

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Bc. Jan
Havelka**

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havelka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459870**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Integrace numerických simulací tváření do virtuálního procesu lisování a lemování plechu

Název diplomové práce anglicky:

Integration of numerical simulations of forming into the virtual process of sheet metal forming and mechanical joining

Pokyny pro vypracování:

Předmětem práce je simulace tváření vybraných panelových dílů a jejich spojování do podsestavy pomocí technologie lemování.

- 1) Seznámení s problematikou
- 2) Numerická simulace vybraných dílů
- 3) Numerická simulace spojování
- 4) Závěr

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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


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

Ing. Michal Valeš, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


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


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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, pod odborným dohledem Ing. Františka Tatíčka, Ph.D. K vypracování jsem použil materiály, jenž jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

V Praze dne 17. 7. 2020

.....

Jan Havelka

Poděkování:

Touto cestou bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu práce Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za jeho cenné rady, podporu a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Valešovi za poskytnutí odborných konzultací ohledně dané problematiky. Poděkování náleží i společnosti ŠKODA AUTO a.s. za poskytnutí prostředků pro experimentální část této práce. Na závěr bych chtěl poděkovat i zaměstnancům oddělení PSW-P a PSW-V za užitečné rady a věcné připomínky.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Název bakalářské práce:	Integrace numerických simulací tváření do virtuálního procesu lisování a lemování plechů
Akademický rok:	2019/2020
Autor:	Bc. Jan Havelka
Vedoucí práce:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Konzultant	Ing. Michal Valeš

Abstrakt:

Diplomová práce „Integrace numerických simulací tváření do virtuálního procesu lisování a lemování plechů“ poskytuje náhled do problematiky výroby tenkých plechových komponent automobilové karosérie. V rámci teoretické části jsou popsány základní tvářecí procesy, podmínky plasticity kovových materiálů či postup určení a vyhodnocení tvářitelnosti materiálu. Práce rovněž popisuje základní postup výroby výlisku z hlubokotažných ocelí a i jejich příslušné materiálové vlastnosti. Experimentální část zkoumá využití numerických simulací pro vizualizaci výrobního procesu jednotlivých plechových dílů a jejich následného spojení. Numerické simulace lisování zkoumají vliv koeficientu tření na výslednou kvalitu výlisku a vliv odpružení jednotlivých komponent na spojení a zalemování sestavy 5. dveří ŠKODA OCTAVIA IV. generace.

Klíčová slova: lisování, lemování, hluboké tažení, tvářitelnost, odpružení, automobilový průmysl, numerická simulace

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	86
Počet obrázků:	90
Počet tabulek:	5

Annotation

University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Title of work:	Integration of numerical simulations of forming into the virtual process of metal sheet stamping and hemming
Academic year:	2019/2020
Author:	Bc. Jan Havelka
Supervisor:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Consultant:	Ing. Michal Valeš

Abstract:

Diploma thesis „Integration of numerical simulations of forming into the virtual process of metal sheet stamping and hemming“ grants an insight into the problematic surrounding the manufacturing of thin metal sheet components of the car body. The theoretical part of this thesis describes the fundamentals of forging processes, the yield criterion of steel materials and the methodical procedure of determining and evaluating material formability. The thesis also describes the basic procedure of manufacturing stamped parts from deep-drawable steels and their respective material properties. The experimental part examines the utilization of numerical simulations for the purpose of visualising the manufacturing process of individual stamped parts and their subsequent connecting. Numerical simulations of stamping are primarily focused on the influence of the friction coefficient on the final quality of stamped parts and the influence of springback of individual parts on the process of connecting and hemming the boot lid of the 4th generation ŠKODA OCTAVIA.

Keywords: stamping, hemming, deep drawing, formability, springback, automotive industry, numerical simulation

Volume of work:

Number of pages: 86

Number of pictures: 90

Number of tables: 5

Obsah

Seznam použitých symbolů dle kapitol	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Tváření za studena	12
2.2 Tváření za poloohřevu	13
2.3 Tváření za tepla	13
2.4 Tváření objemové.....	14
2.4.1 Válcování	14
2.5 Tváření plošné	15
2.5.1 Stříhání	15
2.5.2 Ohýbání	17
2.5.3 Odpružení	17
2.5.4 Hluboké tažení.....	18
2.6 Mechanismus plastické deformace.....	20
2.6.1 Napětí	20
2.6.2 Deformace	21
2.7 Hypotézy plasticity	23
2.7.1 Podmínka plasticity dle Trescy	23
2.7.2 Podmínka plasticity dle von Misesa	23
2.8 Tvářitelnost, Křivka mezních přetvoření (FLC)	24
2.8.1 Zkouška dle Nakajimy.....	25
2.8.2 Zkouška dle Marciniaka.....	26
2.8.3 Zkouška Fukui	26
2.8.4 Hydraulická zkouška vyboulením	27
2.8.5 Earing test.....	27
2.9 Zkouška tahem, Základní mechanické vlastnosti	28
2.10 Deformační zpevnění – exponent deformačního zpevnění n	30
2.11 Součinitel plastické anizotropie r_m , Součinitel plošné anizotropie Δr	31
3 Princip výroby výlisku	32
3.1 Lisování.....	32
3.2 Modelování tvářecích procesů – numerická simulace	33
3.3 Oceli pro hluboké tažení	34
4 Experimentální část.....	36
4.1 Sestava pátých dveří SK382 – dělení.....	36

4.2	Rámcový výrobní postup	37
4.3	Návrh experimentu	38
4.3.1	Vyhodnocení lisovatelnosti	38
4.3.2	Analýza odpružení plechového dílu (Springback)	39
4.3.3	Nastavení brzdných lišt	40
4.3.4	Koeficient tření	40
4.4	Horní díl vnější 5E7.827.105 – Simulace lisovacího procesu	41
4.4.1	Horní díl vnější 5E7.827.105 – Základní parametry	41
4.4.2	Horní díl vnější 5E7.827.105 – Výrobní postup	42
4.4.3	Horní díl vnější 5E7.827.105 – Vyhodnocení simulace – Varianta 1	45
4.4.4	Horní díl vnější 5E7.827.105 – Vyhodnocení simulace – Varianta 2	47
4.4.5	Horní díl vnější 5E7.827.105 – Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku	53
4.5	Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Simulace lisovacího procesu	56
4.5.1	Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Základní parametry	56
4.5.2	Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Výrobní postup	57
4.5.3	Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Vyhodnocení simulace dle návrhu Varianty 1 a 2	58
4.5.4	Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku	63
4.6	Díl vnitřní 5E7.827.159 – Simulace lisovacího procesu	65
4.6.1	Díl vnitřní 5E7.827.159 – Základní parametry	65
4.6.2	Díl vnitřní 5E7.827.159 – Výrobní postup	66
4.6.3	Díl vnitřní 5E7.827.159 – Vyhodnocení simulace dle návrhu varianty 1 a 2	69
4.6.4	Díl vnitřní 5E7.827.159 – Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku	74
4.7	Sestava 5. dveří - Simulace lemování	77
4.7.1	Sestava 5. dveří - Simulace lemování - Vyhodnocení	78
5	Závěr	81
	Citovaná literatura	82
	Seznam Obrázků	84
	Seznam tabulek	86

Seznam použitých symbolů dle kapitol

2.4 Tváření objemové

r – Redukce [–]

t_0 – Počáteční tloušťka materiálu [mm]

t_f – Finální tloušťka materiálu [mm]

τ_s – Pevnost materiálu ve smyku [N/mm^2]

S – Střížná plocha [mm^2]

2.5 Tváření plošné

m – Mezní součinitel tažení [–]

D – Průměr přístřihu [mm]

d – Průměr výtazku [mm]

F – Tažná síla [N]

D_p – Průměr tažníku [mm]

D_b – Průměr přístřihu [mm]

t – Původní tloušťka přístřihu [mm]

TS – Mez pevnosti v tahu [MPa]

Y – Mez kluzu [MPa]

R_d – Poloměr zaoblení rohu zápustky [mm]

2.6 Mechanismus plastické deformace, 2.7 Hypotézy plasticity

σ – Napětí [MPa]

F – Síla [N]

A – Plocha [mm^2]

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – Složky normálových napětí

$\sigma_{yx}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy}, \sigma_{zy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ – Složky smykových napětí

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – Složky hlavních napětí

I_1, I_2, I_3 – Invarianty tenzoru napětí

$\Delta l, \Delta w, \Delta h$ – Absolutní deformace [mm]

$\varepsilon_l, \varepsilon_w, \varepsilon_h$ – Poměrné deformace [–]

$\varphi_l, \varphi_w, \varphi_h$ – Skutečné logaritmické deformace [–]

k – Kritická hodnota napětí

2.9 Zkouška tahem, Základní mechanické vlastnosti

k – Koeficient proporcionality

L_0 – Měřená délka nezdeformovaného tělesa [mm]

S_0 – Plocha průřezu nezdeformovaného vzorku [mm²]

σ – Napětí [MPa]

E – Youngův modul pružnosti [MPa]

ε – Deformace [–]

F_m – Síla na mezi pevnosti [N]

$F_{p0,2}$ – Síla na smluvní mezi kluzu [N]

F_e – Síla na mezi kluzu [N]

L_u – Konečná měřená délka zkušební tyče po přetržení [mm]

S_u – Nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení zkušební tyče [mm²]

r_α – Součinitel normálové anizotropie ve směru α [–]

ε_b – Skutečná plastická deformace ve směru šířky [–]

ε_t – Skutečná plastická deformace ve směru tloušťky [–]

r_m – Vážený průměr součinitele plastické anizotropie [–]

Δr – Součinitel plošné anizotropie [–]

r_0, r_{45}, r_{90} –

Součinitel normálové anizotropie ve směru 0°, 45° a 90° ke směru válcování [–]

n_0, n_{45}, n_{90} –

Exponent deformačního zpevnění ve směru 0°, 45° a 90° ke směru válcování [–]

4.3 Návrh experimentu

μ_{eff} – Efektivní hodnota koeficientu tření [–]

μ – Koeficient tření [–]

p – Působící tlak [MPa]

p_{ref} – Referenční hodnota tlaku [MPa]

e – Tlakový exponent [–]

1 Úvod

Rostoucí technologické požadavky, ale i rozmary automobilových designerů, mají za následek nárůst komplexnosti geometrie navrhovaných plechových dílů. V důsledku této skutečnosti dochází k vzniku ostřejších geometrií, které v rámci procesu lisování tenkých plechových komponent posouvají hranice vyrobiteľnosti.

Lisování tenkých plechů představuje komplexní tvářecí proces, který je ovlivněn velkou řadou technologických, ale i materiálových parametrů. Trendem dnešní doby je tedy snaha celý tento výrobní proces simulovat, a to pomocí softwarů fungujících na bázi numerické metody konečných prvků. Softwary jako je například AutoForm či PamStamp jsou tak díky této metodě schopny přesně předpovídat chování plechu při daném výrobním procesu. Tyto programy nachází využití při koncepční analýze vyrobiteľnosti navržené geometrie daného lisovaného dílu. Dále jsou pak prioritně užívány pro přesnou simulaci finálního výrobního procesu, který je specifický pro dílčí komponenty automobilové karosérie. Numerické simulace tvářecích procesů a jejich integrace do virtuálního procesu lisování tak tvoří nedílnou součást výroby tenkých plechových komponent karoserie vozu.

