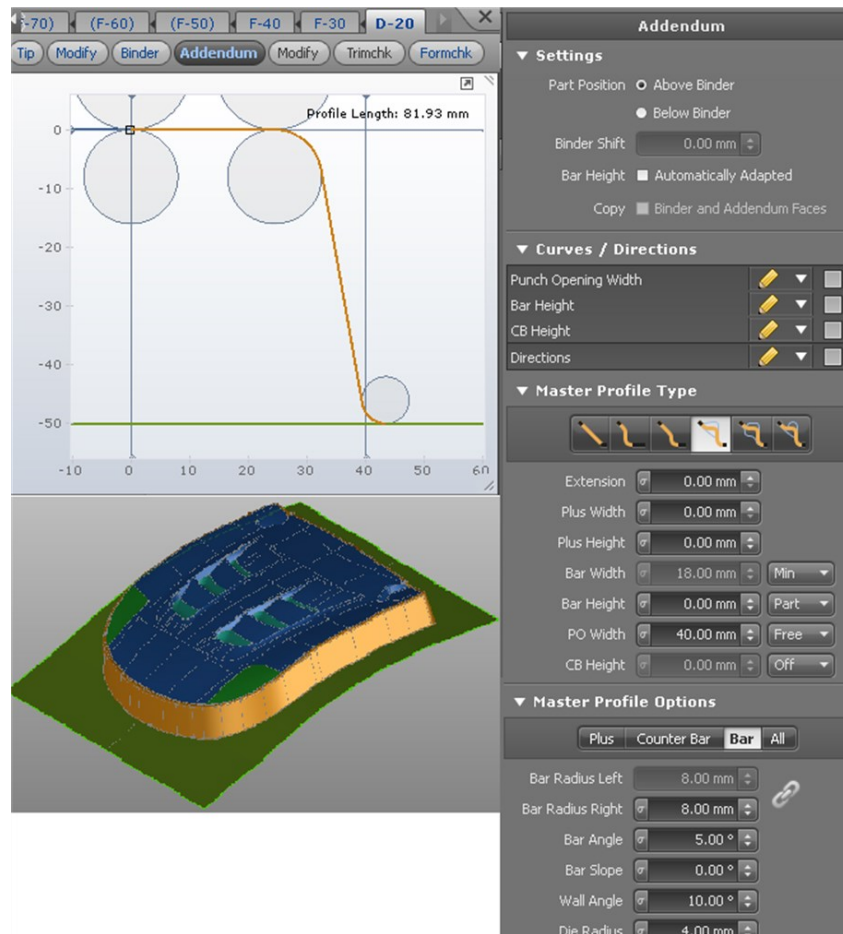
Obr. 33. Modifikování tažníku

Následně byl vytvořen přídržovač, kde byla nastavena vzdálenost od plechu 110 mm s proložením 50 %, toto je znázorněno na Obr. 34.



Obr. 34. Nastavení přídržovače

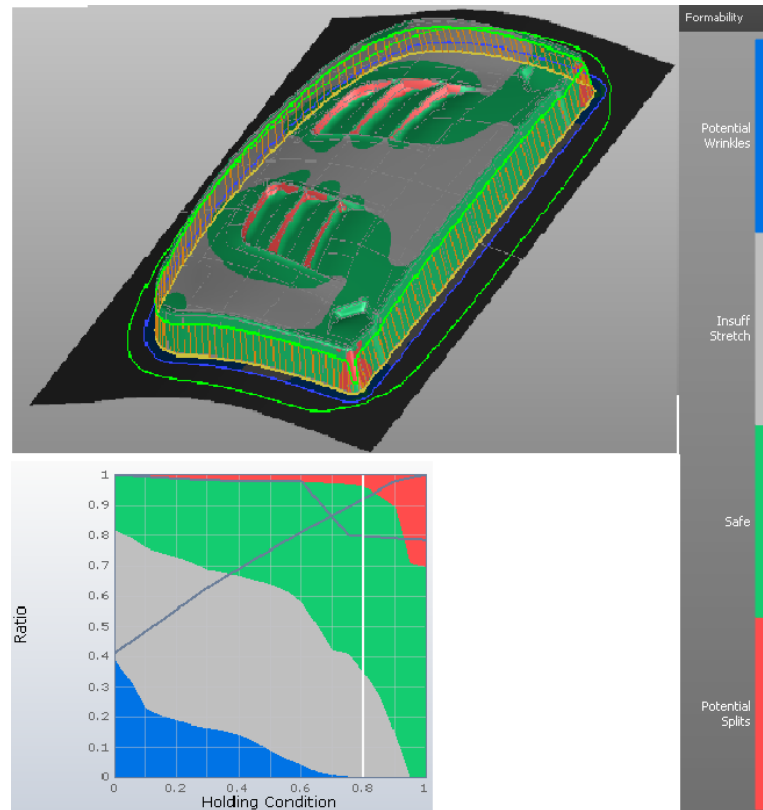
Dalším krokem pro plochy nástroje bylo vytvoření propojení přídržovače a tažníku, pomocí přechodných rádiusů. Pro přechod byl zvolen typ „Smooth“ neboli hladký přechod. Výsledný tvar těla tažníku a nastavení rádiusů je na Obr. 35.



Obr. 35. Tvar těla tažníku a nastavení přechodu

Po vytvoření všech potřebných kroků byla nakonec znovu provedena analýza tvářitelnosti funkcí Formcheck a optimalizována. Na Obr. 36. lze vidět výsledky této analýzy, kde jsou opět pomocí červených oblastí znázorněny místa, kde je riziko porušení.

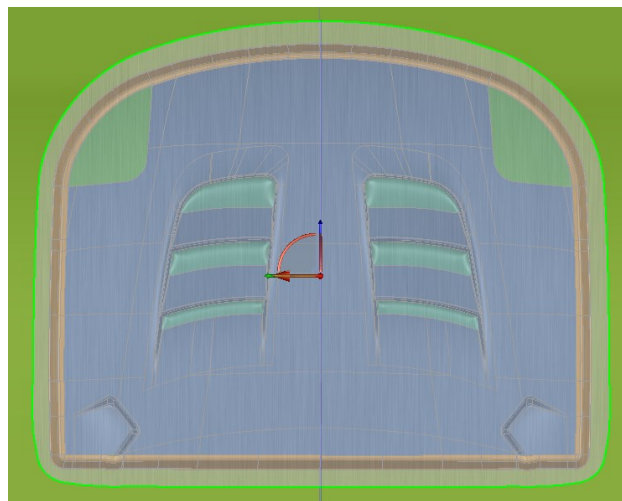




Obr. 36. Analýza tvářitelnosti při generaci ploch nástroje

#### 6.5.4 Vytvoření plechu

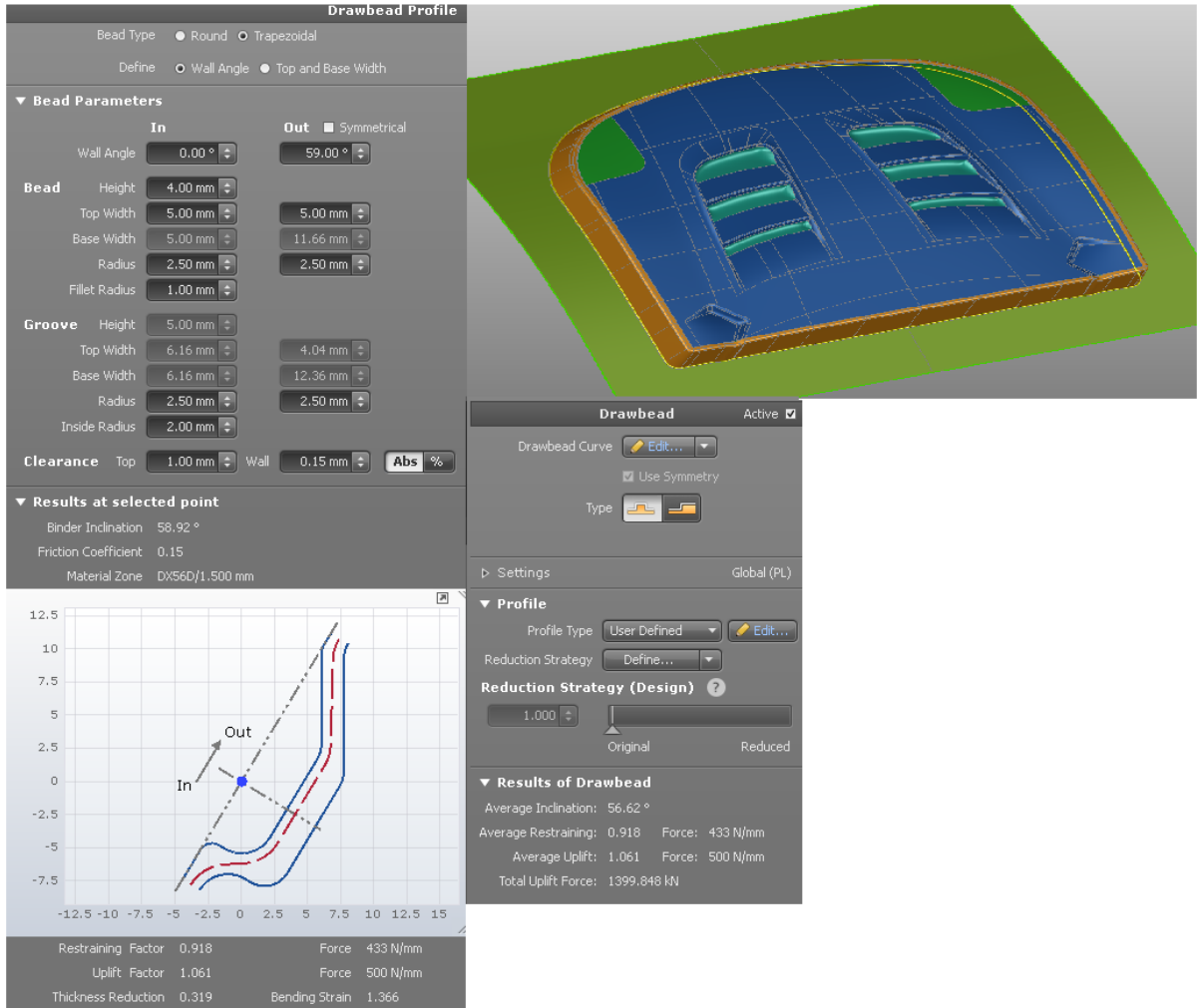
Plech byl vytvořen dle obrysu výrobku s přidavkem po okraji. Výsledný tvar lze vidět na Obr. 37.



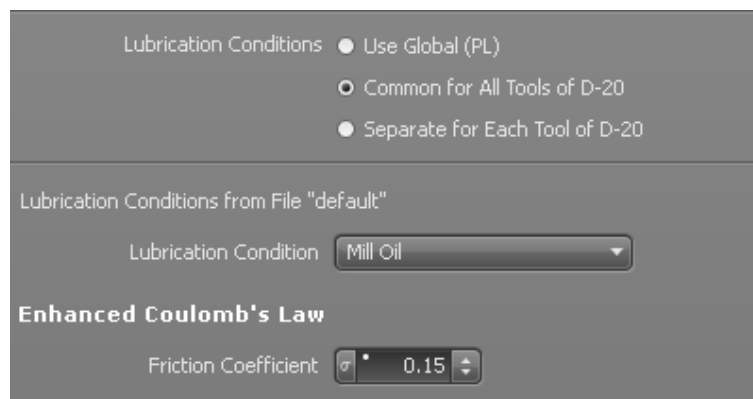
Obr. 37. Tvar plechu

### 6.5.5 Nastavení procesu a mazání

Dále byla vytvořena brzda a mazání v prvním kroku simulace D-20. Brzda byla zvolena obdélníkového tvaru o parametrech na Obr. 38. a pro mazání byl zvolen řezný olej viz Obr. 39



Obr. 38. Nastavení brzdy



Obr. 39. Nastavení mazání

### 6.5.6 Nastavení výpočtu

Typ výpočtu byl zvolen CE a vybrány všechny nabízené výpočty, které jsou vidět na Obr. 40. a nakonec byla spuštěna simulace.

Engineering Phase **CE**

- Thickness/Splits Results
  - Thickness/Thinning\*
  - Current Failure (Linear)
  - Surface Cracks
  - Shear Fracture
  - Maximum Failure (Linear)\*
  - Maximum Failure (Non Linear)
  - Edge Cracks
  - Strain Linearity
- Wrinkling/Surface Results
  - Wrinkles
  - Current Wrinkles
  - Potential Wrinkles
  - Unbending Strain
  - Surface Defect Height
  - Surface Defect Strain
- Contact Results
  - Tool Pressure
  - Contact Pressure\*
  - Maximum Contact Pressure
  - Friction Shear Stress
  - Contact Distance\*
  - Contact Penetration
  - Relative Displacement
  - TriboForm Results
- Geometry Results
  - Tangential Velocity
  - X-, Y-, Z-Velocity
  - Rolling/Transverse Direction
- Strain/Stress Results
  - Layer Output: **Top/Middle/Bottom Layer**
  - Principal Strains\*
  - Strain Tensor (r-t-n)
  - Equivalent Plastic Strain
  - Equivalent Plastic Strain Rate
  - Stress Resultants (r-t-n)
  - Principal Stresses
  - Stress Tensor (r-t-n)
  - Hardening Stress
  - Stress State
  - Principal Stress Resultants
- Skid Line Results
  - Check Radius: **2000.00%**
  - Abs %**
- Tool Results
  - Wear
- Thermal Results
  - Temperature
  - Phase Fractions
  - Final Part Properties
  - Temperature Dependent Strains
  - Heat Transfer

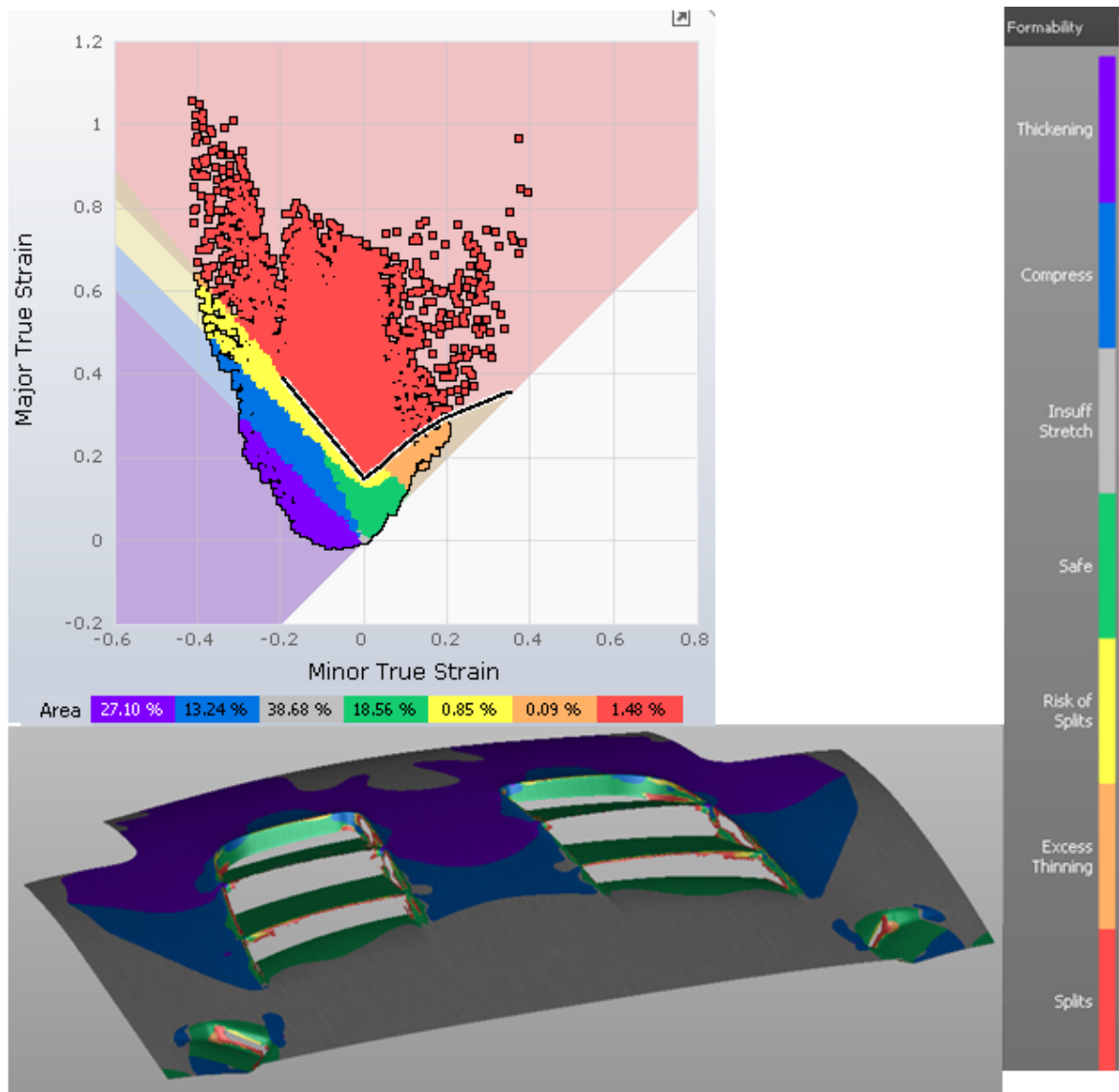
Obr. 40. Nastavení simulace

## 7 PŘEDBĚŽNÉ ANALÝZY

V této diplomové práci se prvně analyzoval výrobek pro určení jeho optimalizace. Předběžné analýzy byly prováděny na třech materiálech, které jsou uvedeny v kapitole 6.3.

### 7.1 Předběžná analýzy pro materiál HCT780T

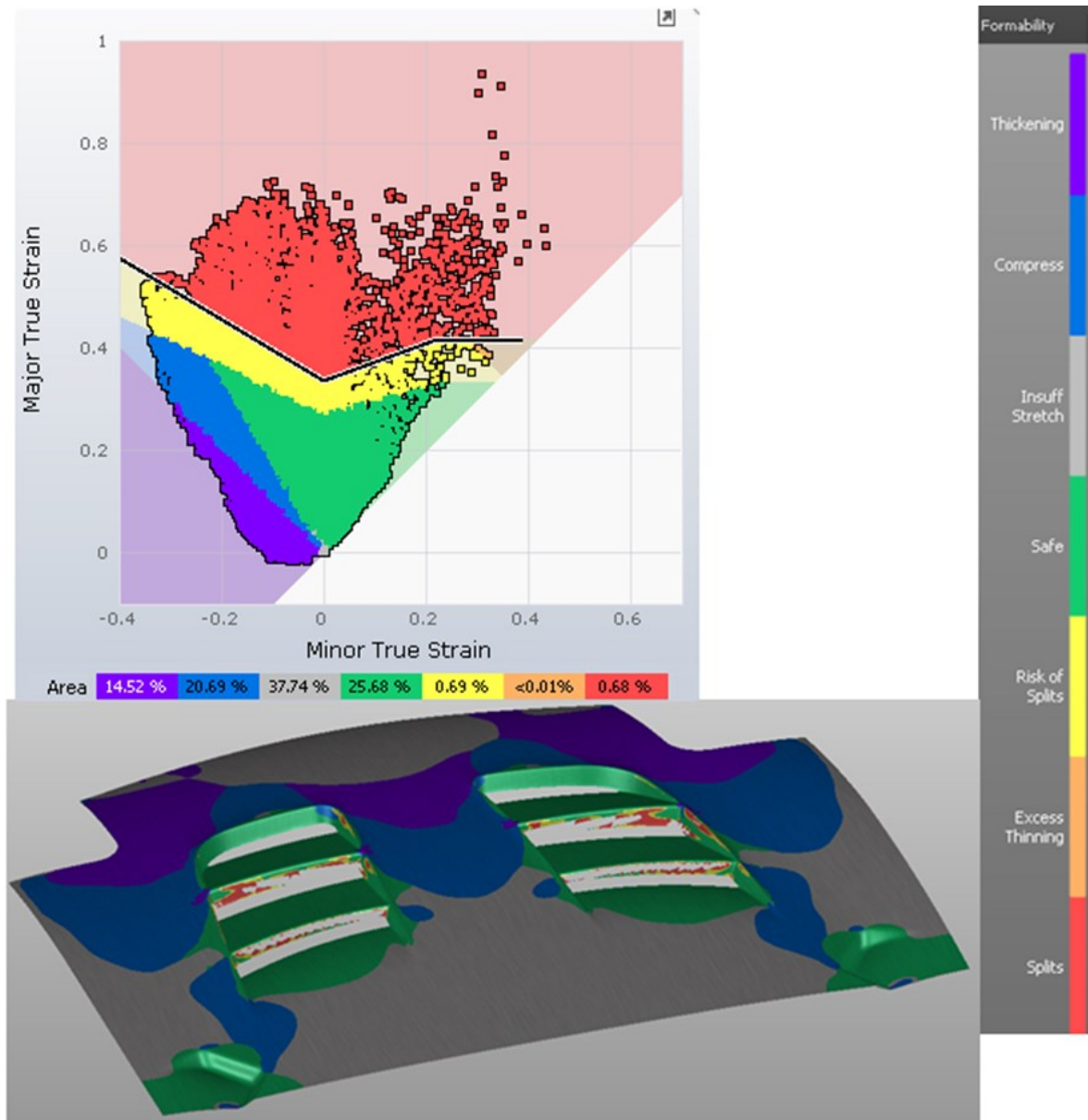
Nejprve byly na původním výrobku vytvořeny analýzy pro vybrané tři materiály při tloušťce 1,5 mm. Nejhůře dopadl materiál HCT780T, který byl proto z dalších analýz vyrazen jako nevhodný pro tvářenání tohoto dílce. Na Obr. 41. lze vidět výsledek tohoto materiálu. Vznikají zde porušení v případě 1,48 % z celkového dílce. A porušení se vyskytuje zejména v oblasti děr na kolmějších plochách.



Obr. 41. Výsledek simulace pro materiál HCT780T při tloušťce 1,5 mm

## 7.2 Předběžná analýzy pro materiál 1.4512

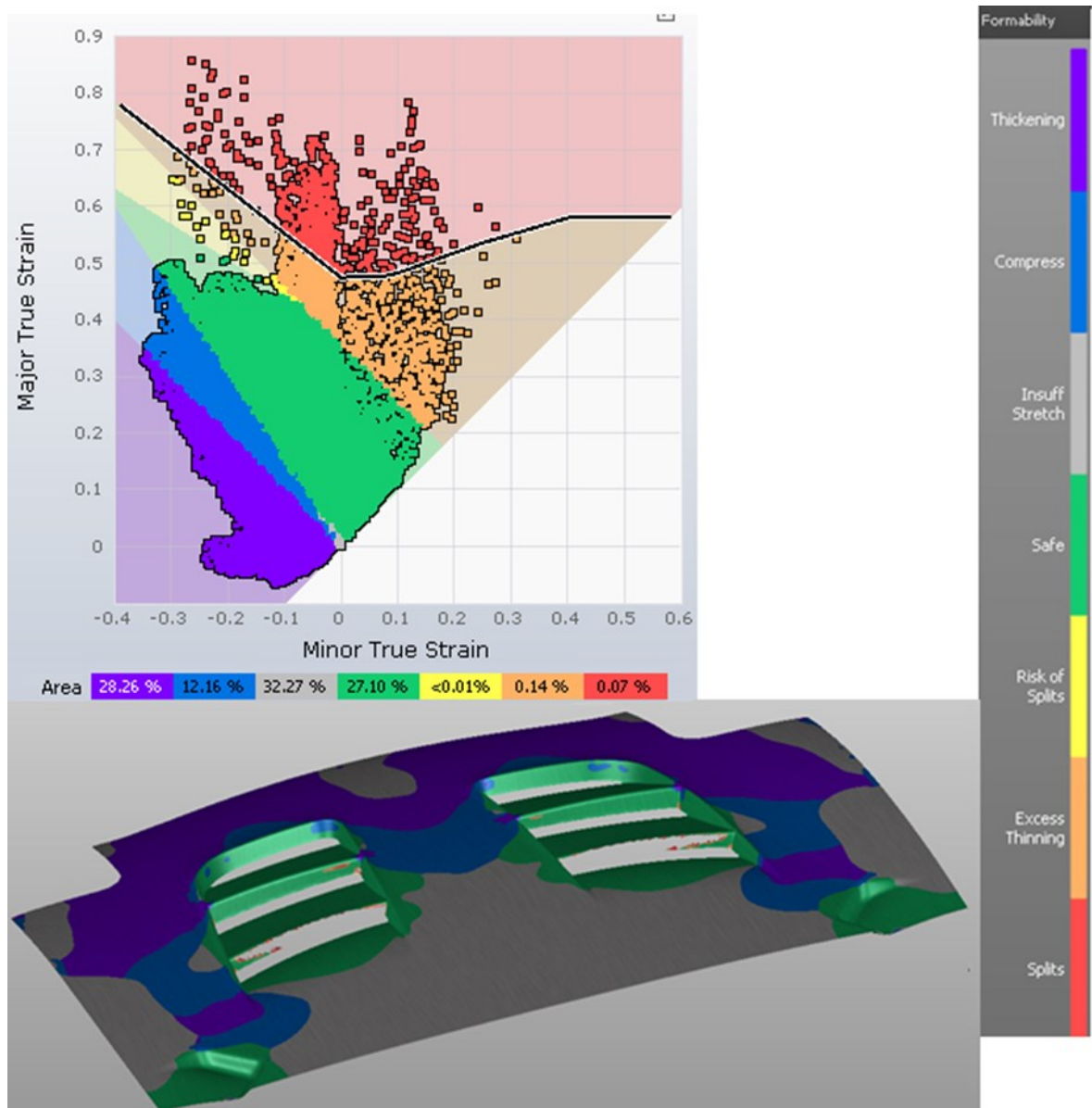
Lépe dopadl materiál 1.4512, který také obsahuje porušení a to 0,68 %. Takže o polovinu méně než u materiálu HCT780T. a na Obr. 42. lze vidět, že porušení se vyskytuje pouze v okolí děr a už není tolik po bočních stěnách.



Obr. 42. Výsledek simulace pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

### 7.3 Předběžná analýzy pro materiál DX56D

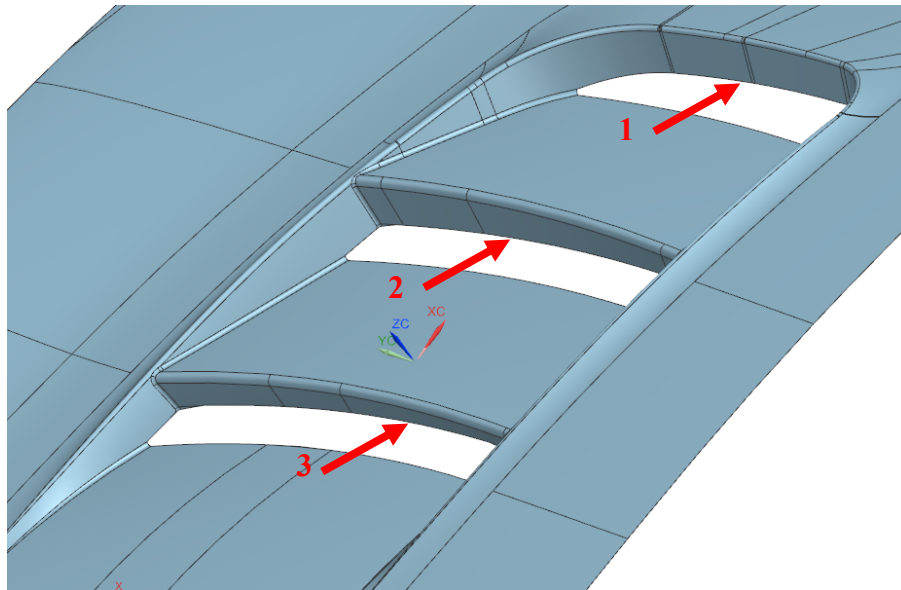
Nejllepšího výsledku těchto předběžných simulací dosáhl materiál DX56D, kde vidíme porušení pouze 0,07 %. Na Obr. 43. lze vidět, že porušení je opět v oblasti děr. Zde se vyskytuje zejména na jedné díře a na druhé je pouze riziková oblast.



Obr. 43. Výsledek simulace pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

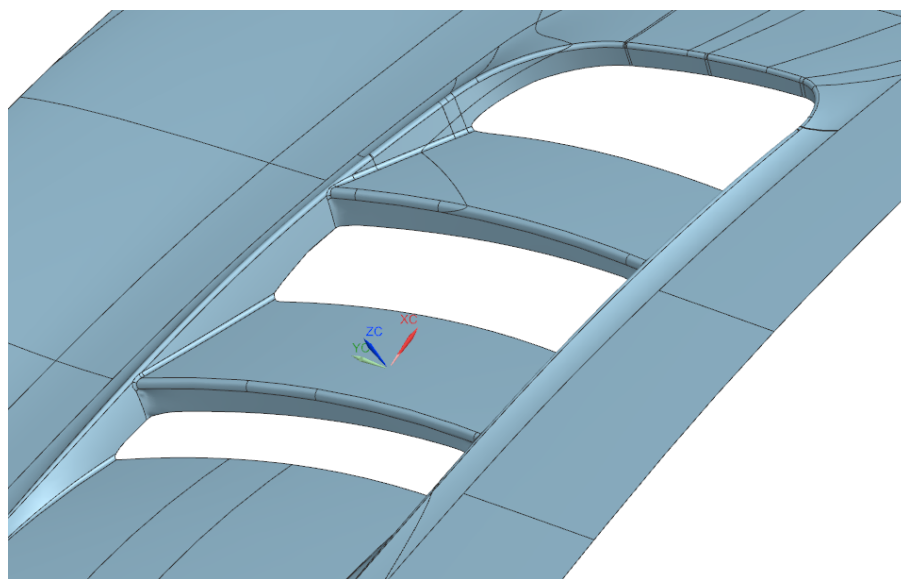
## 8 OPTIMALIZACE DÍLU

Na základě výsledku předběžných analýz byla určena optimalizace dílce, která spočívala v úpravě v oblasti děr. Upravovali se stěny, které jsou znázorněny na Obr. 44. Prvním krokem bylo snížit hloubku děr neboli zkrácení stěn na které ukazují šipky. Tyto všechny tři stěny byly zkráceny o 5 mm ve směru osy Z. Jako další krok bylo zrušení podkosení stěny 2 a 3, čeho se docílilo posunutím křivky, na které ukazují šipky o 5 mm ve směru osy -X.



Obr. 44. Znázornění oblastí k optimalizaci

Výsledek optimalizace je znázorněn na Obr. 45., kde je zřetelně vidět snížení hran. Takto optimalizovaný dílec byl následně zpracován v simulacích.

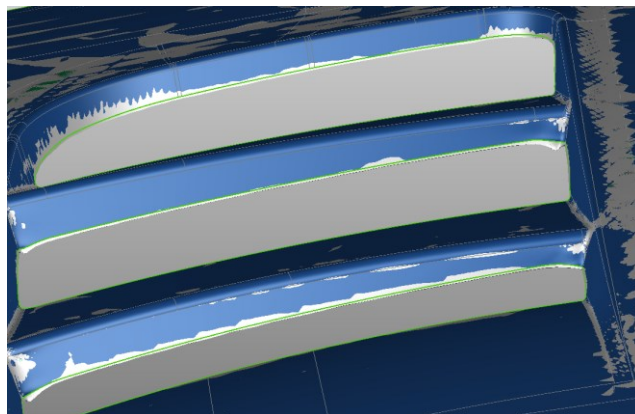


Obr. 45. Optimalizovaný dílec

## 9 VÝSLEDKY SIMULACE

Na zoptimalizovaném dílu byly provedeny simulace na dvou nejvhodnějších materiálech z předběžných analýz, a to 1.4512 a DX56D pro tloušťky 1,3 mm, 1,5 mm a 1,8 mm. Pro všechny simulace byly zvoleny stejné podmínky nastavení (viz. kapitola 6), které byly nejvíce vyhovující pro daný dílec. Při zkoušení jiných parametrů, buď docházelo k chybě a program nebyl schopen provést výpočet nebo ke zhoršení výsledků, a proto toto nastavení bylo zvoleno jako nejvhodnější. Na výsledné optimalizaci se vyhodnocovala tvářitelnost, porušení, zvlnění a ztenčení.

Po vytvoření simulací na optimalizovaném dílci docházelo k nepřesnému vystřížení děr, jak lze vidět na Obr. 46., kde zároveň vznikají rizika porušení. Tyto přebytky ale budou následně mechanicky odstraněny a tím pádem nepřekážejí vyrobiteľnosti dílce, jež bude popsáno v následujících kapitolách.



Obr. 46. Nepřesné ostřížení děr

### 9.1 Tvářitelnost

Výsledky tvářitelnosti zobrazují předěl mezi oblastmi bezpečného tváření a porušení. Mimo tyto základní křivky se zde zobrazují také křivky tvořící oblasti, které indikují porušení materiálu. Dále lze z diagramu vyčíst další vady jako ztenčení a zvlnění. Po vytvoření diagramu jsou do něj zaneseny body, které znamenají hodnoty hlavního přetvoření na zkoumaných místech výlisku. Pomocí těchto bodů lze určit místo na dílci, které má nevhodnou napjatost ať už kritickým ztenčením nebo porušením apod.