Využití softwarů pro simulaci výrobního procesu daného dílu zejména umožňuje předpovídat vznik problematických míst, která by mohla ovlivnit funkční či estetické vlastnosti dané součásti. Případné vady výlisků velice negativně ovlivňují produktivitu lisovny a v krajních případech mohou vést až k zastavení lisovací linky. Možnost předpovídat oblasti případného namáhání, nadměrného ztenčování či praskání výlisku umožňuje konstruktérům z oddělení konstrukce lisovacího nářadí provést změny geometrie navrženého dílu tak, aby v rámci koncepčního návrhu byly plně eliminovány. Simulaci lze rovněž velice snadno využít pro zavedené sériové nářadí, a to pro navržení efektivní úpravy geometrického tvaru činných ploch nástroje v případě, že se objeví náhlý problém s lisovatelností dílu. Numerická simulace tak uživateli umožňuje zefektivnit a snížit časové a finanční náklady, které jsou bezprostředně spojeny s prováděnými korekcemi tvaru lisovacího nářadí.

Významným aspektem lisování tenkých plechů je takzvané odpružení (springback). Jedná se o jev, kdy dojde ke vzniku tvarové nepřesnosti dílu, a to v důsledku uvolnění elastické deformace. Tento jev může být zejména problematický z hlediska zajištění kompatibility jednotlivých součástí karoserie vozu. Z tohoto důvodu je tak využíváno numerických simulací pro přesné měření tohoto jevu a jeho případnou kompenzaci. Efektivní a přesné měření odpružení (springbacku) je naprosto nezbytné, neboť moderní doba klade stále se zvyšující požadavky na aplikaci výšepevných materiálů (AHSS), které umožní snížení spotřeby paliva a ekologický provoz daného vozu. Pokročilé výšepevné materiály (AHSS) vykazují mnohonásobně lepší mechanické vlastnosti než oceli běžné. Tyto lepší mechanické vlastnosti zejména umožní snížit tloušťku příslušných plechových komponent, čímž dojde k žádoucímu snížení hmotnosti karoserie. Vyšší hodnota meze kluzu oceli však značně zvyšuje náchylnost k odpružení. Tyto pokročilé oceli tak vykazují výrazně vyšší míru odpružení, která by reálně mohla ohrozit kompatibilitu jednotlivých dílů a tím i samotný proces spojování a lemování.

Lisovatelnost a následné lícování jednotlivých plechových dílů tak představuje velice komplexní problém, který lze potenciálně řešit právě pomocí integrace numerických simulací lisování a lemování do běžného výrobního procesu. Příslušné konstrukční oddělení tak může nejprve nasimulovat výrobu jednotlivých dílů automobilové karoserie, eliminovat případné vady, změřit míru odpružení a finálně vizualizovat spojení a zalemování jednotlivých komponent. V současnosti běžně prováděné simulace lemování jsou však zpravidla jednoduššího charakteru a neuvažují vliv strukturních komponent. Cíl práce tak spočívá ve vyzkoušení simulace lemování celé sestavy 5. dveří, která je vytvořena na základě vstupů dle provedených simulací lisování.

2 Teoretická část

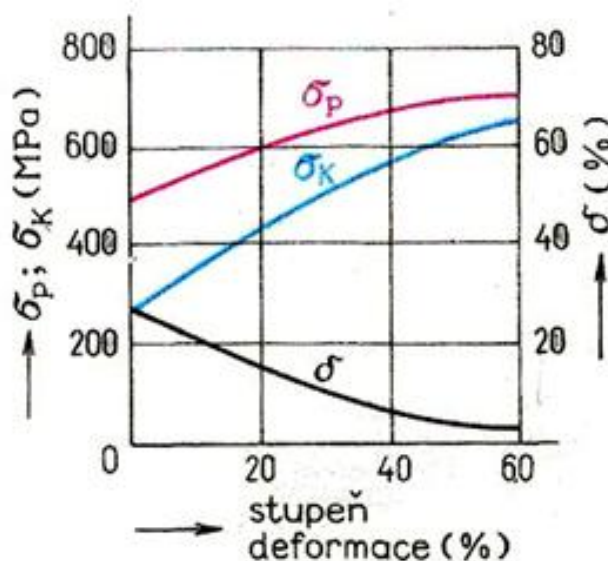
Přesný popis procesu lisování tenkých plechů v první řadě vyžaduje znalost základních zákonitostí a operací, definovaných dle teorie a metodiky tváření. Rovněž je nezbytně nutná znalost základních materiálových parametrů, zejména tedy pevnostních a plastických charakteristik.

Tvářecím procesem obecně rozumíme souhrn činností, které v důsledku působení plastické deformace způsobují změnu tvaru tvářeného tělesa či polotovaru. [1]

2.1 Tváření za studena

Technologie tváření obecně rozdělujeme dle dvou hlavních kritérií, a to stavu napjatosti a tvářecí teploty. Z hlediska tvářecí teploty rozdělujeme operace tváření za studena a za tepla.

Tváření za studena představuje technologii, kdy je materiál deformován za běžné teploty okolního prostředí či při teplotách lehce vyšších. Takto tvářené součásti zpravidla disponují výbornou kvalitou povrchu a vyššími stupni přesnosti. V důsledku tváření za studena primárně dochází k deformačnímu zpevňování, které má za následek nárůst pevnosti a tvrdosti tvářeného materiálu. Deformována jsou přímo materiálová zrna, která se protahují ve směru působícího zatížení. Dochází tedy k vzniku takzvané deformační struktury, která disponuje lepšími mechanickými vlastnostmi. Další výhodou je fakt, že tvářenou součást není nutno ohřívat, tudíž odpadají náklady spojené s ohřevem. [1] Změnu mechanických vlastností, která vzniká v důsledku narůstajícího stupně deformace, můžeme pozorovat na následujícím Obrázku 1.



Obrázek 1 - Změna mechanických vlastností v důsledku deformačního zpevňování [2]

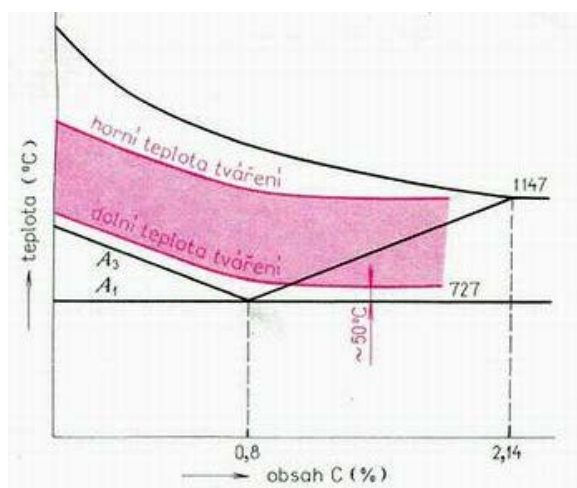
Přestože technologie tváření za studena disponuje četnými výhodami, existuje i četná řada úskalí, která sebou přináší určitá omezení. Potřebné tvářecí síly jsou vysoké, neboť roste deformační odpor materiálu σ_D [MPa]. Míra přetvoření je tedy značně omezená, neboť v důsledku deformačního zpevňování dochází ke značnému poklesu tažnosti. Tvářené součásti je zároveň nezbytně nutné nejprve velice důkladně očistit od nečistot a případných oxidických vrstev. [1]

2.2 Tváření za poloohřevu

Nárůst deformačního odporu σ_D vede k nutnosti použití vysokých tvářecích sil. Za účelem snížení silové a výkonové náročnosti tvářecího procesu se tedy přistupuje k ohřevu materiálu. Tváření za poloohřevu je zpravidla prováděno při teplotě vyšší než 30% termodynamické teploty tání daného kovu, avšak pod teplotou rekystalizace. Tato skutečnost má za následek, že materiál může být tvářen nižšími silami, neboť dochází ke snížení efektu deformačního zpevnění a poklesu deformačního odporu σ_D . Zároveň však stále dochází ke zlepšování mechanických vlastností v důsledku deformace, neboť nedochází k uplatnění odpevňovacích dějů. Zároveň se u tvářené součásti snižuje či přímo eliminuje potřeba provádět žhání pro eliminaci vnitřního pnutí. [1]

2.3 Tváření za tepla

V rámci procesu tváření za tepla dochází k trvalé změně tvaru tělesa, a to při teplotách vyšších než je hodnota teploty rekystalizace. Tvářecí teploty tedy dosahují hodnot vyšších než je 50% termodynamické teploty tání. Zároveň je však nutné brát v úvahu fakt, že samotný mechanismus deformace generuje určité množství tepla, které v lokálních místech vede ke zvýšení teploty tvářeného tělesa. Z toho důvodu se stanovuje horní hranice tvářecích teplot tak, aby nedocházelo k případnému natavení zpracovávaného materiálu. Tvářecí teploty by tedy neměly přesahovat hodnoty vyšší než 75% termodynamické teploty tání daného kovu. [1] Doporučené pásmo tvářecích teplot pro nízkouhlíkové oceli můžeme pozorovat na následujícím Obrázku 2.



Obrázek 2 - Pásmo tvářecích teplot pro nízkouhlíkové oceli [2]

Zvýšená teplota má za následek výrazný pokles deformačního odporu, což umožňuje realizovat podstatně vyšší stupně plastického přetvoření. K této skutečnosti rovněž přispívá fakt, že v důsledku tváření nedochází ke snižování tažnosti tak jako u tváření za studena. Lze tedy tvářet i kovy, které při tváření za studena vykazují náchylnost k praskání. Platí, že výsledné mechanické vlastnosti jsou převážně izotropní, neboť nedochází ke vzniku orientované deformační struktury. Nedochází tedy k deformačnímu zpevňování materiálu, tento proces je plně eliminován účinky rekystalizace. Tvářecí síly rovněž dosahují mnohonásobně menších hodnot než při tváření za studena. [1]

Hlavní nevýhodou tohoto procesu je značná energetická náročnost, která je zapříčiněna nutností rovnoměrného ohřevu tvářené součásti. V důsledku ohřevu na vysokou teplotu zároveň dochází k oxidaci materiálu, kdy na povrchu dochází k tvorbě takzvaných okujů, což jsou plátky oxidů železa. Dalšími nevýhodami je pak například nižší rozměrová přesnost, absence zpevnění a větší opotřebení tvářecích nástrojů. [1]

2.4 Tváření objemové

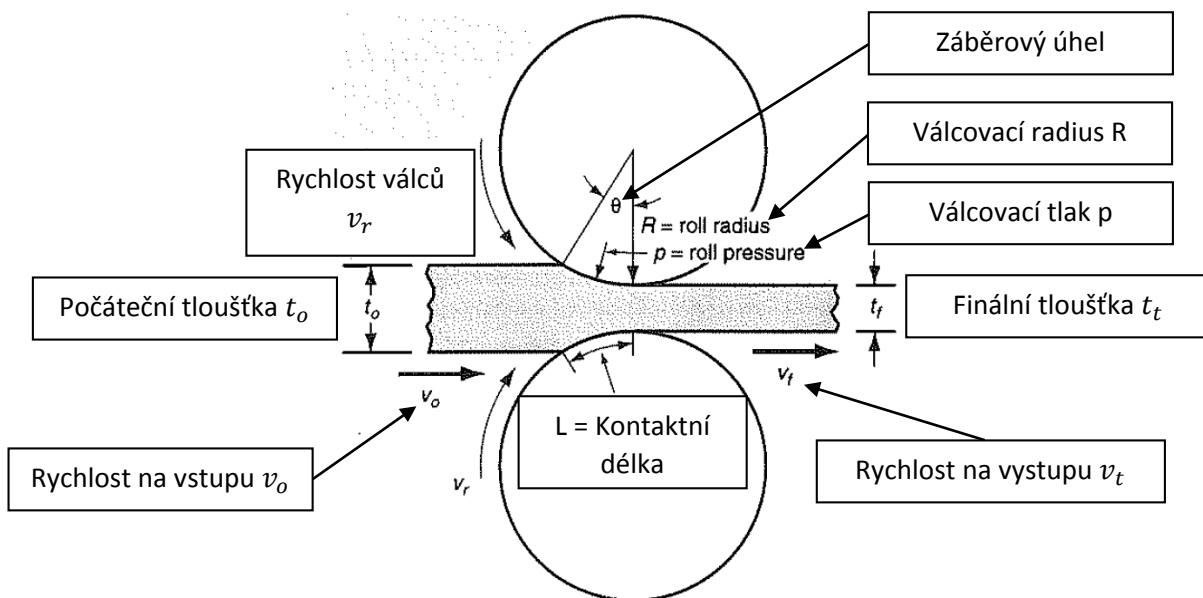
Objemové tváření obecně zastřešuje technologie tváření, jejichž účelem je objemová změna tvaru tělesa. Deformace se tedy realizuje ve všech třech rozměrových směrech a dochází ke změně tloušťky, šířky i délky. Mezi tyto technologie patří například válcování, kování, tažení drátů a profilů či vytlačování a lze je provádět za tepla i za studena, avšak je nutné podotknout, že změna tvaru při tváření za studena je mnohonásobně menší. [1]