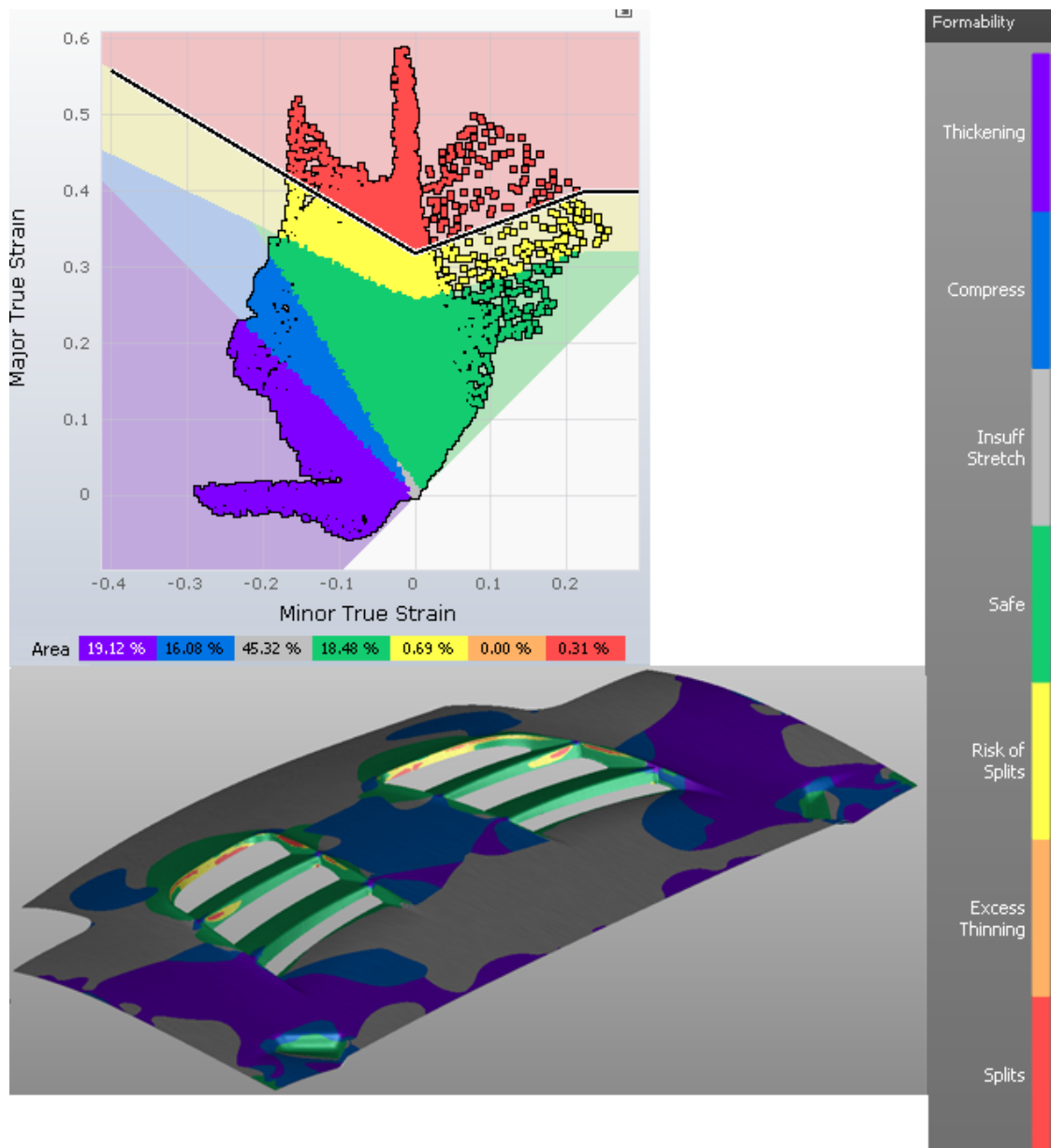
Tato analýza představuje přetvoření dílce, kde je cílem v hlubokém tažení dosažení co největšího přetvoření. Tímto se potlačuje efekt odpružení a zvyšuje se zároveň výsledná pevnost. Tohoto je třeba dosáhnout, aniž by došlo k nežádoucím jevům jako je porušení, ztenčení, stlačení nebo pěchování.



### 9.1.1 Materiál 1.4512

#### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

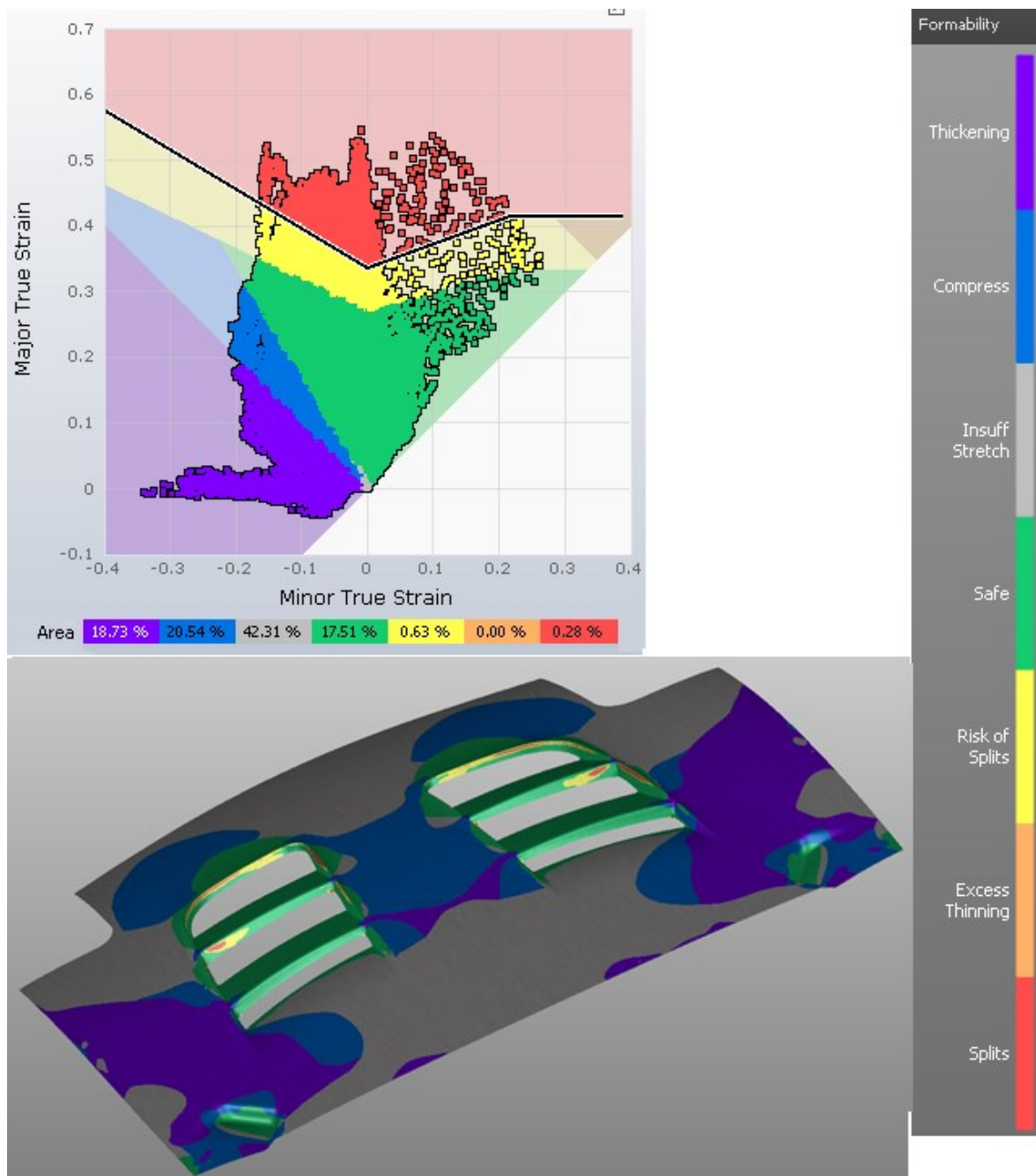
Na Obr. 47. lze vidět výsledky pro materiál 1.4512 o tloušťce 1,3 mm, a vyskytuje se zde oblast porušení 0,31 %, ale nikde nedošlo k viditelnému prasknutí výrobku. Oblast s rizikem porušení je dalších 0,69 %. Oblasti porušení a rizika porušení se vyskytují na stěnách kolem děr. Z hlediska ztenčení zde dochází k 19,12 % a 0,00 % nadměrného ztenčení. Další oblast, kterou je zhuštění, vzniká v 16,08 %. Následně zbývají dvě oblasti, a to oblast pro nevyužitý materiál s 45,32 % a bezpečná oblast pro tváření s 18,48 %. Využitý materiál je zejména v oblasti děr, kde dochází k většímu tažení plechu, kvůli ohybům.



Obr. 47. Výsledky tvářitelnosti pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

**Materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm**

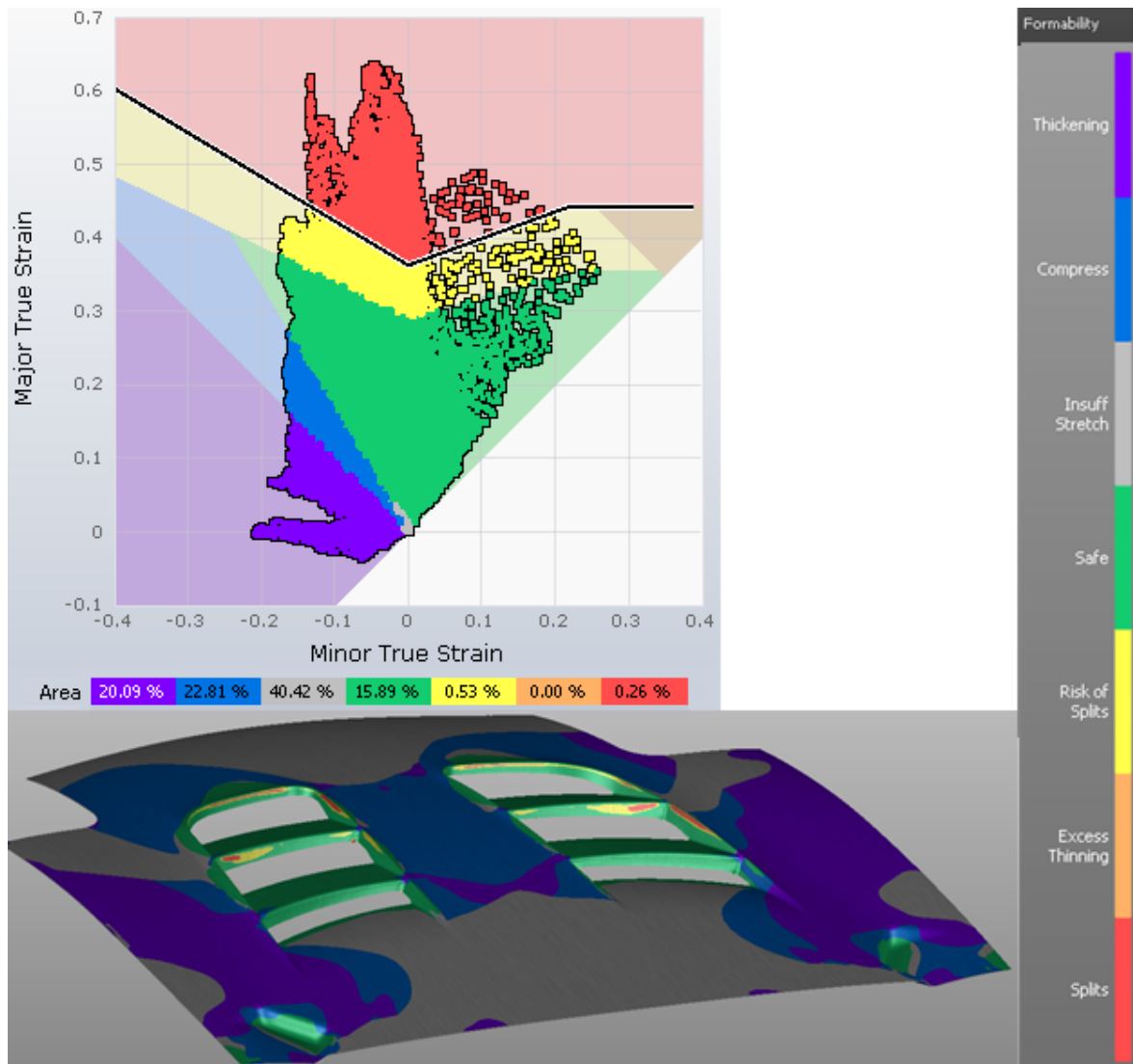
Při tloušťce 1,5 mm u materiálu 1.4512 dochází k porušení v 0,28 % a s rizikem porušení 0,63 %. Tyto oblasti jsou opět na stěnách kolem děr a nevzniklo přímé prasknutí na dílci. Ztenčení se zde vyskytuje v 18,73 % s 0,00 % nadměrného ztenčení. Zhuštění materiálu zde vzniká v 20,54 %. Největší podíl s 42,31 % má oblast nevyužitého materiálu, zbývajících 17,51 % připadá bezpečné oblasti pro tváření, která je v okolí děr z důvodu výraznějšího tažení plechu. Tyto výsledky lze vidět na Obr. 48.



Obr. 48. Výsledky tvářitelnosti pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

**Materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm**

Pro tloušťku 1,8 mm u materiálu 1.4512 vzniká porušení v 0,26 % a s rizikem porušení 0,53 %. Oblasti jsou na stěnách okolo děr, kde dochází k ohybu okolo 90°, ani v tomto případě nevzniklo viditelné prasknutí. Ztenčení materiálu vzniká v 22,81 % a nadměrné ztenčení 0,00 %. Zhuštění je 22,81 % a oblast s nevyužitým materiálem 40,42 %. Bezpečná oblast pro tváření je v 15,89 % v okolí děr, kde dochází k většímu tažení plechu. Vše je znázorněno na Obr. 49.

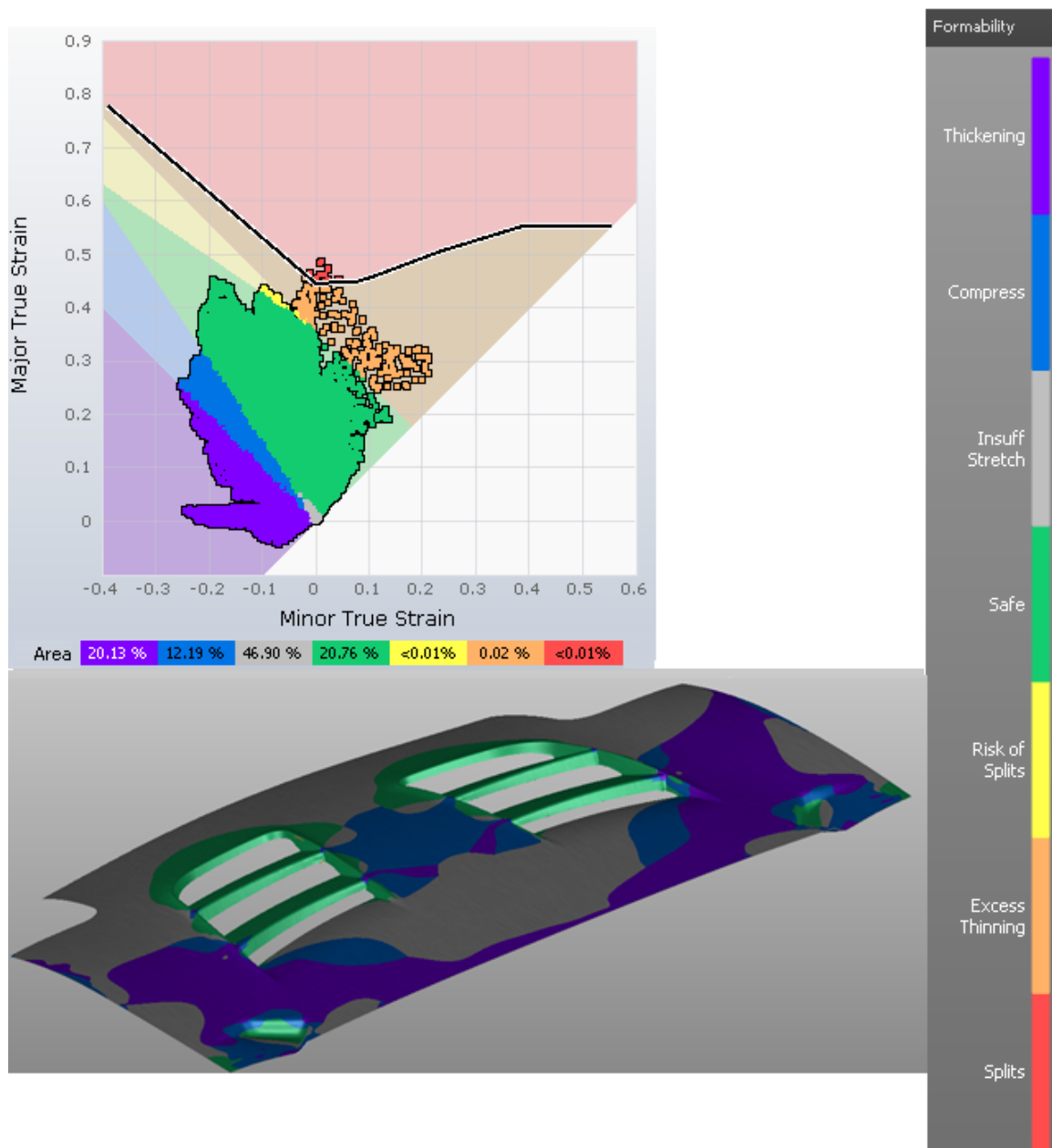


Obr. 49. Výsledky tváritelnosti pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm

## 9.1.2 Materiál DX56D

### Materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

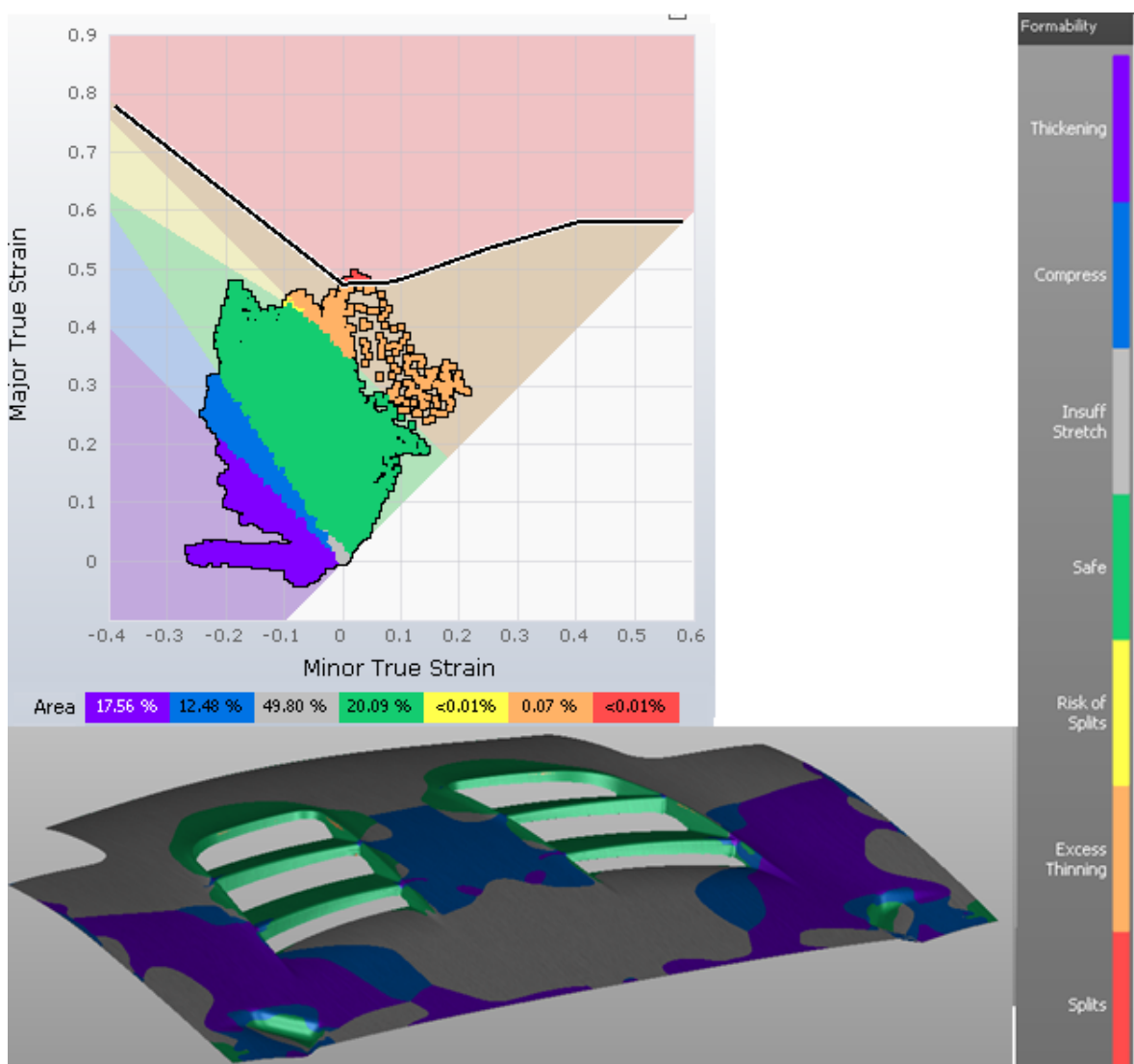
Na Obr. 50. lze vidět výsledky tvářitelnosti pro materiál DX56D o tloušťce 1,3 mm. Je vidět, že porušení, a i riziko porušení má hodnotu  $<0,01\%$  a tyto oblasti se vyskytují na výstupku, který bude následnou operací odstraněn. To je znázorněno na Obr. 46., tím lze považovat výtazek bez rizika porušení. Ztenčení na výrobku se vyskytuje v  $20,13\%$  s  $0,02\%$  nadměrného ztenčení. Nadměrné ztenčení se vyskytuje na stěně u první díry, kde je ohyb plechu okolo  $90^\circ$ . Zhuštění materiálu je zejména uprostřed výrobku a celkově je v  $12,19\%$ . Oblast nevyužitého materiálu má  $46,90\%$  a bezpečná oblast  $20,76\%$  okolo děr na výtazku.



Obr. 50. Výsledky tvářitelnosti pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

**Materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm**

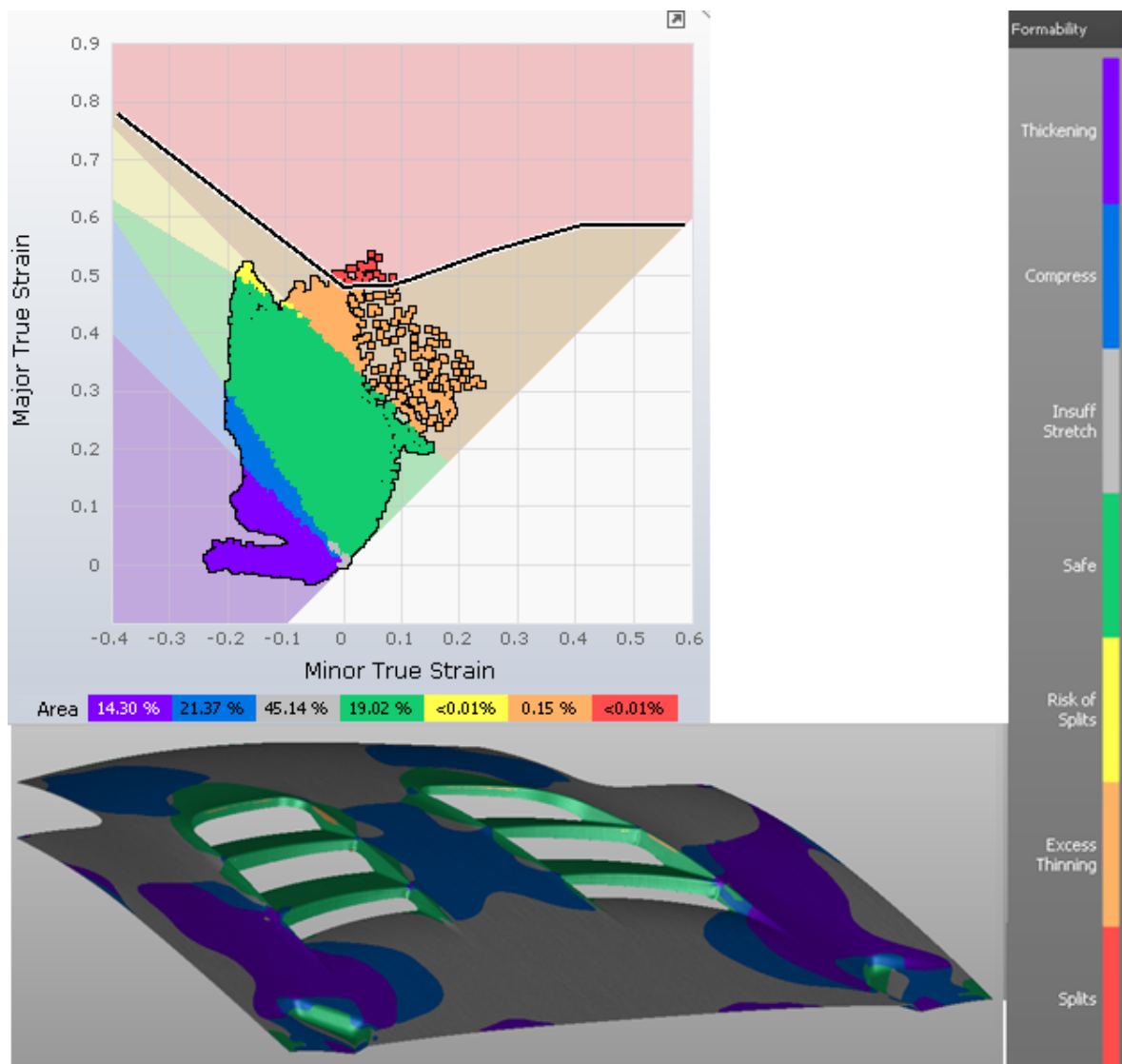
U materiálu DX56D při tloušťce 1,5 mm má porušení a riziko porušení hodnotu  $<0,01\%$ , i v tomto případě se tyto oblasti vyskytují v místě nepřesného ostřížení, jak je znázorněno a popsáno u Obr. 46. Ztenčení vzniká na výtažku v 17,56 % a nadměrné ztenčení 0,07 %. Nadměrné ztenčení je opět v místě ohybu stěny u první díry, kde dochází k ohybu kolem  $90^\circ$ . Další oblastí je zhuštění materiálu, které se hlavně vyskytuje uprostřed výrobku a celkem dosahuje 12,48 %. Nevyužitého materiálu je zde 49,80 % a bezpečné oblasti pro tváření se nachází opět v oblasti děr, kde dochází k výraznějšímu tažení 20,09 %. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 51.



Obr. 51. Výsledky tvářitelnosti pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

**Materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm**

Na Obr. 52. jsou výsledky pro materiál DX56D o tloušťce 1,8 mm, a lze vidět že oblasti porušení i rizika porušení mají stejnou hodnotu a to  $<0,01\%$ . Tato oblast se vyskytuje jako u ostatních tlouštěk v oblasti nepřesného ostřížení. Ztenčení je zde 14,30 % a nadměrné ztenčení 0,15 %. Nadměrné ztenčení je opět v místě ohybu na stěně u první díry na výtažku. Ke zhuštění materiálu dochází v 21,37 % a nevyužitá oblast materiálu je 45,14 %. Bezpečná oblast pro tváření je 19,02 % a opět se vyskytuje v okolí děr.



Obr. 52. Výsledky tvářitelnosti pro materiál DX56D při tloušťce 1,8

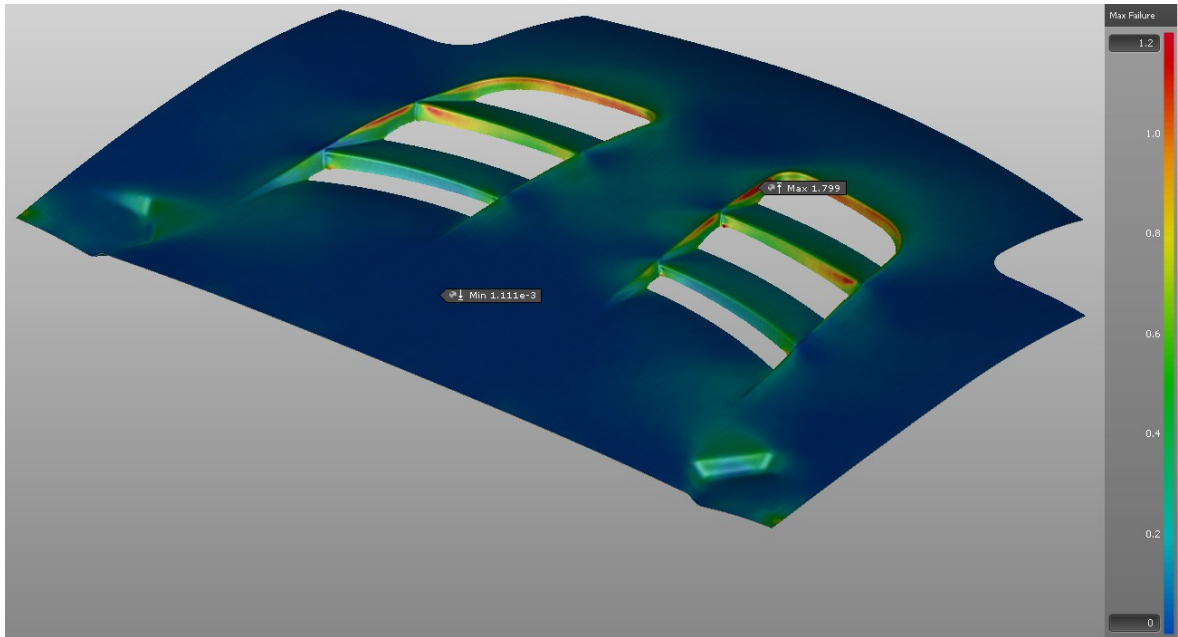
## 9.2 Porušení

Tato analýza ukazuje nejnáchylnější místo na porušení. Jako hraniční hodnota je 1, neboli 100 %. Riziko odtržení se zvyšuje od překročení hodnoty 0,8, neboli 80 %.

### 9.2.1 Materiál 1.4512

#### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

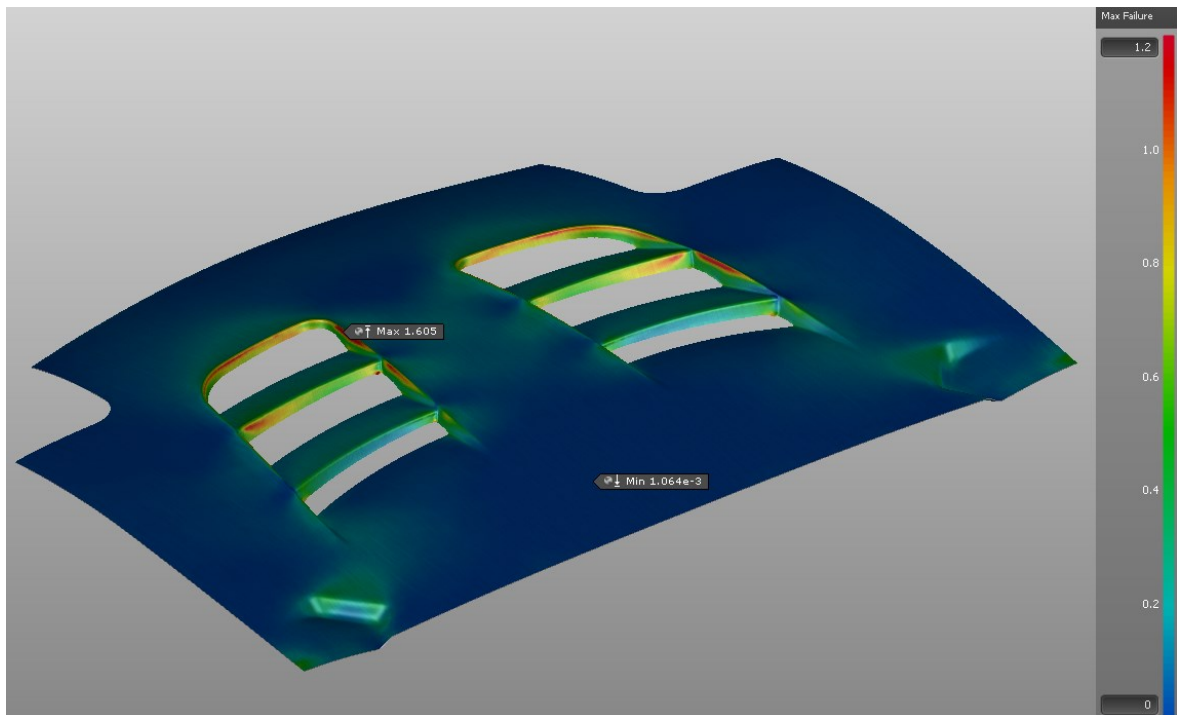
Pro materiál 1.4512 o tloušťce 1,3 mm vychází maximální porušení 179,9 %, jak lze vidět na Obr. 53. Z tohoto plyne, že daný materiál o dané tloušťce z hlediska porušení není vhodný, protože doporučená hodnota je do 80 %. Zároveň se zde nacházíme nad 100 %, čímž dojde k určitému porušení dílce. Také na obrázku lze vidět, že po okraji děr je více červených oblastí ne pouze jedna.



Obr. 53. Výsledky porušení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

#### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

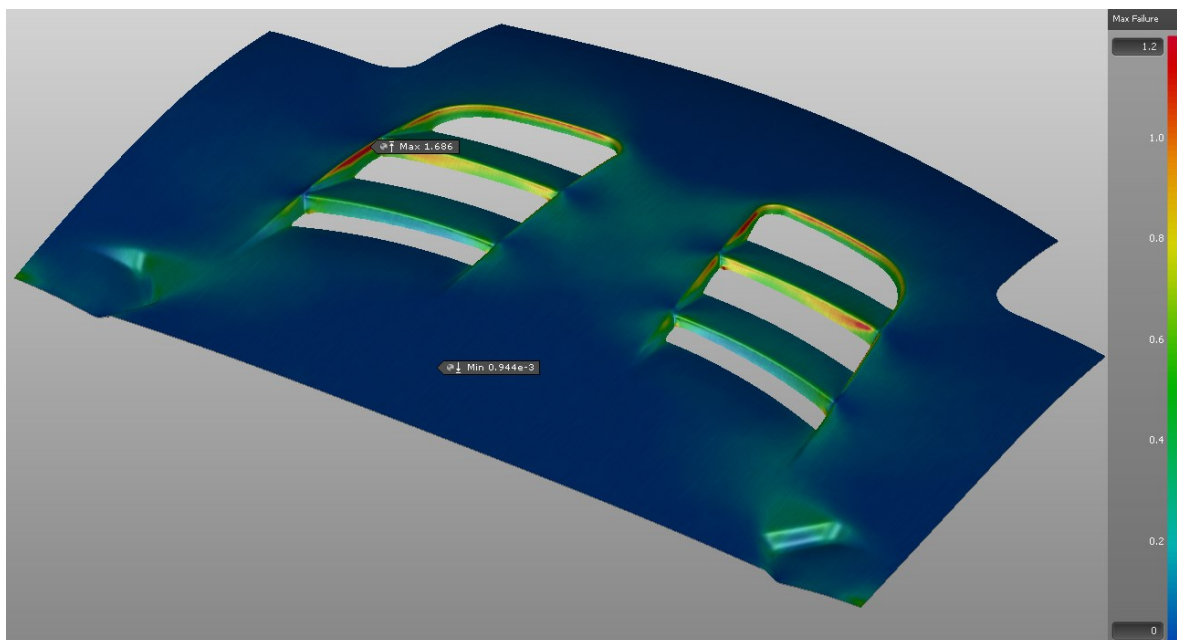
Pro tloušťku výtažku 1,5 mm u materiálu 1.4512, je znovu hodnota porušení nad doporučenými 80 % a dosahuje 160,5 %. Oblast se opět vyskytuje v okolí děr, jak lze vidět na Obr. 54.



Obr. 54. Výsledky porušení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

### **Materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm**

Na Obr. 55. je možné vidět v okolí děr, že maximální porušení je nad doporučenými 80 % a to 168,6 %. Ani při tloušťce 1,8 mm není materiál 1.4512 vhodný, protože dojde k prasknutí.



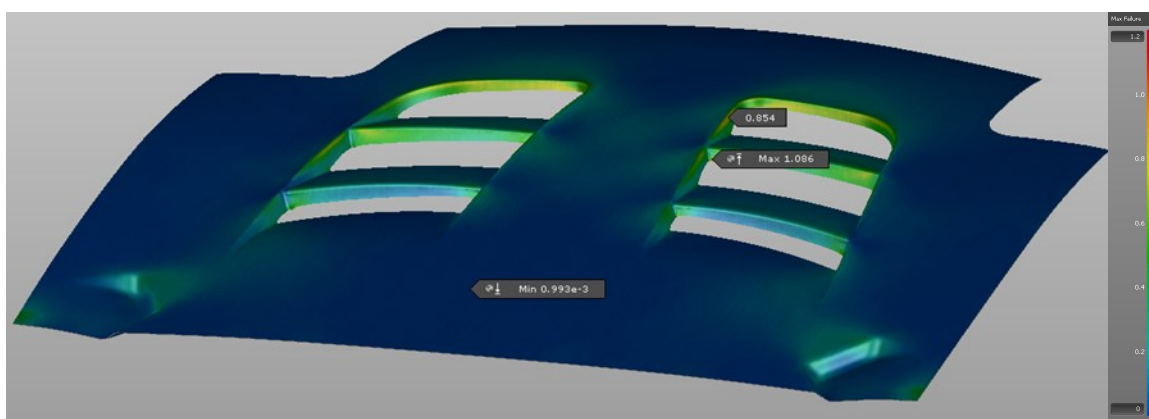
Obr. 55. Výsledky porušení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm



## 9.2.2 Materiál DX56D

### Materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

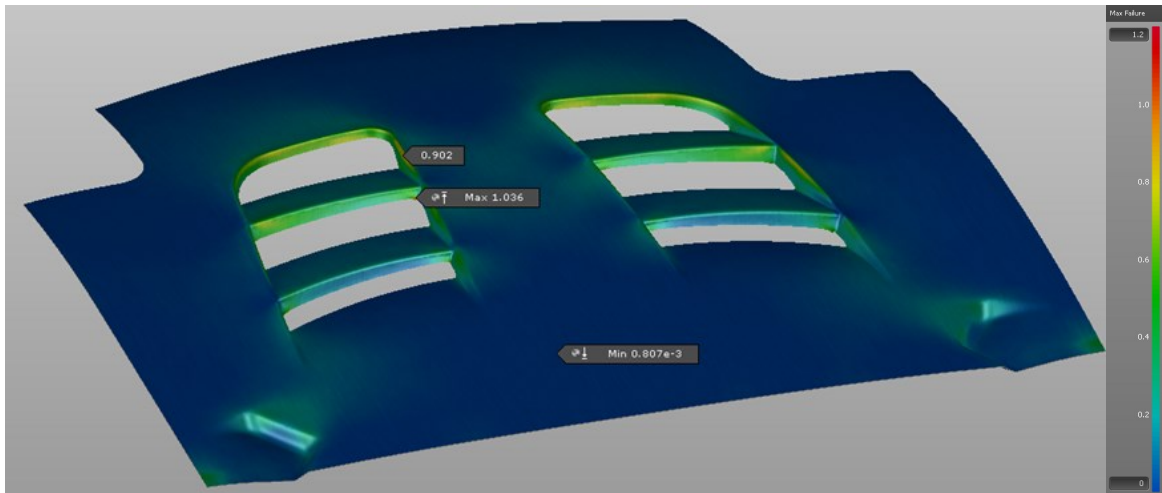
Pro materiál DX56D o tloušťce výtažku 1,3 mm dosahuje maximální hodnota porušení 108,6 %, což je nad doporučenými 80 %, ale tato hodnota je na výstupku, který je nesprávně ostřížen a bude následně mechanicky odstraněn, jak je popsáno u Obr. 44. v kapitole 7.1 a tedy dle zbarvení, které lze vidět na Obr. 56. se zde vyskytuje s nejvyšší hodnotou žlutá barva 85,4 %. Doporučená hodnota je překročena, ale výrobek není porušen a tento výsledek je přijatelný.



Obr. 56. Výsledky porušení pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

### Materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

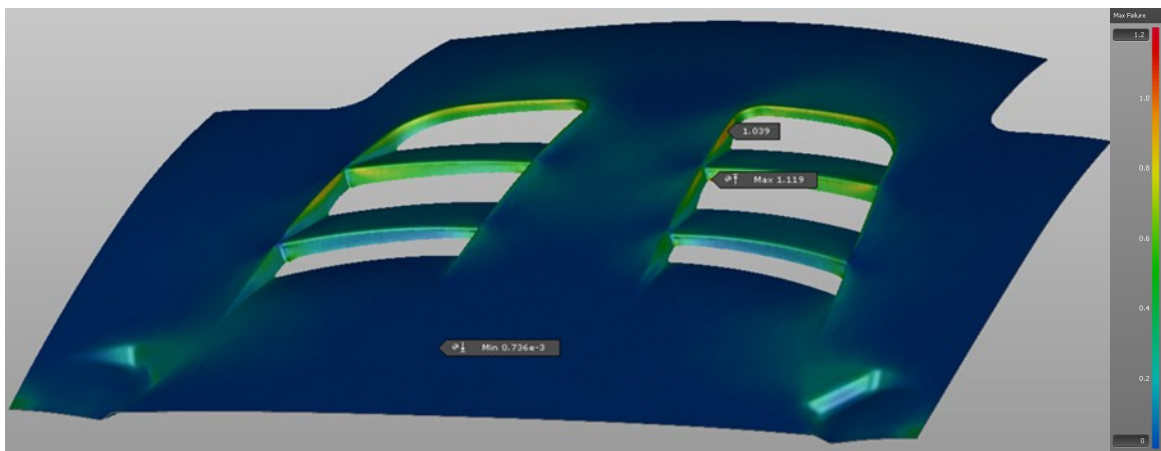
Pro tloušťku 1,5 mm platí stejně jako u tloušťky 1,3 mm, že maximální hodnota 103,6 % je na výstupku, který bude následně mechanicky odstraněn. Dle Obr. 57. lze určit dle žlutých oblastí, že hodnota se opět pohybuje kolem 80 %. Nejvíce tmavě žlutá až skoro oranžová oblast po vybrání ukazuje 90,2 %. Tím je doporučená hodnota překročena, ale nedojde k porušení výtažku.



Obr. 57. Výsledky porušení pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

### **Materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm**

Pro tloušťku 1,8 mm je maximální hodnota 111,9 % na výstupku, který se odstraní po výrobě, stejná jako u ostatních tlouštěk. Ale i tak se zde vyskytuje oblast dosahující 103,9 %, tedy místo, kde dojde k porušení. Tímto lze říci, že tato tloušťka je nevhodná pro výrobu daného výtažku. Tyto výsledky lze vidět na Obr. 58.



Obr. 58. Výsledky porušení pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm

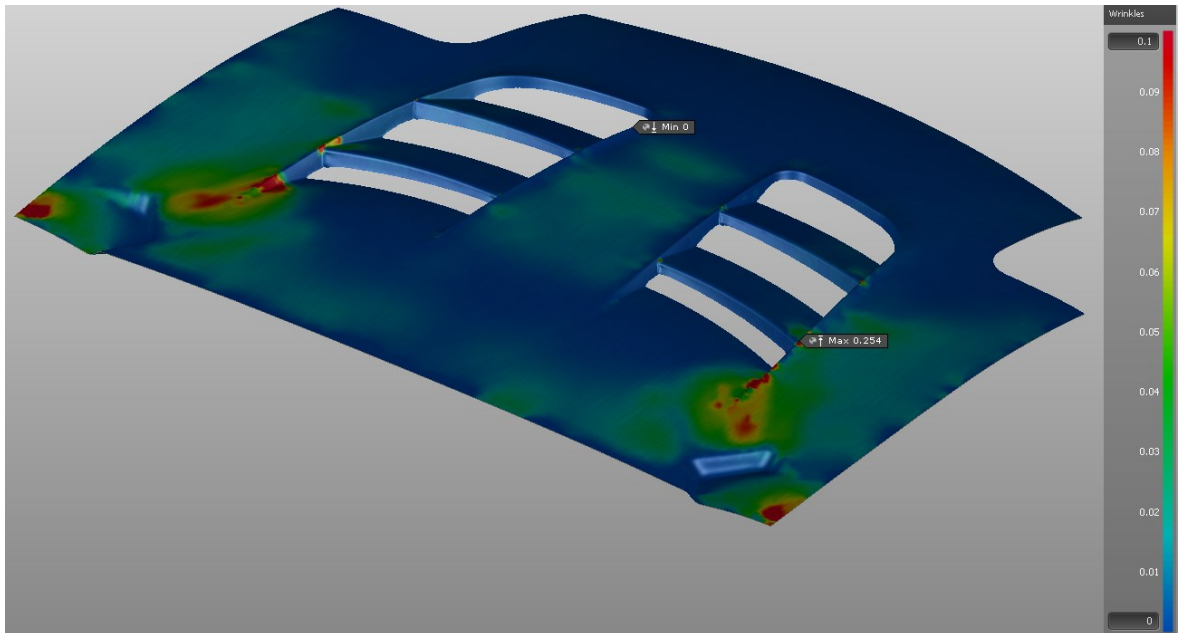
### 9.3 Zvlnění

Zvlnění je způsobeno lokálním napěchováním materiálu. Při tažení materiálu totiž dochází obecně ztenčení v jednom místě a v jiném se zase tloušťka zvětší, čímž je způsobeno zvlnění. Jako kritická hodnota pro rovinné oblasti je 0,3, neboli 30 %.

#### 9.3.1 Materiál 1.4512

##### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

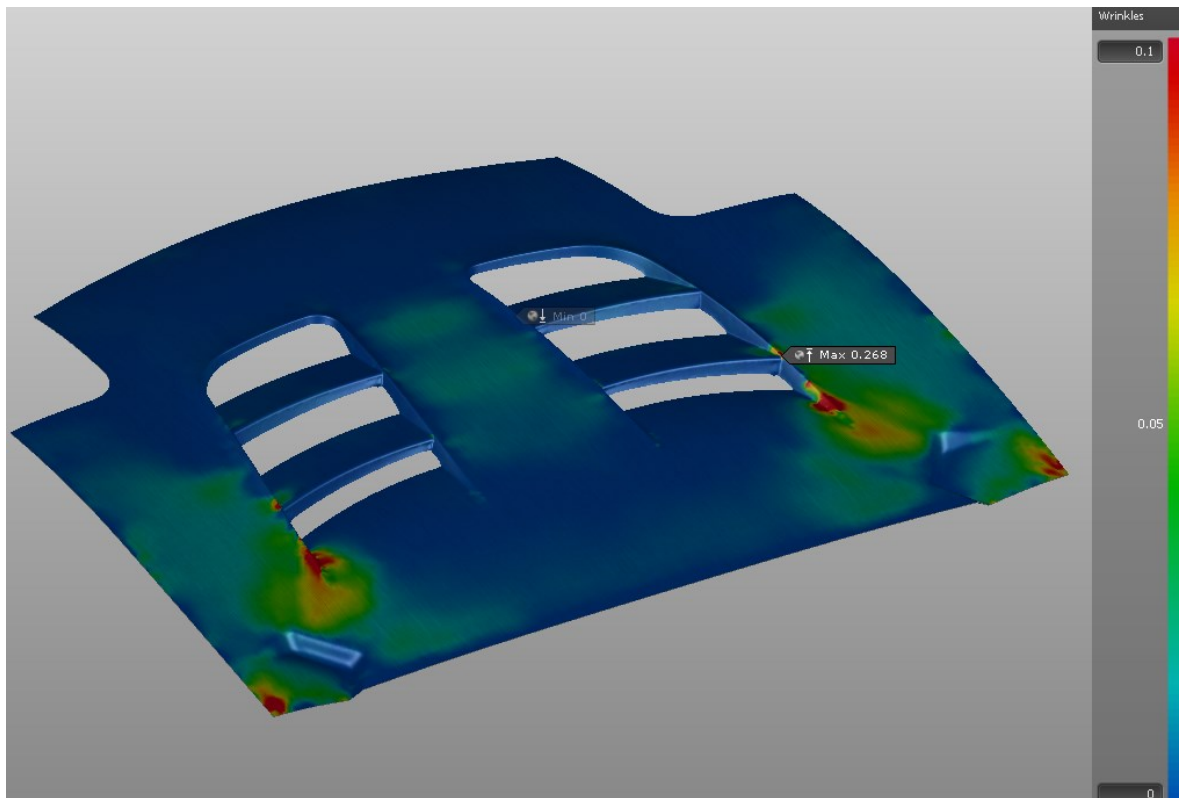
Pro materiál 1.4512 o tloušťce 1,3 mm vyšlo maximální zvlnění 25,4 %, jak lze vidět na Obr. 59. Tímto je podmínka z hlediska zvlnění splněna a materiál při dané tloušťce vyhovuje, protože doporučená maximální hodnota je pod 30 %.