2.4.1 Válcování

Technologie válcování představuje proces, kdy primárně dochází ke snížení tloušťky materiálu, a to v důsledku tlakového působení 2 či více proti sobě umístěných pracovních válců. Tyto válce rotují, čímž dochází k vtahování materiálu do pracovního prostoru a jeho kontinuálnímu odvalování. [1]

Nástroje a zařízení potřebné pro realizaci tohoto procesu jsou zpravidla velmi robustní a finančně nákladné. Na základě této skutečnosti je tedy nezbytně nutné, aby byla realizována výroba s vysokým objemem, tak aby se tato nákladná investice vyplatila. Z tohoto důvodu tedy válcování představuje nedílnou součást právě výrobního procesu oceli. V rámci tohoto procesu jsou odlité ingoty ohřáty a následně válcovány za tepla. Účelem je hlavně eliminace nehomogenní lité struktury. Výsledkem tohoto procesu jsou tři hlavní typy hutních polotovárů, které se nazývají bloky (150mm x 150mm a výš), bramy (šířka více než 250 mm a tloušťka více než 40mm) a předvalky (čtvercové – strana více než 40mm). Předvalky slouží k výrobě tyčí a bloky pro výrobu nosných profilů či například kolejnic. Bramy (plosky) pak slouží k výrobě desek, plechů či pásů. Princip výroby tenkých karosářských plechů tedy spočívá zejména v jejich vyválcování z předem připravené bramy (plosky) či ploštiny. [1]

Schématické zobrazení procesu plochého válcování, které je specifické pro výrobu tenkých plechů lze pozorovat na následujícím Obrázku 3.



Obrázek 3 - Podélné válcování [1]

Změnu tloušťky, v důsledku válcovacího procesu, vyjadřuje parametr nazvaný redukce r , který je definován dle následujícího vztahu:

$$r = \frac{t_o - t_f}{t_o} \quad (1)$$

[1]

Lepší tvárnost za zvýšených teplot umožňuje intenzivnější stupně přetvoření, tudíž technologie válcování za tepla slouží zejména k rozrušení licí struktury a výrobě příslušného hutního polotovaru. Technologický proces válcování za studena pak slouží převážně ke zlepšení mechanických vlastností a parametrů kvality povrchu. [1]

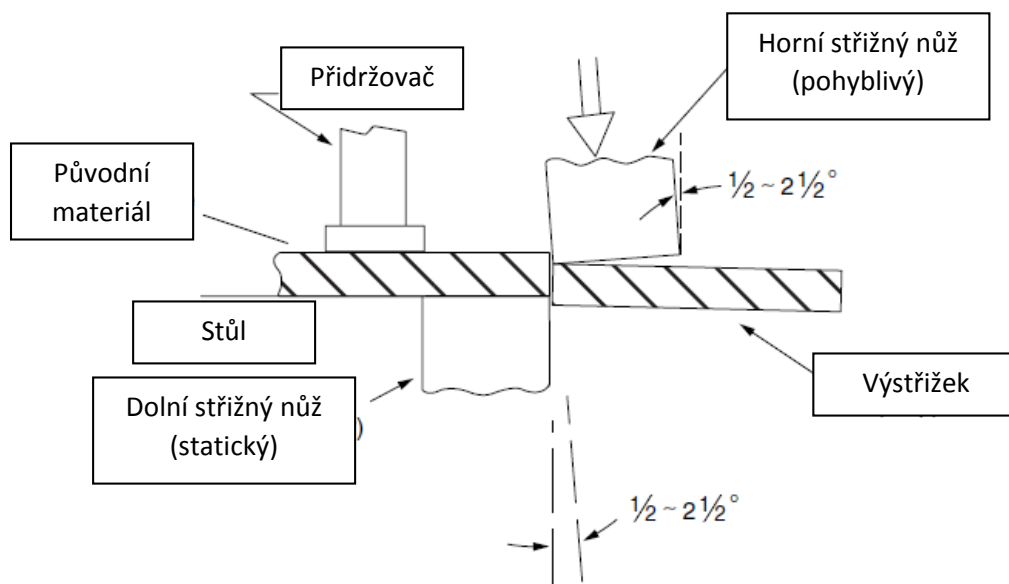
2.5 Tváření plošné

Plošné tváření zahrnuje širokou škálu technologií, při kterých dochází k plastické deformaci rovinného polotovaru, kterým je plech. Materiál je za působení převážně tahových napětí přetvořen do trojrozměrného útvaru, a to zpravidla bez výrazné změny tloušťky či povrchových charakteristik. Tato tvarová změna je dosažena v důsledku působení rovinného stavu napjatosti. Určitým specifikem plošného tváření je takzvané odpružení (springback), který je způsoben v důsledku vysokého podílu elastických deformací. V případě odlehčení tvářecí síly pak dochází k uvolnění elastické deformace a díl se takzvaně odpruží, čímž dojde ke změně rozměrových a geometrických parametrů. S tímto jevem je tak nutné dopředu počítat a jeho efekt kompenzovat. Pro účely této práce jsou nejdůležitější zejména technologie stříhání, ohýbání, hlubokého tažení a lisování, které jsou níže specifikovány. [3]

2.5.1 Stříhání

V rámci plošného tváření představuje stříhání technologický proces dělení materiálu, kdy se z velkých tabulí či svitků plechu vytváří přístříhy či výstřížky dle požadovaných parametrů. [4]

Princip operace prostého stříhání spočívá v umístění materiálu na pracovní stůl a jeho zafixování pomocí přidržovače. Následně dochází k pohybu horního nože směrem dolů a kontaktu s kovem. V důsledku působící síly dochází k nárůstu působícího napětí a nože částečně penetrují povrch materiálu. V případě nízkouhlíkové oceli vniknou nože zpravidla do 30 – 60 % celkové tloušťky. Ve chvíli, kdy působící napětí překročí pevnost ve stříhu příslušného materiálu, dochází k porušení v rovině stříhu a oddělení materiálu. Tento postup lze pozorovat na následujícím Obrázku 4. [4]



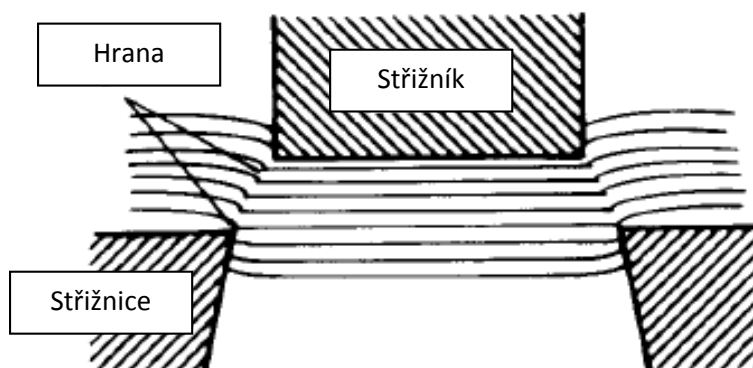
Obrázek 4 - Schéma střížné operace s rovnoběžnými noži [4]

Výpočet střížné síly, za předpokladu rovnoběžných nožů, lze pak vypočítat dle následujícího vzorce:

$$F = (1,1 - 1,3) \cdot S \cdot \tau_S \quad (2)$$

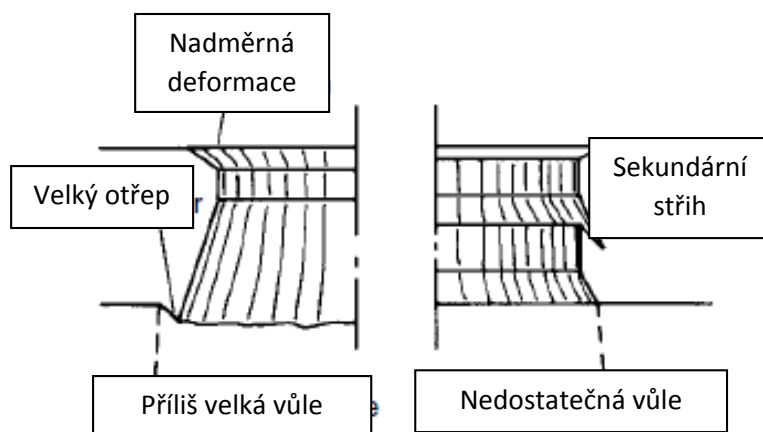
[2]

V případě stříhu otvoru probíhá proces dle následujícího schématu na Obrázku 5, kde pohyblivý střížník vnikne do materiálu, který je následně natlačen na střížnou hranu střížnice. Hloubka vniknutí střížníku se odvíjí chemického složení stříhaného materiálu a zpravidla činí 10 – 25 % tloušťky plechu. V důsledku překročení pevnosti ve stříhu pak dochází k oddělení materiálu a vystřížení otvoru. [4], [5]



Obrázek 5 - Princip stříhání otvoru [4]

Kvalita povrchu a náchylnost na vznik trhlin podél hrany stříhu je primárně ovlivněna velikostí takzvané **střížné vůle**. Tato vůle je definována jakožto rozdíl pracovního rozměru střížníku a střížnice. Přesné určení velikosti střížné vůle je velice důležité pro realizaci střížné operace. V případě těsného záběru střížných hran a nulové vůle by nedošlo k "čistému" odtržení materiálu a mohlo by docházet ke vzniku sekundárního stříhu. Naopak pokud je zvolená střížná vůle příliš velká, dochází k nadměrné deformaci materiálu a zároveň i k vzniku otřepu. Správné stanovení střížné vůle je prioritně závislé na tloušťce stříhaného materiálu. Příklad defektů, které vznikají v důsledku nesprávně zvolené střížné vůle lze pozorovat na následujícím Obrázku 6. [4], [5]

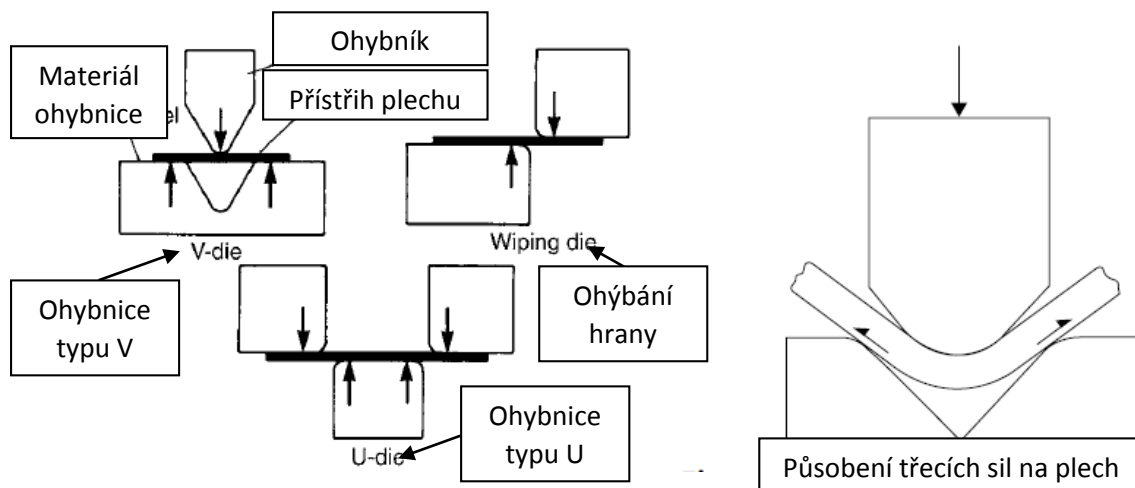


Obrázek 6 - Povrchové defekty v důsledku nesprávně zvolené střížné vůle [4]

Výsledná kvalita stříhané plochy je zároveň zlepšena aplikací přidržovače, který tlakovým působením limituje potenciální zvlnění plechu v místě stříhu. [4]

2.5.2 Ohýbání

Technologický proces ohýbání představuje standardní operaci plošného tváření, kdy dochází k lokalizaci deformace do poměrně malé části tvářeného materiálu. Dochází ke vzniku nehomogenní deformace příčného průřezu, kdy na jedné straně dochází ke zkrácení a na straně druhé k prodloužení. Schématické znázornění technologie ohýbání lze pozorovat na následujícím Obrázku 7. [4]

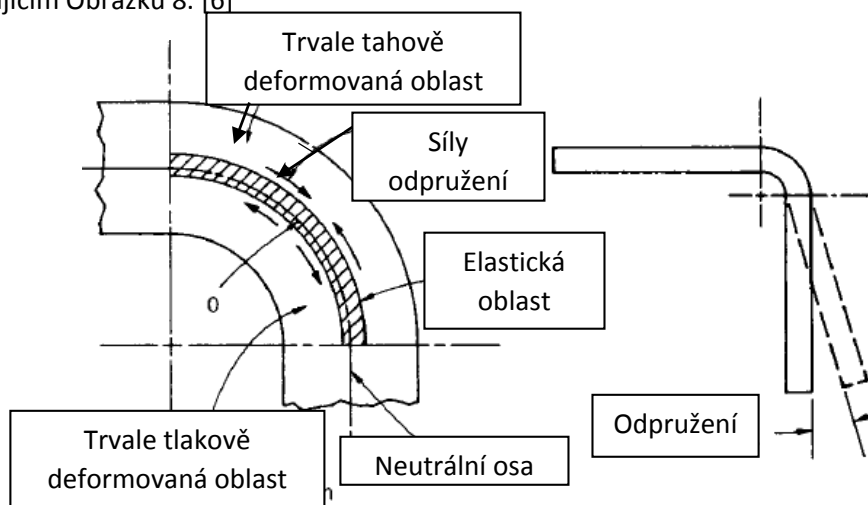


Obrázek 7 - Schématické znázornění ohýbání [4]

Principiálně dochází k plastické deformaci přístřihu plechu, a to v důsledku silového působení ohybníku. V průběhu ohýbání dochází k prodloužení délky na vnějším povrchu plechu (tahové zatížení), na vnitřní straně (tlakové zatížení) naopak dochází ke kontrakci, avšak délka neutrální osy (vlákna) zůstává nezměněna. Tato osa v materiálu představuje linii nulového napětí a deformace, tudíž reprezentuje původní délku plechu před jeho deformací. Poloha osy před deformací je přibližně ve středu příčného průřezu (v 50 % tloušťky), avšak po deformaci dojde k jejímu posunutí směrem k povrchu, který je namáhán tlakem. Míra posunutí neutrální osy (vlákna) je zejména ovlivněna velikostí poloměru zaoblení. Obecně platí, že velký poloměr zaoblení má jen malý vliv na posunutí neutrální osy (vlákna), avšak malý poloměr zaoblení způsobí větší posun tohoto neutrálního vlákna směrem k vláknům stlačovaným, což má za následek ztenčení materiálu. [4], [6]

2.5.3 Odpružení

Odpružení (springback) představuje nežádoucí jev, který je při operacích ohýbání způsoben zejména v důsledku variace působících napětí. Princip vzniku odpružení při ohýbání hrany lze pozorovat na následujícím Obrázku 8. [6]



Obrázek 8 - Princip realizace odpružení (springback)

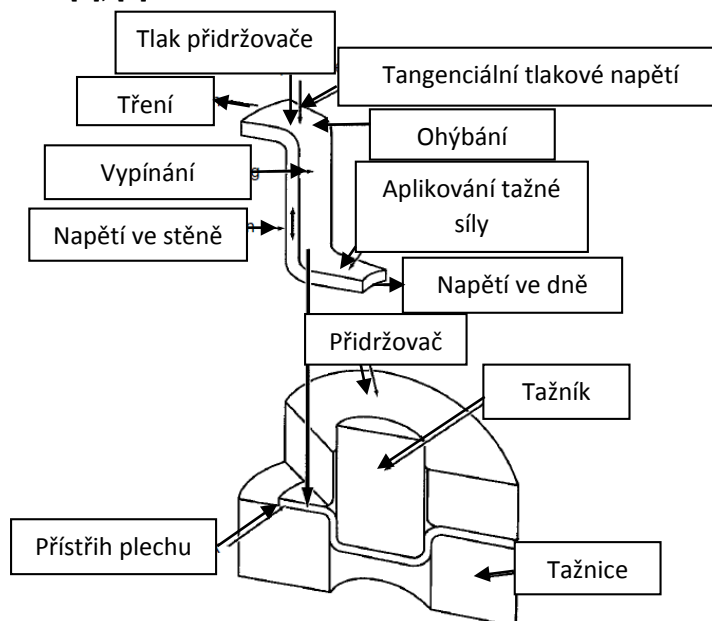
Největší tahové napětí působí v místě ohybu, a to na vnějším povrchu natahovaných vláken. Toto napětí směrem do středu plechu klesá a v místě neutrální osy nabývá nulové hodnoty. Z tohoto důvodu je tedy napětí v okolí neutrální osy menší než mez kluzu daného materiálu. V této oblasti tak nedochází ke vzniku trvalé deformace, materiál se zde deformuje pouze elasticky. Po následném uvolnění tvářecího zatížení vykazuje materiál v oblasti elastické zóny snahu vrátit se do původního tvaru, avšak je omezen trvale přetvořenými oblastmi, které vznikají směrem k povrchu plechu. Vzájemné silové působení elastické a plastické zóny vede k částečnému odpružení materiálu, a to za účelem vyrovnání silových účinků. Vzniklé odpružení se projeví ve formě tvarových úchylek od předepsaného geometrického tvaru. [4], [6]

Obecně platí, že výšepevné materiály jsou náchylné na efekty odpružení (springback) ve vyšší míře, a to zejména z důvodu vyšší hodnoty meze kluzu, jejíž hodnota ovlivňuje velikost elastické oblasti při daném ohybovém napětí. Z tohoto důvodu tedy výšepevné plechy vykazují větší míru odpružení. [4]

Za účelem zajištění rozměrové přesnosti vyráběného dílu je nezbytně nutné efekty odpružení kompenzovat. Z tohoto důvodu se například využívá takzvaného overbendingu, kdy je materiál ohnut více než je požadovaný přesný rozměr a následně odpružení jej do tohoto rozměru vyrovná. Kompenzaci odpružení lze zároveň provést pomocí rázového zpevnění. V tomto případě je materiál v okolí ohybového rádiu rázově tvářen, což má za následek překročení meze kluzu materiálu a jeho zpevnění. V případě velkých ohybových poloměrů lze rovněž využít metody předepnutí plechu, tak že dojde k překročení meze kluzu daného materiálu. Tato metoda je vysoce efektivní, avšak nelze jí aplikovat na malé ohybové poloměry, neboť by mohlo dojít k porušení integrity, a to z důvodu překročení meze pevnosti. [4]

2.5.4 Hluboké tažení

Princip technologie hlubokého tažení spočívá v uchycení přístřihu plechu pomocí přidržovače a následného silového působení tažníku na volnou plochu plechu. Tato část plechu je v důsledku silového působení deformována směrem do pracovní dutiny tažnice. V rámci operace dochází k vypínání materiálu, což vede ke ztenčování stěny výtažku a prodlužování její délky. Účelem tohoto procesu je tedy výroba dutého nerozvinutelného tělesa (výtažku) z přístřihu plechu. Tento princip lze pozorovat na následujícím Obrázku 9. [4], [7]



Obrázek 9 - Schéma operace hlubokého tažení kalíšku [4], [7]

Výsledný výtazek hlavně nesmí vykazovat defekty povrchu, zejména tedy zvlnění či porušení integrity, které se projevuje ve formě trhlin či prasklin. Hluboké tažení je tedy zvláště vhodné například pro výrobu plechovek, tlakových nádob či nábojnic. Nejdůležitější využití tato technologie však nachází v rámci výroby karosářských dílů pro automobilový průmysl. [4], [7]

Schopnost materiálu prodělat operaci hlubokého tažení bez ztráty integrity se nazývá hlubokotažnost a přímo závisí na chemickém složení a mechanických vlastnostech daného materiálu. Z hlediska chemického složení je důležitá zejména struktura s velmi malým množstvím vměstků a zbytkových prvků. Důležitými mechanickými vlastnosti pro vyhodnocení hlubokotažnosti materiálu jsou zejména tažnost A , součinitel plastické anizotropie r a exponent deformačního zpevnění n . Parametr hlubokotažnosti je zároveň ovlivněn i fyzikálními vlastnostmi, například modulem pružnosti E či samotnou geometrií tvářecího procesu. [4]

Důležitým parametrem je z hlediska hlubokotažnosti mezní součinitel tažení m , který zpravidla slouží pro určení počtu tažných operací. Tento součinitel lze určit dle následujícího vztahu:

$$m = \frac{d}{D} \quad (3)$$

Symbol $d[mm]$ ve vzorci reprezentuje průměr výtazku a symbol $D[mm]$ představuje průměr přístřihu. [4], [8]

Přístřih materiálu je v průběhu tažení namáhán kombinací radiálního tahového a tangenciálního tlakového napětí. Zvlnění povrchu pak nastává v případě, že je hodnota tangenciálního napětí příliš vysoká. Přidržovač tedy působí tlakovou silou na povrchu přístřihu plechu, čímž tvorbě zvlnění zamezí. Hlavní účel přidržovače tedy spočívá zejména v eliminaci zvlnění povrchu, které vzniká v oblasti přírubby výtazku. Pokud však nastane případ, kdy je příliš vysoká hodnota radiálního napětí, pak dochází k velice výraznému ztenčování stěny (necking) a může dojít až k utržení dna výtazku. [9], [8]

Přibližné stanovení **tažné síly**, potřebné pro provedení dané tažné operace, lze provést pomocí následujícího vztahu:

$$F = \pi \cdot D_p \cdot t \cdot TS \cdot \left(\frac{D_b}{D_p} - 0,7 \right) \quad (4)$$

Síla přidržovače zpravidla dosahuje okolo třetinové hodnoty tažné síly a její výpočet lze provést dle následujícího vztahu:

$$F_h = 0,0015 \cdot Y \cdot \pi \cdot \left[D_b^2 - (D_p + 2,2 \cdot t + 2 \cdot R_d)^2 \right] \quad (5)$$

[1]