Obr. 59. Výsledky zvlnění pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

##### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

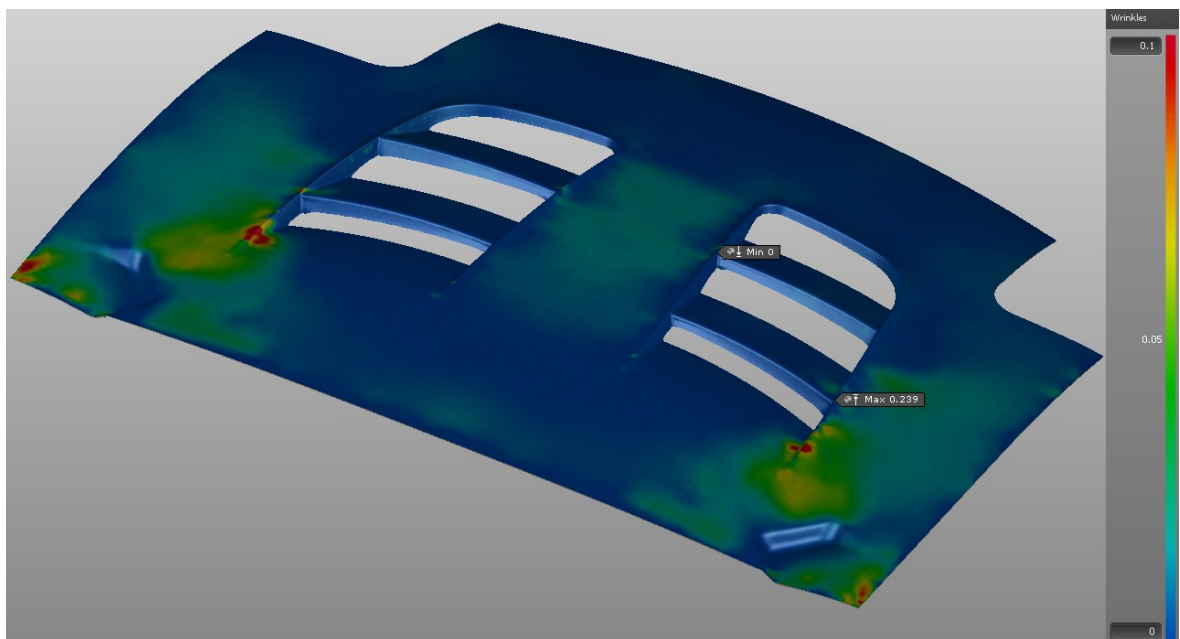
Při tloušťce 1,5 mm pro materiál 1.4512, jak lze vidět na Obr. 60., je maximální hodnota zvlnění 26,8 %, tedy také pod doporučovanou hodnotou 30 % a z hlediska zvlnění vyhovuje.



Obr. 60. Výsledky zvlnění pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

### **Materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm**

I při tloušťce 1,8 mm u materiálu 1.4512 je maximální hodnota zvlnění pod 30 % a to přesně na 23,9 %, tedy také vyhovuje z hlediska zvlnění. Tento výsledek lze vidět na Obr. 61.

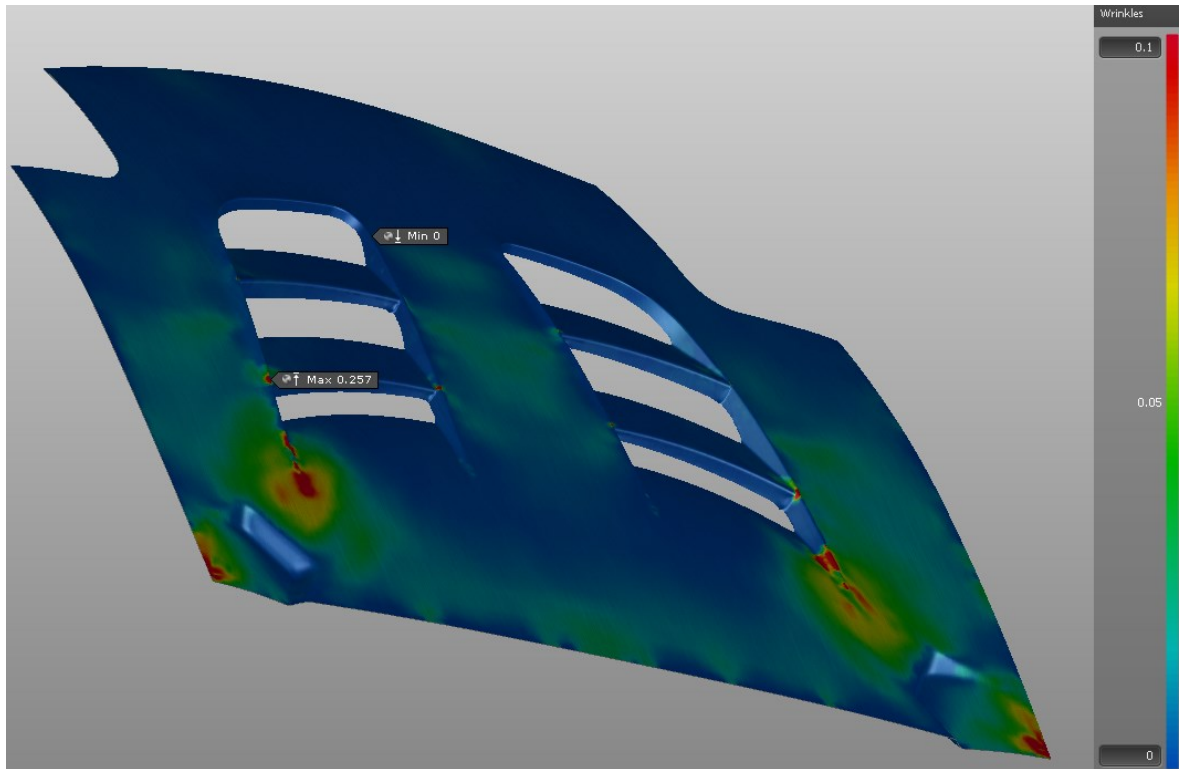


Obr. 61. Výsledky zvlnění pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm

### 9.3.2 Materiál DX56D

#### Materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

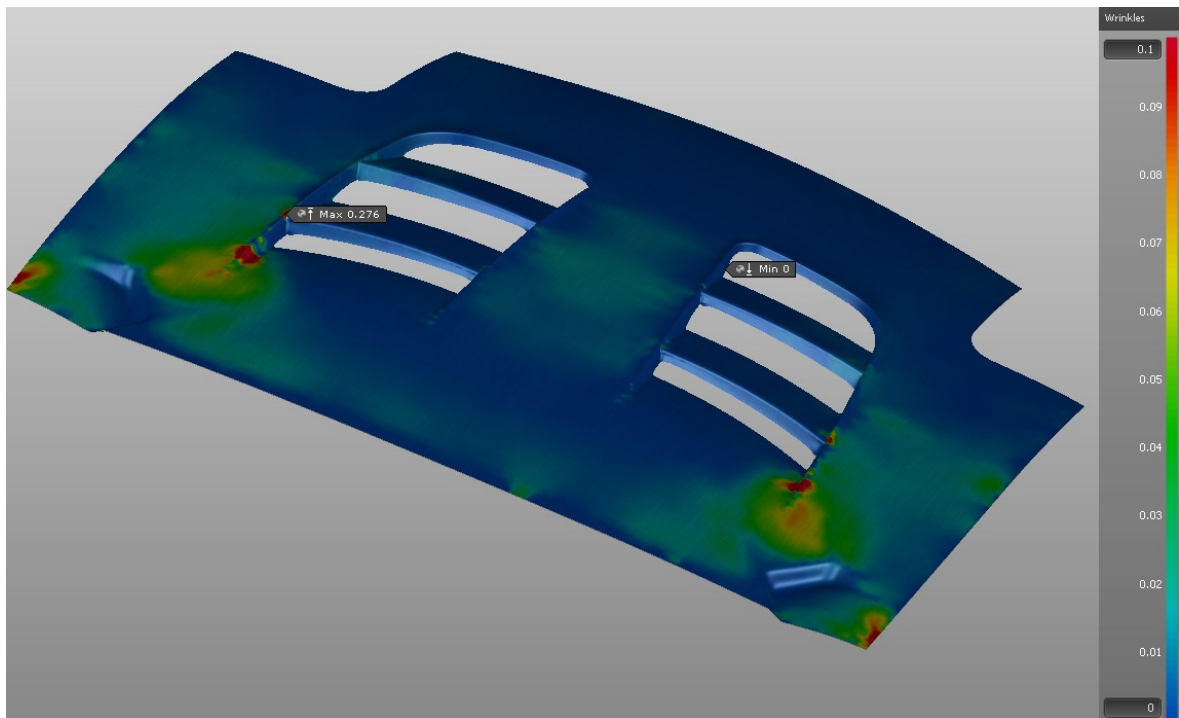
Pro materiál DX56D o tloušťce 1,3 mm, je hodnota zvlnění 25,7 %, čímž se nachází pod požadovanými 30 % a materiál o dané tloušťce z hlediska zvlnění vyhovuje. Oblast kde se největší zvlnění vyskytuje lze vidět na Obr. 62.



Obr. 62. Výsledky zvlnění pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

#### Materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

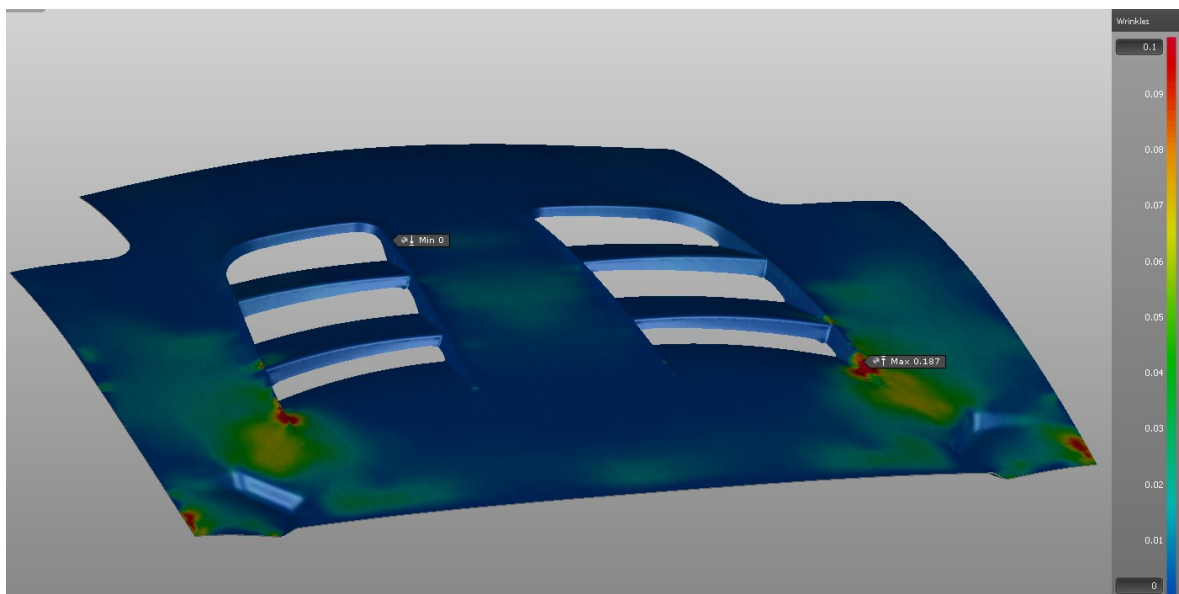
U materiálu DX56D při tloušťce 1,5 mm se dosahuje zvlnění 27,6 %, čímž splňuje hranici pod 30 % a z hlediska zvlnění je podmínka splněna. Výsledky lze vidět na Obr. 63.



Obr. 63. Výsledky zvlnění pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

#### **Materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm**

Na Obr. 64. lze vidět výsledky zvlnění pro materiál DX56D o tloušťce 1,8 mm, kde lze vidět oblast s maximálním zvlněním 18,7 %, kde se výsledek pohybuje pod 30 % a podmínka z hlediska zvlnění je splněna.



Obr. 64. Výsledky zvlnění pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm

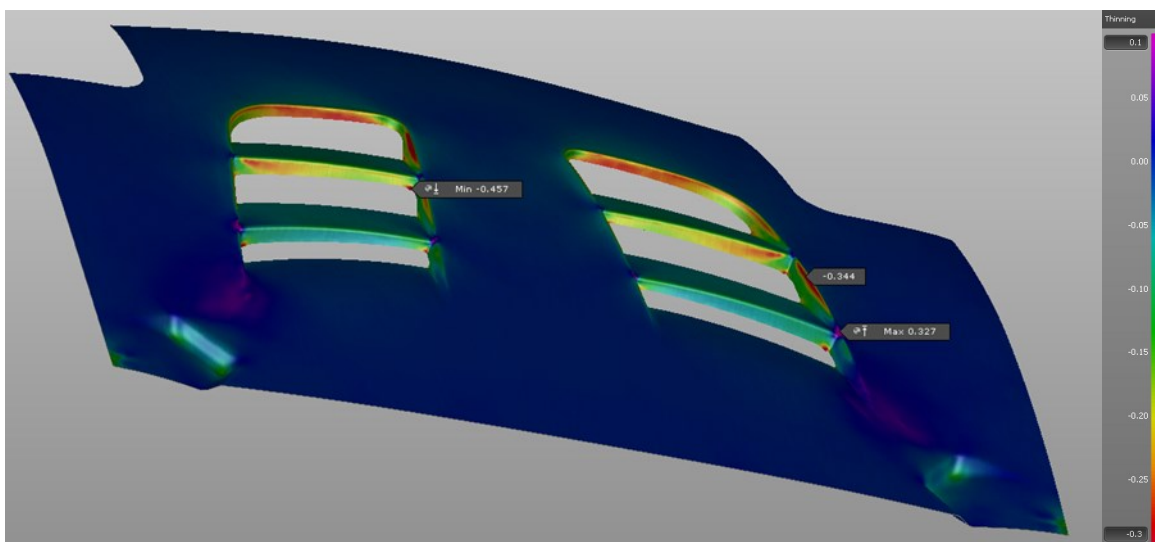
## 9.4 Ztenčení

Z této analýzy je výsledek ztenčení plechu, kde by výsledná hodnota měla být do 20 %, ale jako kritická mez je až 25 %.

### 9.4.1 Materiál 1.4512

#### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

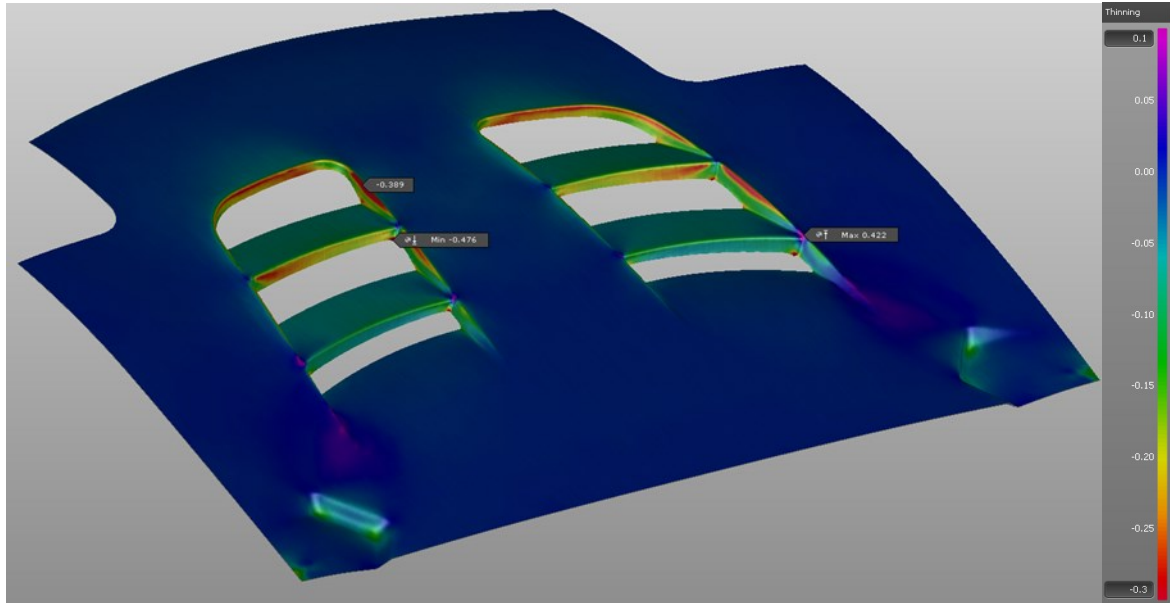
Pro materiál 1.4512 o tloušťce 1,3 mm, lze vidět na Obr. 65. výsledky ztenčení. Maximální hodnota dosahuje 45,7 %, ale opět se to vyskytuje na výstupku z nepřesného ostřížení, který bude následně mechanicky odstraněn. Z obrázku je ale patrné, že červených oblastí se vyskytuje více, které značí oblasti 30 % a více. Přes 30 % jsou také oblasti na druhou opačnou stranu ztenčení. Nejvyšší hodnota byla nalezena 34,4 % a tímto je nesplněna podmínka, kde bylo požadováno maximálně 25 %.