2.6 Mechanismus plastické deformace

Kovové materiály vykazují z hlediska atomové stavby krystalické uspořádání. Pro kovy jsou nejčastější tři typy krystalické mřížky, které se rozlišují dle tvaru elementární buňky. Těmito mřížkami jsou mřížka krychlová tělesně (BCC) či plošně středěná (FCC) a mřížka hexagonální (HCP). Toto krystalické uspořádání obecně není dokonalé a obsahuje poruchy, které mohou být bodové, čarové, plošné a prostorové. Přítomnost těchto defektů je v mnoha inženýrských aplikacích prospěšná, neboť vyšší množství poruch umožňuje zvýšit například pevnost materiálu. V případě, že je krystal zatížen napětím, dojde nejprve k elastické deformaci a částečnému vychýlení atomů, které se po odlehčení vyrovná do původního stavu. Pokud však působící napětí překročí mez kluzu daného materiálu, dojde ke vzniku permanentní plastické deformace. Tato plastická deformace krystalové mřížky se primárně realizuje pomocí dvou mechanismů, kterými je skluz a dvojčatění. [1]

2.6.1 Napětí

Napětí σ definujeme jako intenzitu síly $F[N]$ působící na ploše $A[mm^2]$, což za předpokladu rovnoměrného rozložení napětí popisuje následující rovnice [10]:

$$\sigma = \frac{F}{A} [MPa] \quad (6)$$

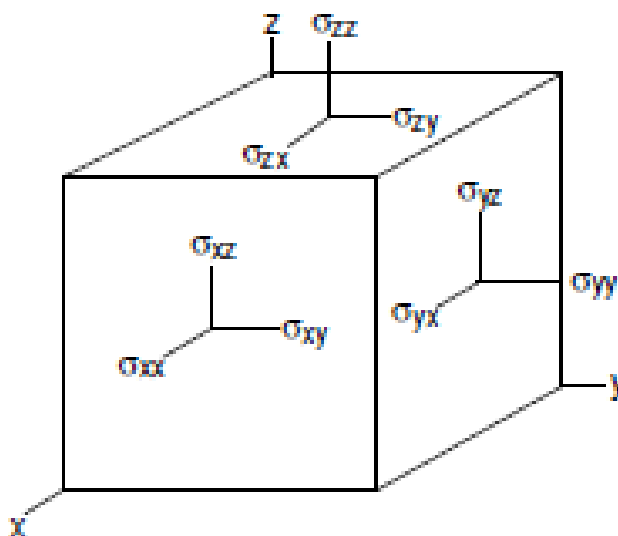
Mechanické napětí představuje tenzorovou veličinu, která se skládá z 9 individuálních složek napětí. Matematické vyjádření tenzoru napětí pak dle následující rovnice [10]:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \rightarrow T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

a)

b)

Pokud není nutno uvádět tenzorový zápis ve formě **a)** je mnohem jednodušší zápis ve tvaru **b)**, kdy jsou složky smykových napětí označeny veličinou τ . Dílčí složky tenzoru napětí lze pozorovat na následujícím Obrázku 10. [10]



Obrázek 10 - Složky napětí působící na základní infinitezimální element [10]

V každém bodě zatěžovaného tělesa lze nalézt soubor vzájemně orientovaných os, podél kterých je smykové napětí rovno nule. Tyto osy a napětí, jež působí v jejich směru, označujeme názvem hlavní. Hlavní napětí ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) lze určit jako kořeny následující charakteristické rovnice:

$$\sigma_p^3 - I_1 \cdot \sigma_p^2 - I_2 \cdot \sigma_p - I_3 = 0 \quad (8)$$

Invarianty tenzoru napětí lze stanovit dle následujících vztahů:

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

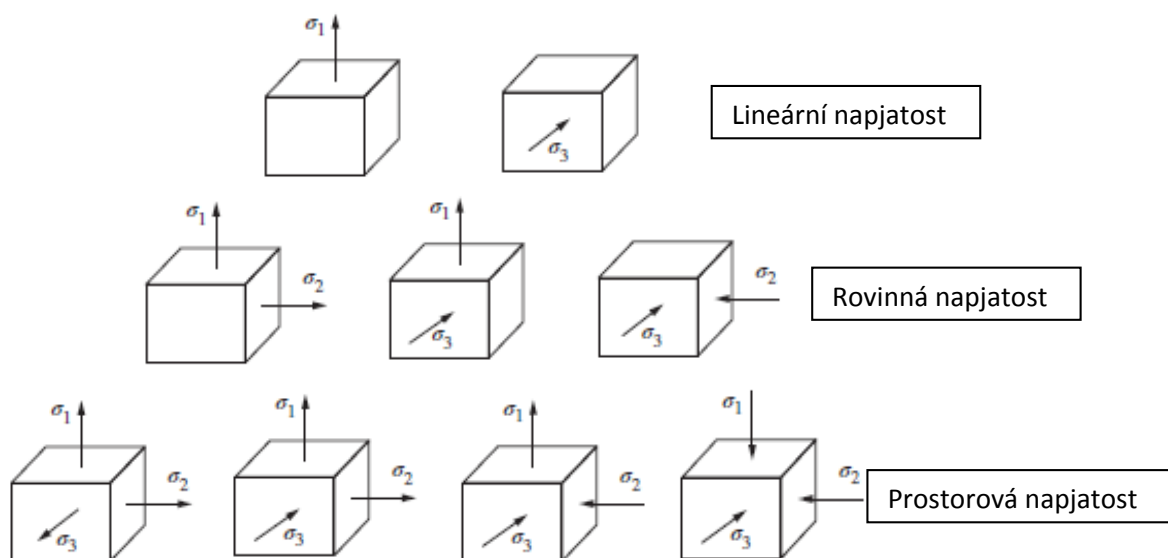
$$I_2 = \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2 + \sigma_{xy}^2 - \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} - \sigma_{zz} \cdot \sigma_{xx} - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} = \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1 - \sigma_1 \cdot \sigma_2$$

$$I_3 = \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} + 2 \cdot \sigma_{yz} \cdot \sigma_{zx} \cdot \sigma_{xy} - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yz}^2 - \sigma_{zz} \cdot \sigma_{xy}^2 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3$$

(9)

[10]

Hlavní napětí vyvolávají, dle své povahy, různé stavy napjatosti tělesa. Rozlišujeme napětí tahová (kladná) a napětí tlaková (záporná). V materiálu může tedy dojít ke vzniku až devíti různých stavů napjatosti. Tyto stavy napjatosti lze pozorovat na následujícím Obrázku 11 [11].



Obrázek 11 - Stavy napjatosti [11]

2.6.2 Deformace

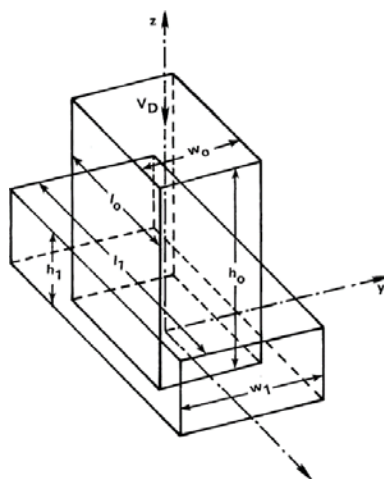
Mechanismus trvalé (plastické) deformace tělesa je v rámci teorie tváření popsán pomocí teorie plasticity. Matematické popsání tohoto mechanismu umožňuje určovat směr toku kovu, a tak i přímo stanovit tvářecí proces, který bude nejvhodnější pro dosažení zadané geometrie. [12]

Za účelem získání prakticky použitelných matematických formulací je nezbytně nutné zavést následující předpoklady:

- Účinek elastické deformace se uvažuje pouze v případě odpružení či elastické odchylky nástroje.
- Deformovaný materiál je považovaný za kontinuum.
- Data získaná z jednoosých tahových či tlakových zkoušek jsou ve vzájemném vztahu s deformačním odporem při podmínkách víceosé deformace.
- Zanedbává se anizotropie materiálu a Bauschingerův efekt.
- Platí zákon zachování objemu.
- Tření je vyjádřeno pomocí zjednodušeného vztahu, například pomocí Coulombova zákona či konstantního smykového napětí.

[12]

Následující Obrázek 12 ukazuje těleso deformované pomocí procesu objemového kování, kdy došlo ke změně všech třech hlavních rozměrů. Symbol l zde reprezentuje délku tělesa, w reprezentuje šířku tělesa a h představuje výšku tělesa. [12]



Obrázek 12 - Těleso deformované v průběhu objemového kování [12]

V tomto případě uvažujeme homogenní rozložení deformace a zatížení bez tření. Těleso je deformováno kovádkem, které se pohybuje rychlostí v_D . [12] Za těchto předpokladů lze pro jednotlivé deformace stanovit tyto následující vztahy:

Absolutní deformace:

$$\Delta l = l_1 - l_0 [mm], \quad \Delta w = w_1 - w_0 [mm], \quad \Delta h = h_0 - h_1 [mm]$$

Poměrné deformace:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} [-], \quad \varepsilon_w = \frac{\Delta w}{w_0} [-], \quad \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} [-] \quad (10)$$

Skutečné plastická deformace:

$$\varphi_l = \ln \frac{l_1}{l_0} [-], \quad \varphi_w = \ln \frac{w_1}{w_0} [-], \quad \varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0} [-]$$

[12]

2.7 Hypotézy plasticity

Zatěžované těleso se v důsledku působícího napětí deformuje. Tato deformace je zpočátku pouze elastická (vratná) a řídí se Hookovým zákonem. Trvalá změna tělesa je však možná pouze v případě vzniku plastické deformace. Její vznik je podmíněn takzvanou podmínkou plasticity, která říká, že trvalá deformace nastává pouze v případě, kdy působící napětí za daného stavu napjatosti překročí mez kluzu. [10]

2.7.1 Podmínka plasticity dle Trescy

Dle Trescovy hypotézy závisí podmínka plasticity na nejvyšším smykovém napětí a k plastickému toku tedy dojde, když hodnota smykového napětí překročí kritickou hodnotu k . [10]

Za předpokladu konvence velikosti hlavních napětí $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, pak lze tuto podmínku vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k \quad (11)$$

[10]

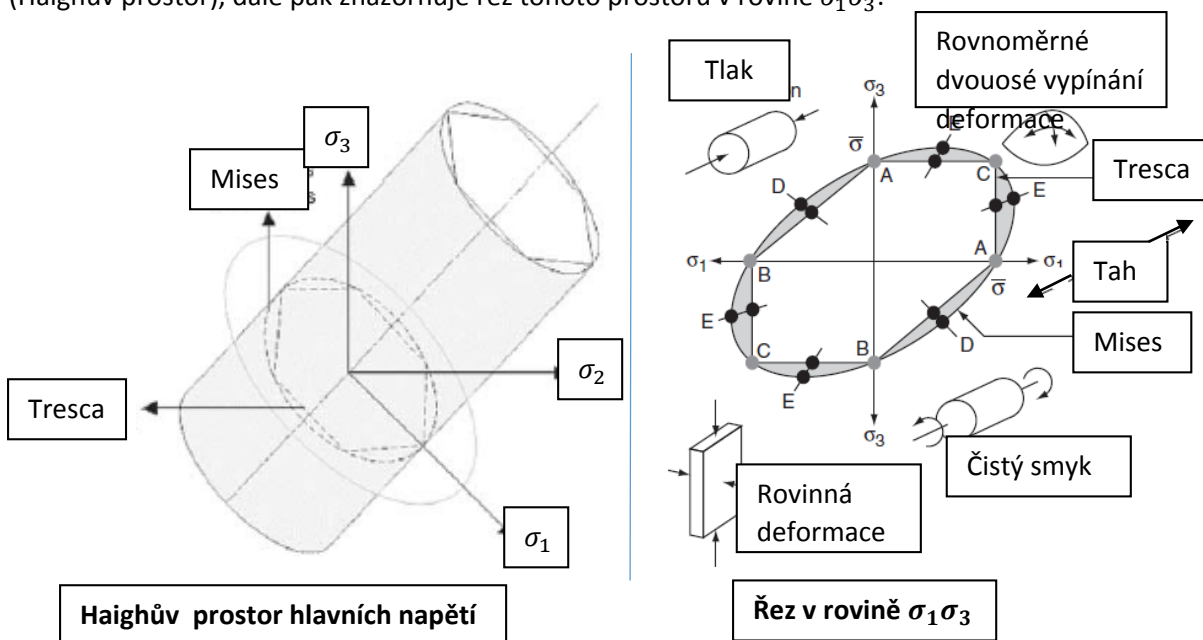
2.7.2 Podmínka plasticity dle von Misesse

Hypotéza dle von Misesse definuje, že k plastickému toku materiálu dojde v případě, že střední kvadratická hodnota smykového napětí k^2 dosáhne kritické hodnoty. V tomto případě je pak podmínka plasticity definována následující rovnicí:

$$(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 6k^2 \quad (12)$$

[10]

Následující Obrázek 13 znázorňuje grafické zobrazení obou hypotéz v prostoru hlavních napětí (Haighův prostor), dále pak znázorňuje řez tohoto prostoru v rovině $\sigma_1\sigma_3$.



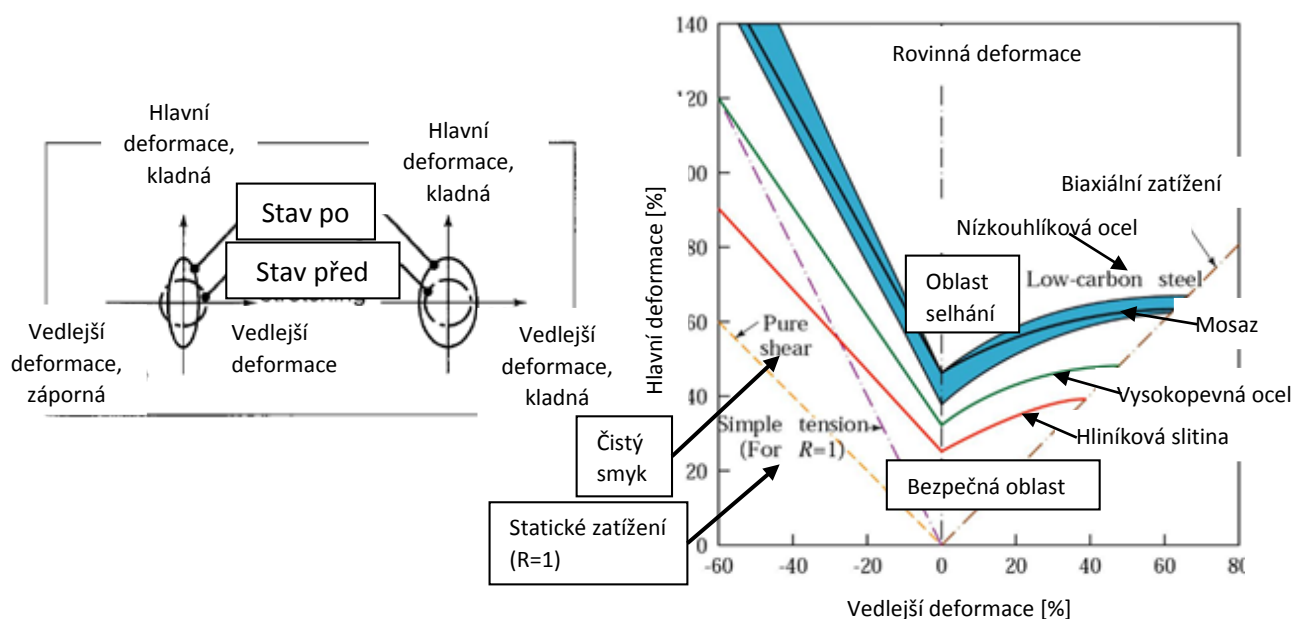
Obrázek 13 - Vyobrazení mezní plochy kluzu dle Trescy a von Misesse [12]

Trescova hypotéza vytíná v Haighově prostoru pravidelný šestiboký hranol, teorie dle von Misesse pak vytíná válec. Zobrazení v rovině $\sigma_1\sigma_3$ pak ukazuje, že křivku plasticity dle Trescy tvoří pravidelný šestihran, dle von Misesse se pak jedná o elipsu. Šedivě vystínovaná oblast reprezentuje rozdíl mezi těmito hypotézami. [12]

2.8 Tvářitelnost, Křivka mezních přetvoření (FLC)

Volba vhodného materiálu pro výrobu tenkých karosářských dílů je zejména ovlivněna parametrem tvářitelnosti. Tímto parametrem je z praktického hlediska myšlena hlavně vhodnost daného materiálu pro operace hlubokého tažení. Nejčastější způsob vyhodnocení tvářitelnosti je pomocí takzvaného diagramu mezních přetvoření (forming limit diagram – FLD). Získaná křivka mezních přetvoření slouží jako jeden z hlavních vyhodnocovacích modelů, který numerická simulace využívá pro určení vyrobitelnosti daného plechového dílu automobilové karosérie. [13]

Postup určení křivky mezních přetvoření a sestavení FLD diagramu lze provést pomocí takzvané zkoušky tvářitelnosti, kdy je zkušební vzorek opatřen měrnou sítí a následně deformován. Existují různé druhy měrných sítí, které se liší dle zvoleného způsobu vyhodnocování. V rámci testu je pak vyhodnocena míra deformace dané měrné sítě dle zvoleného způsobu vyhodnocování. Princip měření deformace měrné sítě a výsledný diagram mezních přetvoření lze pozorovat na Obrázku 14. [14]



Obrázek 14 - Diagram mezních přetvoření (Forming limit diagram - FLD) [14]

Měření tvářitelnosti materiálu a stanovení příslušného diagramu mezních přetvoření (FLD) se zejména provádí pomocí zkoušek tvářitelnosti dle Nakajimy či Marciniaka. [15]

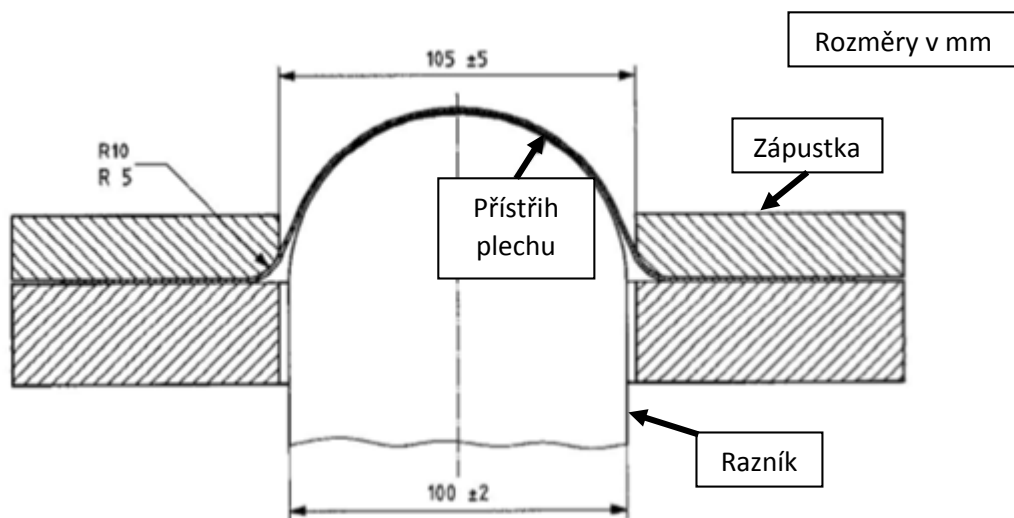
Výsledná poloha křivky mezních přetvoření je primárně ovlivněna mechanickými vlastnostmi zkoušeného materiálu a specifickými parametry zkušebního procesu. Vyšší hodnoty parametrů jako je tloušťka přístřihu, součinitele plastické anizotropie r a exponentu deformačního zpevnění n mají za následek posunutí křivky v diagramu směrem výše. Zvýšení meze kluzu či rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ naopak vede k posunu křivky směrem dolů. [16]

Aplikace FLD při analýze vyrobitelnosti umožňuje primárně stanovit bezpečnou oblast hlubokého tažení, dále pak i předpovídat kritické oblasti vzniku zvlnění či trhlin. Rovněž umožňuje určit míru deformace či definovat vhodné pracovní podmínky, jako je například síla přidržovače nebo lubrikace. [16]

2.8.1 Zkouška dle Nakajimy

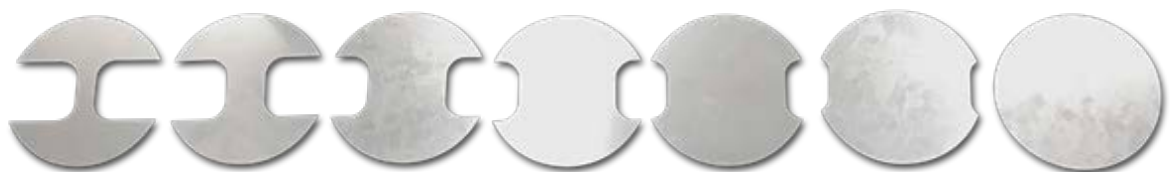
Určení křivky mezních přetvoření lze experimentálně určit pomocí takzvané zkoušky dle Nakajimy. Princip zkoušky spočívá ve zkoumání deformace označeného zkušební vzorku. Zkušební vzorek je nejprve uchycen pomocí přidržovače a následně deformován pomocí půlkulového razníku až do porušení. V důsledku silového působení dochází k vypínání vzorku, což má za následek změnu tvaru dříve nanesených značek. Rozměry značek v místě porušení jsou po testu změřeny, a to za účelem zjištění limitních deformací. [15]

Princip a postup zkoušky je předepsán dle normy ČSN EN ISO 12004-2. Schématické znázornění zkoušky dle Nakajimy je na Obrázku 15. Rozměry nástrojů jsou přímo specifikovány dle normy, kdy průměr razníku činí 100 ± 2 mm a průměr zápustky je stanoven na 105 ± 5 mm. [17]



Obrázek 15 - Schématické znázornění zkoušky dle Nakajimy, [17]

Zkušební vzorky pro experimentální určení křivky mezních přetvoření dle Nakajimy a Marciniaka lze pozorovat na následujícím Obrázku 16. Těmito vzorky jsou geometricky specifické plechové výstřižky. [18]

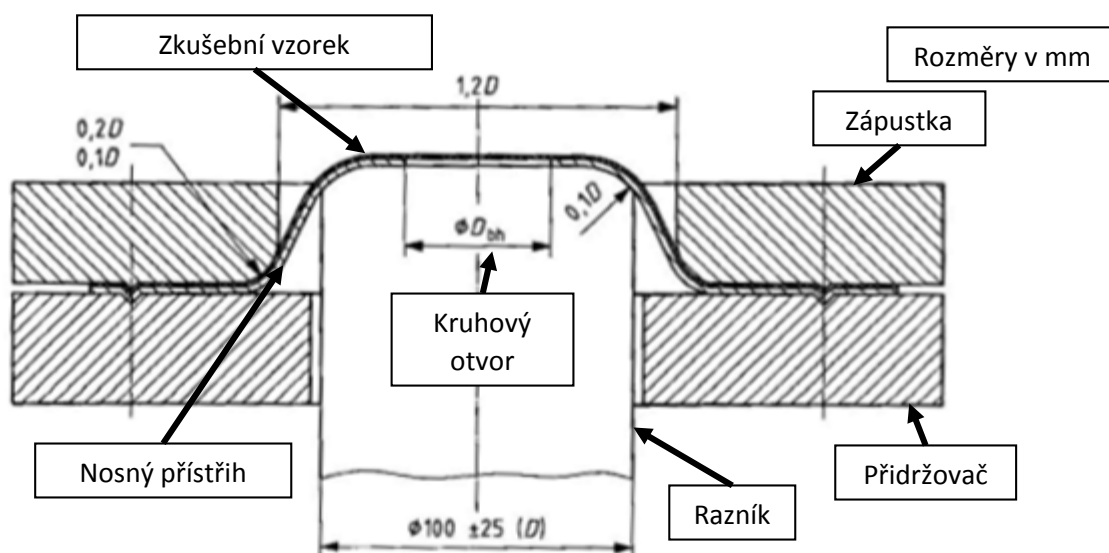


Obrázek 16 - Zkušební vzorky pro určení křivky mezních přetvoření [19]