Obr. 65. Výsledky ztenčení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm

#### Materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

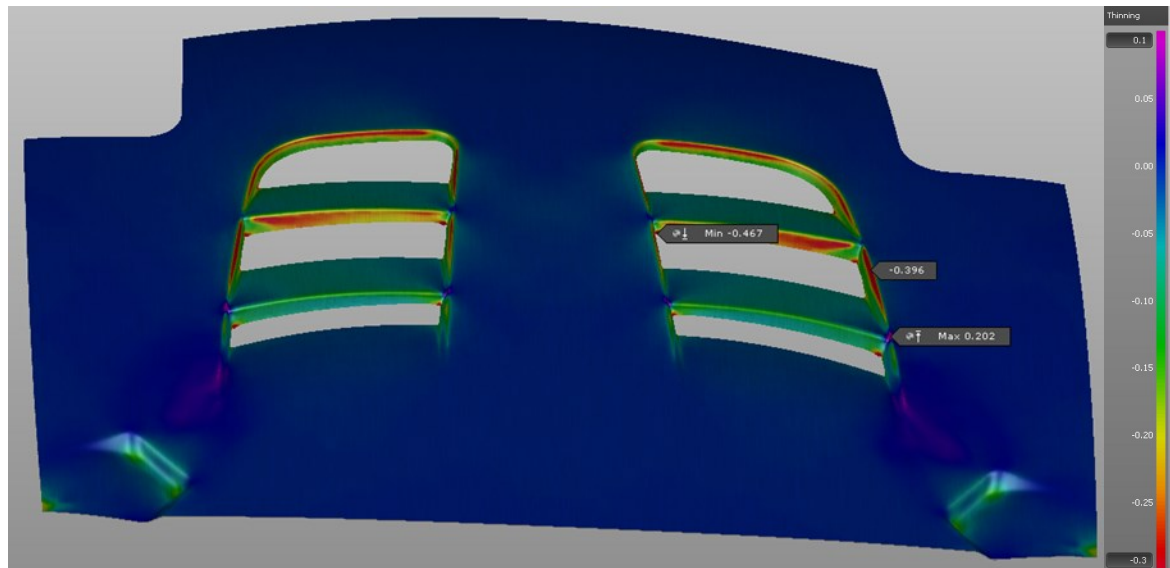
Pro tloušťku 1,5 mm u materiálu 1.4512, je opět nejvyšší hodnota ztenčení 47,6 % na výstupku z nepřesného ostřížení. Tedy po odstranění není důležitá a pro další vyhodnocení se bere nejvyšší nalezená hodnota 42,2 %. Jak lze vidět na Obr. 66., červených oblastí se vyskytuje na výrobku více. V tomto případě není splněna požadovaná hodnota ztenčení do 25 %.



Obr. 66. Výsledky ztenčení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm

### **Materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm**

Jako u předešlých tloušťek u materiálu 1.4512, je nejvyšší hodnota na výstupku, který bude následně odstraněn. Přesto lze vidět na Obr. 67., že i pro tloušťku 1,8 mm se vyskytují červené oblasti a nejvyšší nalezené ztenčení je 39,6 %, tedy nesplnění podmínky do 25 %.



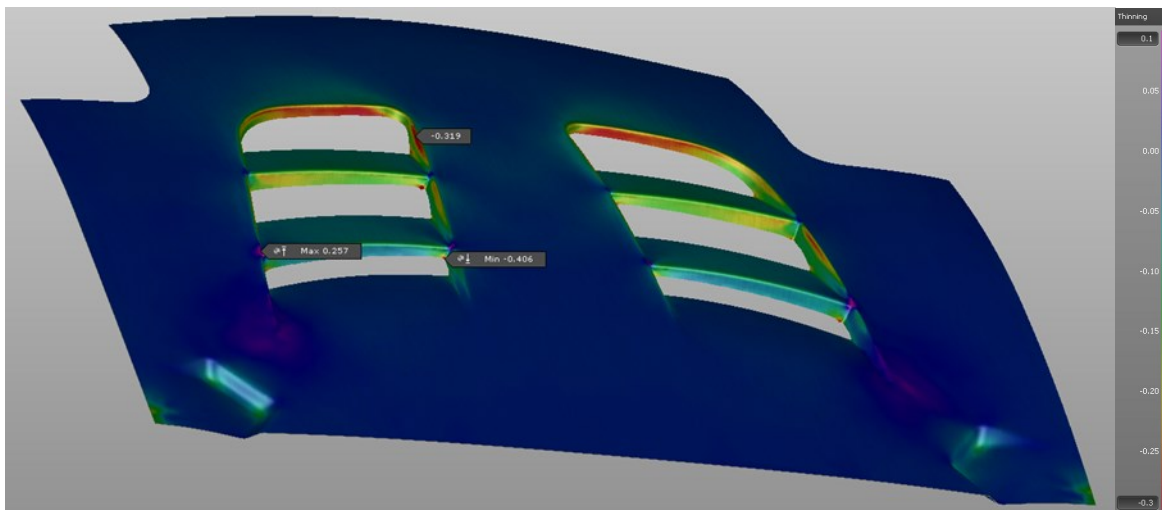
Obr. 67. Výsledky ztenčení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm



## 9.4.2 Materiál DX56D

### Materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

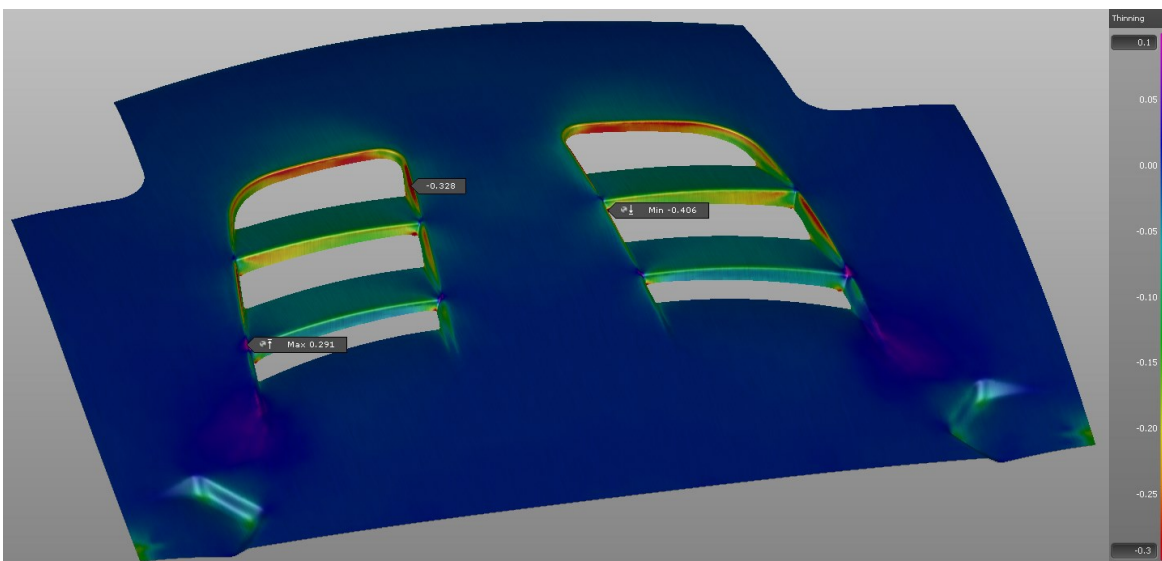
Pro materiál DX56D o tloušťce 1,3 mm, jsou výsledky ztenčení na Obr. 68., kde lze vidět maximální hodnotu 40,6 %, ale opět na výstupku z nepřesného ostřížení. S tím, že tyto výstupky se neberou do další analýzy, tak maximální hodnota je 31,9 % a není splněna podmínka ztenčení do 25 %.



Obr. 68. Výsledky ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm

### Materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

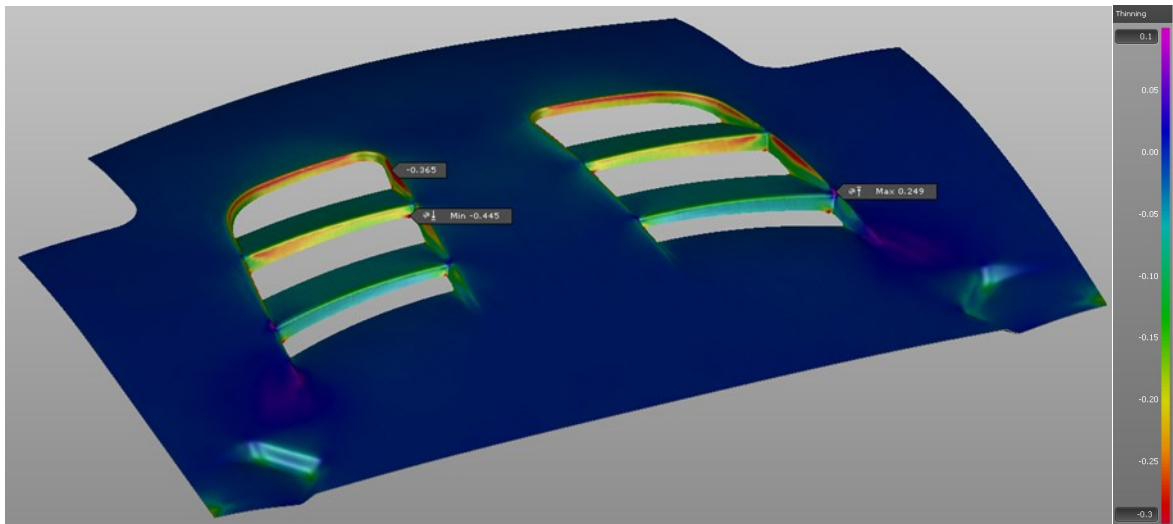
Pro tloušťku 1,5 mm u materiálu DX56D vyšlo maximální ztenčení 40,6 %, ale opět na výstupcích, viz Obr. 69., které se dále do analýzy nezavádějí z výše uvedených důvodů, a proto maximální ztenčení je 32,8 %, které nesplňuje požadavek ztenčení do 25 %.



Obr. 69. Výsledky ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm

**Materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm**

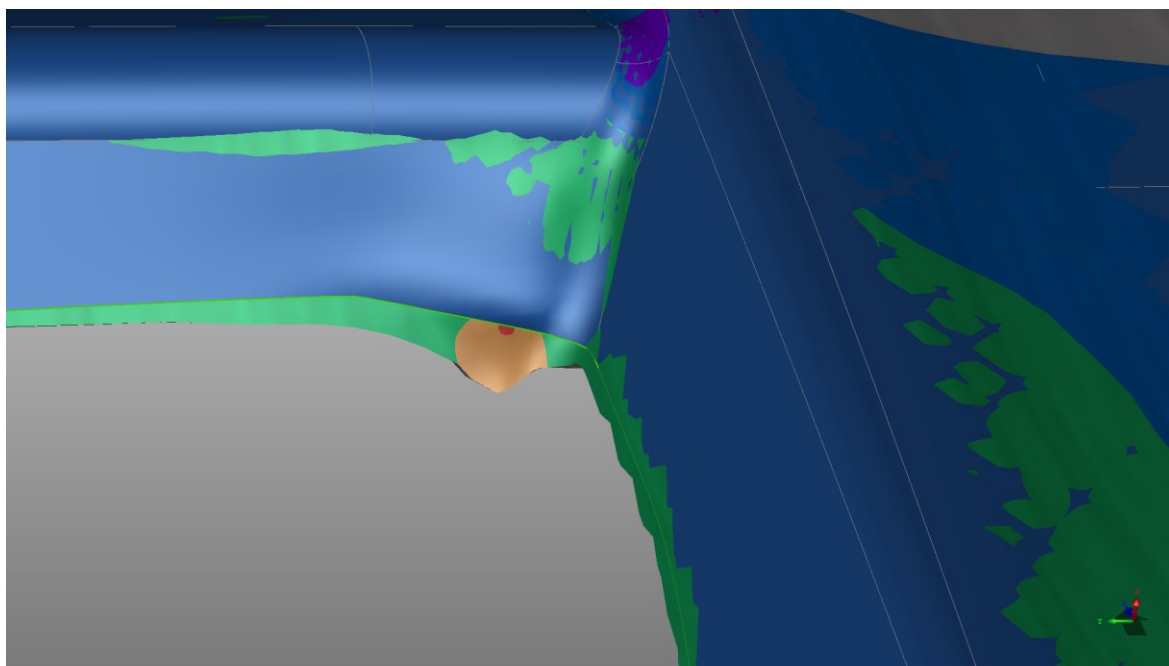
Na Obr. 70. lze vidět výsledek ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm, kde maximální hodnota je 44,5 %, Tato hodnota je jako u ostatních výsledků ztenčení na výstupcích, a proto maximální nalezená hodnota ztenčení je 36,5 %. Opět je nesplněna podmínka požadovaného ztenčení do 25 %.



*Obr. 70. Výsledky ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm*

## 10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro přehledné shrnutí výstupu experimentu jsou výsledky uvedeny v souhrnných tabulkách pro přehlednější porovnání. Výsledky tvářitelnosti patří mezi nejdůležitější prvotní výsledek, protože pomocí nich lze vyhodnotit jaká optimalizace je dále potřeba, či zda je výrobek vůbec vyrobitelný. Výsledky tvářitelnosti pro všechny zkoumané vzorky jsou uvedeny v Tab. 5. Už jen dle procent porušení lze vidět, že materiál 1.4512 je nevhodný, i když na výsledné vizualizaci nedošlo k přetržení materiálu a oblast je pouze kritická. Pro materiál DX56D se sice vyskytuje porušení, ale je menší než 0,01 %, a stejně tak i oblast rizika porušení. Jak již bylo zmiňováno výše, tato oblast leží zejména na výstupku z nepřesného ostřížení, detailněji lze vidět na Obr. 71. Tedy materiál DX56D je vhodnější pro výrobu tohoto dílce dle výsledků porušení.



*Obr. 71. Detail nepřesného ostřížení s oblastí porušení*

Oblast, jejímž cílem je dosáhnout co nejvyšší hodnoty, je bezpečná oblast pro tváření. U obou materiálu lze vidět že s rostoucí tloušťkou klesá procentuální zastoupení této oblasti. Rozdíl pro jednotlivé tloušťky není až tak velký, ale lze si také všimnout, že výsledná oblast se pohybuje kolem 20 % z celého dílce. Tedy není příliš velká, a toto je zapříčiněno velkými rozměry dílce, kde je obtížné dosáhnout plného využití plechu. Čímž je i řečeno, proč oblast nevyužitého materiálu dosahuje skoro poloviny z celého výrobku.

Z hlediska ztenčení mají oba materiály podobné výsledky, ale u DX56D lze vidět, že s rostoucí tloušťkou se dosahuje nižších procent. Zároveň snižováním ztenčení vzniká růst nadměrného ztenčení, který se u materiálu 1.4512 vůbec nevyskytoval.

Poslední znázorněnou oblastí u výsledků tvářitelnosti je zhuštění, kde lze vidět u obou materiálů, že s tloušťkou roste. U DX56D je vidět podobný výsledek tlouštěk 1,3 mm a 1,5 mm, a poté skokový nárůst u tloušťky 1,8 mm.

Tab. 5. Výsledky tvářitelnosti

Tloušťka	Bezpečná oblast	Oblast nevyužitého materiálu	Ztenčení	Nadměrné ztenčení	Zhuštění	Riziko porušení	Porušení
1.4512							
1,3	18,48 %	45,32 %	19,12 %	0,00 %	16,08 %	0,69 %	0,31 %
1,5	17,51 %	42,31 %	18,73 %	0,00 %	20,54 %	0,63 %	0,28 %
1,8	15,89 %	40,42 %	20,09 %	0,00 %	22,81 %	0,53 %	0,26 %
DX56D							
1,3	20,76 %	46,90 %	20,13 %	0,02 %	12,19 %	<0,01 %	<0,01 %
1,5	20,09 %	49,80 %	17,56 %	0,07 %	12,48 %	<0,01 %	<0,01 %
1,8	19,02 %	45,14 %	14,30 %	0,15 %	21,37 %	<0,01 %	<0,01 %

V Tab. 6. jsou shrnuty výsledky z analýzy porušení, kde lze říci, že materiál 1.4512 je nevhodný, protože vychází více než 100 %. Tím pádem analýza říká, že dojde k porušení materiálu a výrobek by měl být nevyrobitelný. Nad 100 % je i výsledek pro materiál DX56D u tloušťky 1,8 mm. U výsledků pro materiál DX56D lze vidět, že porušení roste s rostoucí tloušťkou dílce. Doporučovanou hodnotou porušení je 80 %. Tato hodnota je stanovena proto, aby při případné nutné optimalizaci při výrobě na stroji, kde může dojít k mírnému zvýšení tohoto rizika, byla vytvořena rezerva, a to zbývajících 20 %. Tedy lze říci, že materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm dosahující 85,4 % rizika porušení je přijatelný a dle výsledku je výrobek vyrobitelný. I pro tloušťku 1,5 mm u materiálu DX56D je výrobek vyrobitelný, ale s menší možností dodatečné optimalizace při výrobě.