Výše zobrazené vzorky se primárně liší šířkou, která přímo ovlivňuje napěťový stav materiálu při zkušebním procesu. Tento metodický postup umožňuje zkoumat chování materiálu v podmínkách hlubokého tažení (kruhový vzorek), ale i v případě zatížení jednoosým tahem (vzorek s nejnižší šířkou). Všechny zkušební vzorky jsou v rámci zkoušky deformovány až do porušení integrity materiálu. Po ukončení zkoušky je pro každý vzorek určena hodnota maximální deformace. Na základě hodnot maximálních deformací všech vzorků lze určit výslednou křivku mezních přetvoření (FLC) daného materiálu. [19]

2.8.2 Zkouška dle Marciniaka

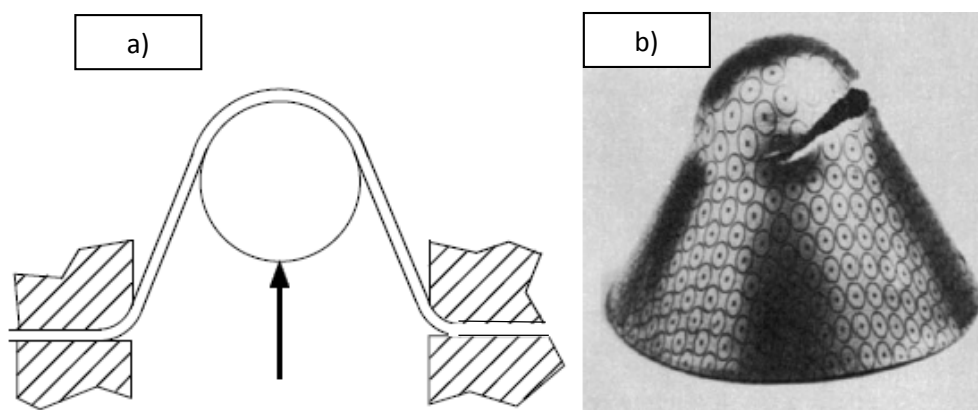
Experimentální určení křivky mezních přetvoření lze taktéž provést pomocí zkoušky dle Marciniaka, která je principálně velmi podobná zkoušce dle Nakajimy a je taktéž specifikována dle normy ČSN EN ISO 12004-2. Hlavní rozdíl spočívá zejména v užití plochého válcového razníku, který je za účelem snížení vlivu tření opatřen kruhovým otvorem. Stejně jako v případě zkoušky dle Nakajimy je využito zkušebních vzorků s různou šířkou za účelem získání celé křivky mezních přetvoření. Schématické uspořádání této zkoušky lze pozorovat na následujícím Obrázku 17. [15], [17]



Obrázek 17 - Schématické znázornění zkoušky dle Marciniaka, [17]

2.8.3 Zkouška Fukui

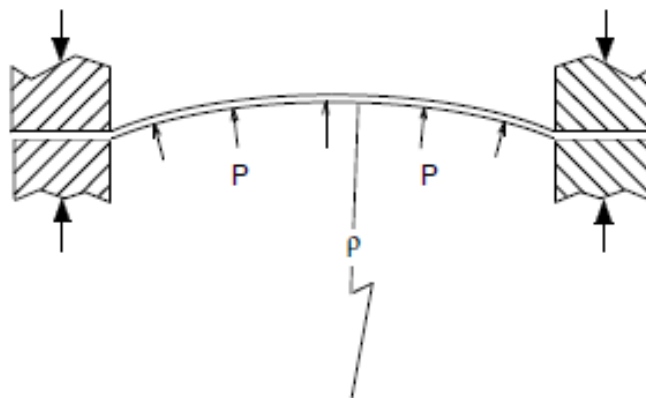
Jedním z možných experimentálních postupů testování tvárnosti materiálu je například kuželová zkouška Fukui. V rámci zkoušky dochází k vytažení kuželového výtažku, a to v důsledku silového působení razníku s kulovou hlavou. Zkušební vzorek je silově namáhán až do porušení integrity a vzniku první trhliny. Princip zkoušky je znázorněn na následujícím Obrázku 18. [10]



Obrázek 18 - a) Schématické znázornění zkoušky Fukui, b) Porušený zkušební vzorek [10]

2.8.4 Hydraulická zkouška vyboulením

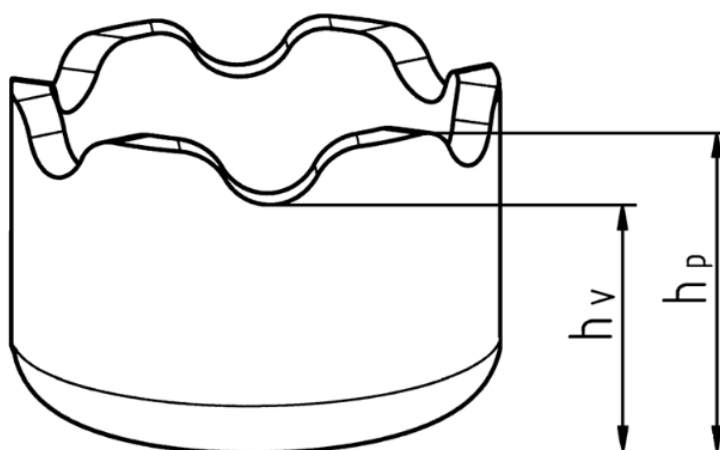
Specifickou zkouškou tvářitelnosti je takzvaná hydraulická zkouška vyboulením (hydraulic bulge test), kdy je testovaný přístřih plechu deformován pomocí tlakového média. Tímto médiem může být například olej či viskózní kapalina. Princip zkoušky spočívá v uchycení plechu po obvodu a jeho následné deformaci, která vzniká v důsledku silového působení od tlakové kapaliny. Materiál je deformován do prostoru kruhové zápustky, a to až do bodu kdy dojde k porušení materiálu. Schématické uspořádání hydraulic bulge testu lze pozorovat na následujícím Obrázku 19. Primární výhodou této zkoušky je zejména absence vlivu tření. [15] Princip a postup této zkoušky je blíže předepsán dle normy ČSN EN ISO 16808.



Obrázek 19 - Schématické znázornění hydraulické zkoušky vyboulením [10]

2.8.5 Earing test

Důležitou zkouškou pro stanovení náchylnosti materiálu ke tvorbě cípů je takzvaný Earing test. V rámci zkoušky dochází k vytažení dutého válcového výtažku z přístřihu plechu. Takto vytvarovaný výtažek zpravidla nedisponuje plochou obvodovou hranou, nýbrž dochází ke vzniku vln či prohlubní. Výsledná náchylnost ke tvorbě cípů je pak vyjádřena v procentech a určí se dle výšky prohlubní a vrcholů cípů, které na okraji výtažku vznikají. Princip zkoušky je pro ocelové materiály upraven dle normy ISO 11531. Příklad výtažku pro vyhodnocení náchylnosti ke vzniku cípu lze pozorovat na následujícím Obrázku 20. [20], [18]

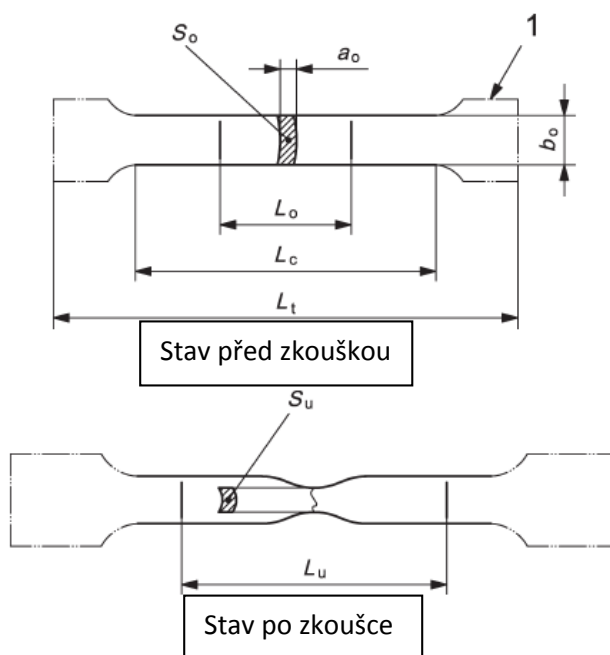


Obrázek 20 - Náchylnost ke tvorbě cípů - Earing test [18]

2.9 Zkouška tahem, Základní mechanické vlastnosti

Zkouška tahem spočívá v postupném zatěžování normalizovaného zkušebního tělesa, které se v důsledku tohoto zatížení prodlužuje. Zkouška probíhá do bodu, kdy dojde k porušení integrity a lomu tělesa. [21]

Zkouška se provádí dle mezinárodně uznávaného standardu ČSN EN ISO 6892-1, který specifikuje, že zkušební tyče mohou být kruhového, čtvercového, obdélníkového či prstencového průřezu. Dále je pak možno použít zkušební vzorek plochý, jehož předepsané rozměry lze pozorovat na následujícím Obrázku 21. [22]



Obrázek 21 - Tvar plochého zkušební vzorku dle standardu ISO 6892-1 [22]

Zkušební vzorky mohou být poměrné či nepoměrné. Preferované jsou poměrné tyče, které jsou specifické proporčním vztahem mezi původní délkou L_0 [mm] a původní plochou průřezu zkušební tyče S_0 [mm], kdy tato závislost je vyjádřena pomocí následujícího vztahu:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (13)$$

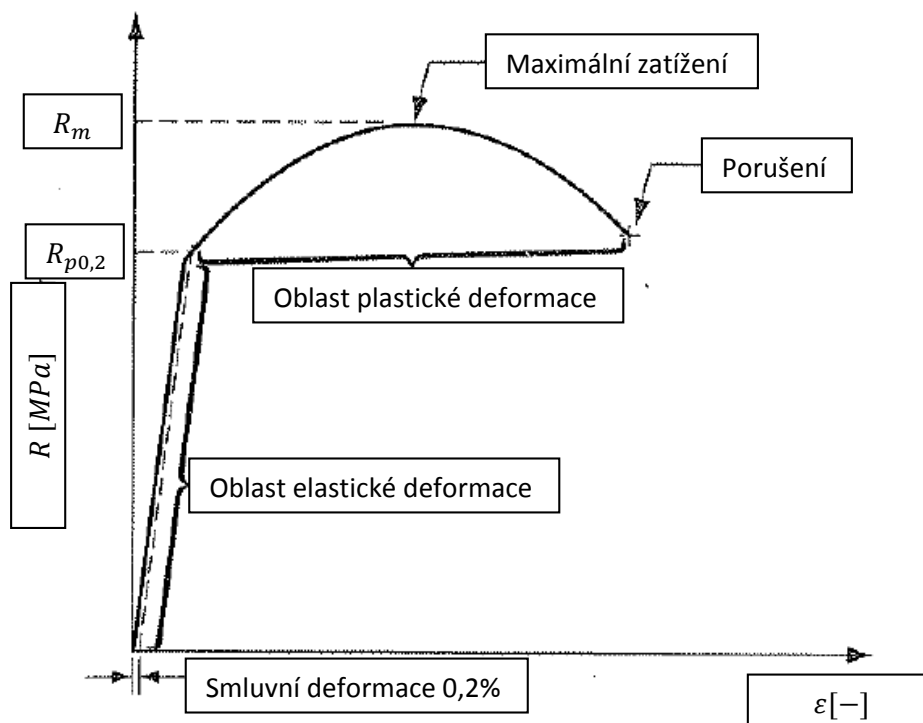
[22]