Tab. 6. Výsledky porušení

Tloušťka	1.4512	DX56D
1,3	179,9 %	85,4 %
1,5	160,5 %	90,2 %
1,8	168,6 %	103,9 %

Pro zvlnění byla doporučena hodnota stanovena do 30 %. Z Tab. 7. lze vidět že tento požadavek byl splněn. Také jde vidět, že zde neplatí přímá lineární závislost na tloušťce materiálu. Je spíše jedna tloušťka, kde vychází zvlnění nejhůře a potom oběma směry, jak

zvyšování, tak i snižování tloušťky snižuje riziko zvlnění. V tomto případě nejhůře vyšla tloušťka 1,5 mm a nejlépe tloušťka 1,8 mm. Kde lépe vychází materiál DX56D s hodnotou 18,7 %. U tloušťky 1,3 mm a 1,5 mm jsou výsledky podobné a mírně lepší má 1.4512.

Tab. 7. Výsledky zvlnění

Tloušťka	1.4512	DX56D
1,3	25,4 %	25,7 %
1,5	26,8 %	27,6 %
1,8	23,9 %	18,7 %

U ztenčení je doporučená hodnota 25 % a dle Tab. 8. můžeme vidět, že požadavek nesplňuje ani jeden výsledek. Podle materiálu DX56D, který dosahuje obecně lepších výsledků pro tento díl, lze říci, že s tloušťkou roste procentuální ztenčení. Nejlépe vyšel materiál DX56D o tloušťce 1,3 mm s 31,9 %. Pouze o skoro celé procento vychází tloušťka 1,5 mm, tedy velmi podobně, ale s další zvyšující tloušťkou se zvyšuje i nárůst ztenčení.

Tab. 8. Výsledky ztenčení

Tloušťka	1.4512	DX56D
1,3	34,4 %	31,9 %
1,5	42,2 %	32,8 %
1,8	39,6 %	36,5 %

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá optimalizací dílu automobilové karoserie, přesněji kapotou z automobilu Mazda RX7. Při prvotním dílci byly provedeny simulace pro tři různé materiály, a to pro nerezovou ocel 1.4512, vysokopevnostní ocel (AHSS) HCT780T a pro ocel pro tváření za studena DX56D. Z prvotních analýz byla určena optimalizace dílce a procesu výroby v programu Autoform R8.

Jako optimalizace byla potřeba snížit hloubka hran okolo děr a zrušení jejich podkosení, a to z důvodu vyhnutí se praskání při ohybu plechu. Dále byla stanovena optimální verze programu výroby dílce, při kterém se získaly možné nejlepší výsledky a vyrobitelnost dílce. Z původních třech materiálů se pro další analýzy už vybraly pouze dva, a to 1.4512 a DX56D. Tyto materiály byly vybrány z hlediska menšího porušení oproti materiálu HCT780T, kde praskaly i jiné oblasti než u těchto dvou.

Po optimalizování dílce a provedení simulace se dosáhlo u obou materiálů vyrobitelného dílce, který sice vykazuje riziko porušení, ale už nebyly na výsledku znázorněny praskliny. Pro vyhodnocení se použily výsledky z analýz tvářitelnosti, porušení, zvlnění a ztenčení. Simulace byly provedeny u každého materiálu pro tři tloušťky a to 1,3 mm, 1,5 mm a 1,8 mm. Tyto výsledky poté byly vyhodnoceny a lze vidět, jak z velikosti porušení, tak i z ostatních parametrů, že nejvhodnější materiál je DX56D.

Jako nejvhodnější je tedy materiál DX56D o tloušťkách 1,3 mm a 1,5 mm. U ostatních simulací je výsledek porušení přes 100 %, tedy výsledek nám říká, že dojde k porušení. Tyto dva možné výsledky jsou oba použitelné, ale menšího porušení dosahuje simulace s výtažkem o tloušťce 1,3 mm.

Z diplomové práce lze vidět, že provedení simulace a její výsledky nám ukazují rizika výrobku a pomáhají ho optimalizovat, jak z hlediska nastavení programu tváření, materiálu, tloušťky, tak i dle vstupního geometrického požadavku na výrobek. Toto vše je zjištěno pomocí výpočtu a není potřeba dělat zkoušky, kde může dojít k výrobě několika nepovedených výrobků. Také se pomocí simulací dosáhne lepšího využití materiálu. Lze tedy vidět, že simulace tváření šetří čas i peníze a proč je využívání těchto simulací na vzestupu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] 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, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 9788021447479.
- [2] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1
- [3] Killich. *Chemické složení materiálu* [online]. Killich ©2021 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.killich.cz/stranky/technicke-info/ocelovy-spojovaci-material/chemicke-slozeni-materialu>
- [4] SUEHIRO, Masayoshi, Jun MAKI, Kazuhisa KUSUMI, Masahiro OHGAMI a Toshihiro MIYAKOSHI. *Properties of Aluminized Steels for Hot-Forming*. SAE International. 2003, 267-272. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi: 10.4271/2003-01-2853
- [5] GUPTA, Amit Kumar a D. RAVI KUMAR. *Formability of galvanized interstitial-free steel sheets*. Journal of Materials Processing Technology. 2006, **172**(2), 225-237. ISSN 09240136. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.10.016
- [6] DVOŘÁK, Milan a Markéta ZIMOLOVÁ. *Vliv morfologie povrchu plechu na kvalitu tvářeného dílce*. METAL. 2005, 1-6.
- [7] CHOTĚBRSKÝ, Rostislav A MULLER, Miroslav. *Stárnutí konstrukčních materiálů* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2006 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu.html>
- [8] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 1. díl, Nauka o materiálu. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 9788086960265.
- [9] LENFELD, Petr. *Technologie II, 1. část, (Tváření kovů)*. Technická univerzita Liberec, 2005, 110 s. ISBN 80-7372-020-5
- [10] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy technologie I. 2., přeprac.* vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 159 s. ISBN 978-80-01-04867-2.
- [11] ŘASA, Jaroslav, Václav HANĚK a Jindřich KAFKA. *Strojírenská technologie: Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel: zásady montáže*. 4.. Praha: Scientia, 2003, 505 s. ISBN 8071832847.

- [12] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Ladislav ŽÁK. *Technologie tváření: návody do cvičení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 103 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021428813.
- [13] BOTHE, Otakar. *Strojírenská technologie II: pro strojírenské učební obory*. 6., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 1999, 163 s. ISBN 80-859-2058-1.
- [14] YOSHIMURA, Hyoji a Katsuhisa TANAKA. *Precision forging of aluminum and steel*. Journal of Materials Processing Technology. 2000, **98**(2), 196-204. ISSN 09240136. Dostupné z: doi: 10.1016/S0924-0136(99)00199-5
- [15] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 2*. 1. díl, Polotovary a jejich technologičnost. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001, 316 s. ISBN 8071832448.
- [16] BANABIC, Dorel. *Sheet metal forming processes: constructive modelling and numerical simulation*. Berlin: Springer, 2010, xiii, 301 s. ISBN 978-3-540-88112-4.
- [17] DUFLOU, Joost R., József VÁNCZA a Richard AERENS. *Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art*. Computers in Industry. 2005, **56**(7), 747-771. ISSN 01663615. Dostupné z: doi: 10.1016/j.compind.2005.04.001
- [18] WANG, Darren, ed. *Handbook of metal forming process*. New York: NY research press, 2015, vi, 212 s. ISBN 978-1-63238-253-5.
- [19] COLGAN, Mark a John MONAGHAN. *Deep drawing process: analysis and experiment*. Journal of Materials Processing Technology. 2003, **132**(1-3), 35-41. ISSN 09240136. Dostupné z: doi: 10.1016/S0924-0136(02)00253-4
- [20] BARABASH, A. V., E. Yu. GAVRIL'CHENKO, E. P. GRIBKOV a O. E. MARKOV. *Straightening of sheet with correction of waviness*. Steel in Translation. 2014, **44**(12), 916-920. ISSN 0967-0912. Dostupné z: doi: 10.3103/S096709121412002X
- [21] DVOŘÁK, M., A KOLEKTIV. *Technologie II*, nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001, 238 s. ISBN 80-214-2032-4
- [22] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvařitelnost kovových materiálů*. 3. upravená verze 1/2007. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007, 211 s.
- [23] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.



- [24] PTÁČEK, Luděk, a kol. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [25] AKROUT, M., BEN AMAR, M., CHAKER, C. a DAMMAK, F., *Numerical and experimental study of the Erichsen test for metal stamping*, Advances in Production Engineering & Management 3: 81-92, 2008.
- [26] SOBOTKA, Jiří, Pavel SOLFRONK, Michaela KOLNEROVÁ a Lukáš ZUZÁNEK. *Utilization of the contact-less optical system for the bore expansion test*. METAL. 2013, 6.
- [27] PANICH, Sansot, Nopparat SEEMUANG a Taratip CHAIMONGKON. *Formability Analysis of Fukui Stretch-Drawing and Square Cup Drawing Using Strain and Stress Based Forming Limit Curves*. Key Engineering Materials. 2017, **751**, 167-172. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.751.167
- [28] BUDIANSKY, B. a N.M. WANG. On the Swift cup test. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1966, **14**(6), 357-374. ISSN 00225096. Dostupné z: doi:10.1016/0022-5096(66)90010-X
- [29] KIL, Tae-Dong, Jin-Mo LEE a Young-Hoon MOON. *Quantitative formability estimation of ring rolling process by using deformation processing map*. Journal of Materials Processing Technology. 2015, **220**, 224-230. ISSN 09240136. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.01.006
- [30] *Simulace hlubokého tažení plechů* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2002 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-hlubokeho-tazeni-plechu>
- [31] PETRMICHL, Rudolf. *Počítačová simulace tváření plechů* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2001 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu>
- [32] FABÍK, Richard a Jiří KLIBER. *Možnosti využití počítačových programů MKP ve tváření kovů*. METAL. 2002, 1-8.
- [33] FRODLOVÁ Barbora, Radek ČADA a Jakub MACHÁLEK. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru DYNIFORM*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Studijní opora, Ostrava 2012, 133 s. ISBN 978-80-248-2714-8.

- [34] MACHÁLEK, Jakub, Radek ČADA a Barbora FRODLOVÁ. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM-STAMP 2G*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Učební text předmětu „Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody ve tváření“, Ostrava 2012, 120 s. ISBN 978-80-248-2715-5.
- [35] GANTAR, Gašper, Tomaž PEPELNJAK a Karl KUZMAN. *Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations*. Journal of Materials Processing Technology. 2002, **130-131**, 54-59. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(02)00786-0
- [36] *1.4512 Sheet* [online]. Aalco, © 2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: [https://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-14512-Sheet\\_313.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-14512-Sheet_313.ashx)
- [37] *Advanced High-Strength Steel (AHSS) Definitions* [online]. WorldAutoSteel, © 2020 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/>
- [38] *Steel-Material: HCT780T (DIN/EN)* [online]. Pauly Stahlhandel, Ralph Pauly e.K., © 2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://steelshop.net/steel-materials/others/din-en/hct780t>
- [39] *Metal coated formable steels, EN10346:2015* [online]. SSAB., © 2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/steel-categories/metal-coated-steels/steelselector/metal-coated-formable-steels>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

aj.	a jiné
Be	beryllium
C	uhlík
cca	cirka
Cu	měď
Cr	chrom
$\varepsilon$	relativní prodloužení
F	síla
L	délka
Mg	hořčík
Mn	mangan
např.	například
Ni	nikl
Nb	niob
P	fosfor
PE	polyethylen
PVC	polyvinylchlorid
PVF	polyvinylflourid
Ra	střední aritmetická odchylka profilu
Si	Křemík
$\sigma$	napětí
V	vanad
Zr	zirkonium

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Diagram tahové zkoušky [8]</i> .....	17
<i>Obr. 2. Princip stříhání [15]</i> .....	22
<i>Obr. 3. Posunutí neutrální osy v místě ohybu [11]</i> .....	23
<i>Obr. 4. Odpružení materiálu při ohybu [15]</i> .....	24
<i>Obr. 5. Konstrukční úpravy čelistí ohýbadel [9]</i> .....	25
<i>Obr. 6. Způsoby tažení [9]</i> .....	26
<i>Obr. 7. Tlakové rovnání pomocí rovných desek [9]</i> .....	28
<i>Obr. 8. Válcová sestava [1]</i> .....	28
<i>Obr. 9. Bodové a bradavkové rovnání [9]</i> .....	28
<i>Obr. 10. Příklady vad výtažků [1]</i> .....	29
<i>Obr. 11. Schéma zkoušky dle Erichsena a tvar trhliny pro hodnocení [1]</i> .....	32
<i>Obr. 12. Princip zkoušky dle Siebela a Pompa [1]</i> .....	32
<i>Obr. 13. Princip zkoušky podle Fukuiho [1]</i> .....	33
<i>Obr. 14. Princip kalíškovací zkoušky [1]</i> .....	34
<i>Obr. 15. Princip zkoušky lámavosti [8]</i> .....	35
<i>Obr. 16. Princip zkoušky dvojitým ohybem [1]</i> .....	35
<i>Obr. 17. Princip zkoušky střídavým ohybem [8]</i> .....	36
<i>Obr. 18. Vyhodnocení plechů k tažení dle Lileta [1]</i> .....	37
<i>Obr. 19. Příklad výsledku lisovatelnosti v programu AutoForm</i> .....	41
<i>Obr. 20. Příklad výsledku ztenčení v programu AutoForm</i> .....	42
<i>Obr. 21. Příklad výsledku zvlnění v programu AutoForm</i> .....	43
<i>Obr. 22. Příklad výsledku porušení v programu AutoForm</i> .....	44
<i>Obr. 23. 3D model výrobku</i> .....	47
<i>Obr. 24. Materiálový list 1.4512</i> .....	48
<i>Obr. 25. Materiálový list HCT780T</i> .....	49
<i>Obr. 26. Materiálový list DX56D</i> .....	50
<i>Obr. 27. Technický list stroje PressLine2200T</i> .....	51
<i>Obr. 28. FEM síť</i> .....	52
<i>Obr. 29. Určení směru lisování a využití symetrie</i> .....	52
<i>Obr. 30. Vycentrování orientace vůči lisování</i> .....	53
<i>Obr. 31. Analýza tváritelnosti při nastavení dílu</i> .....	54
<i>Obr. 32. Plán kroků tváření</i> .....	54
<i>Obr. 33. Modifikování tažníku</i> .....	55
<i>Obr. 34. Nastavení přidržovače</i> .....	55

<i>Obr. 35. Tvar těla tažníku a nastavení přechodu .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 36. Analýza tváritelnosti při generaci ploch nástroje .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 37. Tvar plechu .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 38. Nastavení brzdy .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 39. Nastavení mazání .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 40. Nastavení simulace .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 41. Výsledek simulace pro materiál HCT780T při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 42. Výsledek simulace pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 43. Výsledek simulace pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 44. Znázornění oblastí k optimalizaci .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 45. Optimalizovaný dílec .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 46. Nepřesné ostřížení děr .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 47. Výsledky tváritelnosti pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 48. Výsledky tváritelnosti pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 49. Výsledky tváritelnosti pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 50. Výsledky tváritelnosti pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 51. Výsledky tváritelnosti pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 52. Výsledky tváritelnosti pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 53. Výsledky porušení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 54. Výsledky porušení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 55. Výsledky porušení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 56. Výsledky porušení pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 57. Výsledky porušení pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 58. Výsledky porušení pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 59. Výsledky zvlnění pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 60. Výsledky zvlnění pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 61. Výsledky zvlnění pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 62. Výsledky zvlnění pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 63. Výsledky zvlnění pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 64. Výsledky zvlnění pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 65. Výsledky ztenčení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 66. Výsledky ztenčení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 67. Výsledky ztenčení pro materiál 1.4512 při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 68. Výsledky ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,3 mm .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 69. Výsledky ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,5 mm .....</i>	<i>81</i>

---

<i>Obr. 70. Výsledky ztenčení pro materiál DX56D při tloušťce 1,8 mm .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 71. Detail nepřesného ostřížení s oblastí porušení .....</i>	<i>83</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Rozměry zařízení pro zkoušku se střídavým ohybem dle ČSN ISO 7799 [1].....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2. Chemické složení materiálu 1.4512 [36].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 3. Chemické složení materiálu HCT780T [38].....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 4. Chemické složení materiálu DX56D [39].....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 5. Výsledky tváritelnosti.....</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 6. Výsledky porušení.....</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 7. Výsledky zvlnění.....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 8. Výsledky ztenčení.....</i>	<i>85</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: DVD disk obsahující

- Diplomovou práci (.pdf)
- Simulace pro materiál 1.512

Příloha P II: DVD disk obsahující

- Simulace pro materiál DX56D