Součinitel k reprezentuje takzvaný koeficient proporcionality a zpravidla nabývá hodnoty $k = 5,65$. Pokud délka L_0 dle vzorce č. 13 vychází menší než 20 mm, pak je nutné uvažovat hodnotu $k = 11,3$. [22]

Zkouška se provádí v rozmezí teplot 10 - 35°C a příslušná teplota musí být zaznamenána. Přítomnost teplotních gradientů může vést k nárůstu nepřesnosti měření, které mohou zapříčinit jeho znehodnocení. V případě zkoušení v laboratorních podmínkách musí být teplota v rozmezí 23 ± 5 °C. [22]

Z hlediska správného provedení měření je rovněž nezbytně nutné vhodné upnutí vzorku do trhačího stroje, které musí být provedeno tak, aby nedocházelo k vyklouznutí zkušební vzorku z čelistí. Zároveň musí být upnutí provedeno tak, aby působící síla byla co nejvíce jednoosá a nedocházelo například k ohybu. Prostředky pro upnutí mohou být například zoubkované klíny nebo závitové úchyty pro kruhové tyče. [22]

Výstupem zkoušky tahem je pracovní diagram. Pracovní diagram zobrazuje závislost síly F a absolutního prodloužení zkušební tělesa ΔL . Smluvní diagram pak ukazuje závislost zatěžujícího napětí R [MPa] na poměrné deformaci zkušební tělesa ε [-]. Příklad smluvního diagramu lze pozorovat na Obrázku 22. [1]



Obrázek 22 - Příklad smluvního diagram [1]

V první fázi se zatěžované těleso deformuje pouze elasticky. Tato oblast je specifická lineární závislostí působícího napětí a deformace, která je popsána pomocí Hookova zákona. Tento zákon je definován dle následující matematické formulace:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (14)$$

[1]

Po dosažení meze kluzu přestává platit Hookův zákon a materiál se začíná deformovat plasticky. V rozmezí od meze kluzu do meze pevnosti dochází k homogennímu nárůstu deformace. Po překročení meze pevnosti začíná docházet k poklesu napětí. V této oblasti diagramu se materiál deformuje již nehomogenně, což se projevuje snižováním průřezu a tvorbou takzvaného krčku. Oblast je zakončena porušením integrity materiálu a lomem zkušební tělesa. [1]

Mechanické vlastnosti získané ze zkoušky tahem:

Mez pevnosti v tahu R_m

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

Mez pevnosti v tahu je napětí, které odpovídá maximální zatěžující síle F_m vztahované vůči původní ploše průřezu zkušební tělesa S_0 . Po jejím překročení dochází k poklesu zatížení a tvorby krčku. [1], [22],

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

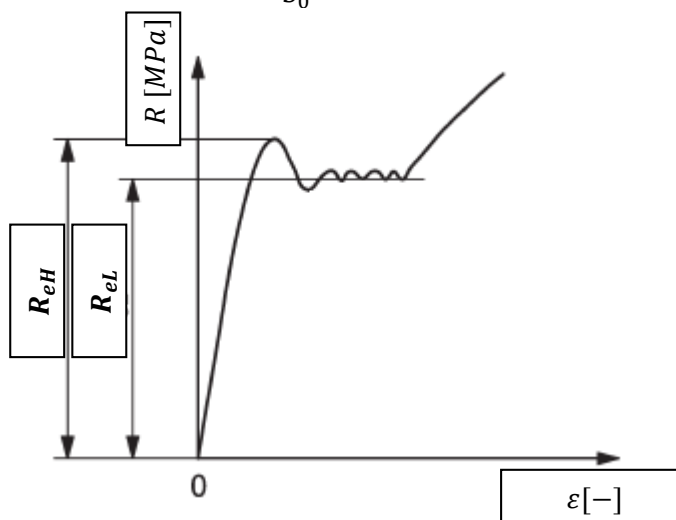
$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (16)$$

Smluvní mez kluzu představuje napětí, kterého je dosaženo, když je hodnota deformace rovna smluvní hodnotě 0,2 %. [1], [22]

Výrazná mez kluzu R_e

Zpravidla nízkouhlikové oceli vykazují takzvanou výraznou mez kluzu, kdy po jejím překročení dojde k dočasnému poklesu zatížení a vzniku Ludersovy deformace. [21] Příklad nízkouhlikové oceli, která vyazuje toto chování lze pozorovat na následujícím Obrázku 23.

$$R_e = \frac{F_{eH}}{S_0} [MPa] \quad (17)$$



Obrázek 23 - Smluvní diagram oceli s výraznou mezí kluzu [22]

Tažnost A

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (18)$$

Tažnost, vyjádřena v procentech, představuje permanentní prodloužení měřené délky po přetržení ($L_u - L_0$), které je vztahené k původní délce zkušebního tělesa L_0 . [22]

Kontrakce Z

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (19)$$

Kontrakce reprezentuje největší změnu příčného průřezu zkušebního tělesa, která byla způsobena v důsledku tahové zkoušky. [22]

2.10 Deformační zpevnění – exponent deformačního zpevnění n

Plastická deformace materiálu při teplotách nižších než je teplota rekystalizace má za následek takzvané deformační zpevnění, kdy dochází k nárůstu pevnostních charakteristik, zejména tedy meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti. Naopak však dochází k poklesu plastických charakteristik, zejména tažnosti. Závislost deformace na napětí, která slouží k určení křivky deformačního zpevnění, se nejčastěji určuje ze zkoušky tahem. Postup stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem je blíže upraven dle normy ČSN ISO 10275. [10]

Křivka deformačního zpevnění vychází ze závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci a je matematicky aproximována dle následujícího vztahu (20). [10]

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (20)$$

Výše uvedená rovnice 20 je takzvaný mocenský zákon (Hollomonova rovnice), kde σ představuje skutečné napětí, ε představuje skutečnou deformaci a symboly K a n představují konstanty. Empirická konstanta n je takzvaný exponent deformačního zpevnění. [10]

Exponent deformačního zpevnění je důležitým faktorem zejména pro operace vypínání. Pro tyto aplikace se primárně využívá jeho střední hodnota n_m , která je stanovena dle následující rovnice (21). [23]

$$n_m = \frac{1}{4} \cdot (n_0 + 2 \cdot n_{45} + n_{90}) \quad (21)$$

V závislosti na střední hodnotě deformačního exponentu n_m lze hodnotit tvářitelnost daného materiálu, a to dle následujícího rozdělení. [23]

$n_m < 0,215$ nízká tažnost

$n_m = 0,215 - 0,25$ dobrá tažnost

$n_m > 0,25$ vynikající tažnost

2.11 Součinitel plastické anizotropie r

Závislost mechanických vlastností na zvoleném směru daného souřadného systému nazýváme anizotropií materiálu. Nestejnoměrnost mechanických vlastností představuje důležitý faktor z hlediska hodnocení tvářitelnosti materiálu při plošném tváření. Rozdílnost vlastností ve směru tloušťky plechu nazveme plastickou anizotropií, která se určí jako poměr skutečné plastické deformace ve směru šířky ke skutečné plastické deformaci ve směru tloušťky. Jedná se o bezrozměrnou směrovou veličinu, která je upravena normou ČSN ISO 10113 a určí se dle následující rovnice (22). [23], [24]

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_t} \quad (22)$$

Hodnota plastické anizotropie se pro daný materiál určí ve směrech 0° (směr válcování), 45° a 90° . Z těchto hodnot se následně provede určení váženého průměru součinitele normálové anizotropie r_m (viz rovnice 23), který je jedním z nejdůležitějších ukazatelů hlubokotažnosti. [23]

$$r_m = \frac{1}{4} \cdot (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad (23)$$

Náchylnost materiálu ke tvorbě cípů je vyjádřena pomocí takzvaného součinitele plošné anizotropie, který je dán dle následujícího vztahu (24). [23]

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad (24)$$

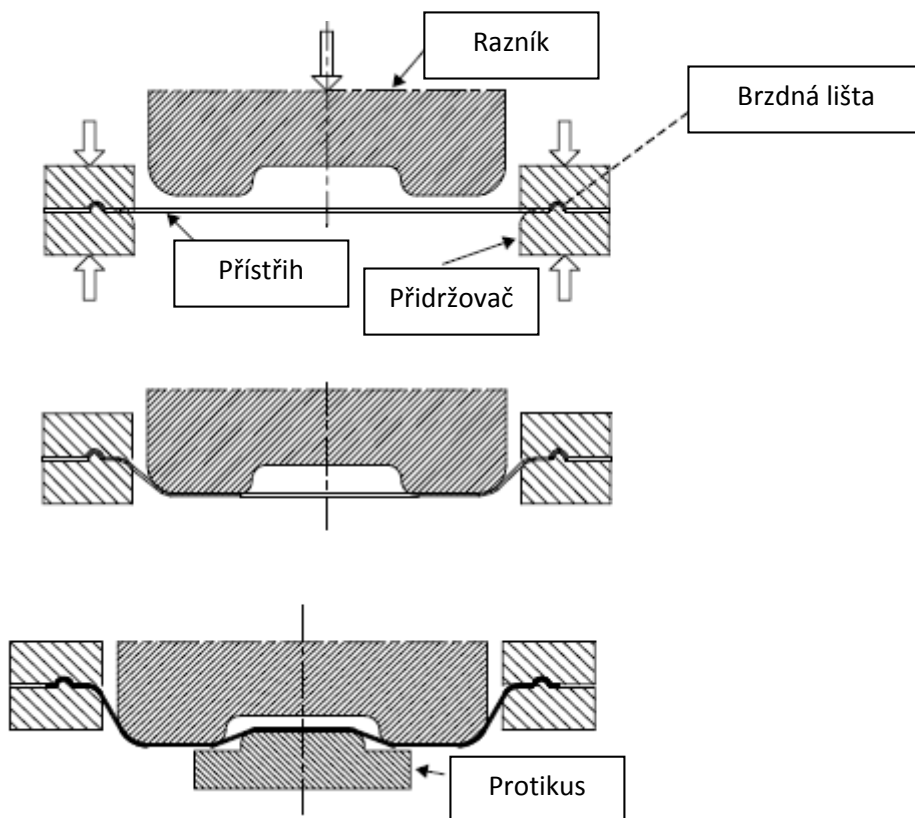
3 Princip výroby výlisku

Výroba součástí automobilové karosérie začíná polotovarem, kterým je tenký karosářský plech. Tyto tenké plechy jsou v požadované tloušťce a šířce vyrobeny pomocí technologie válcování a následně navinuty do takzvaného svitku. Svitok je dodán do lisovny příslušného výrobního závodu a dle potřeby následně rozstříhán na dílčí nástřihy pro individuální plechové komponenty. Tvar a velikost nástřihu se tedy primárně řídí geometrií vyráběné součásti. Takto připravené nástřihy jsou poté uskladněny pro využití při procesu lisování. [14]

3.1 Lisování

Technologie lisování představuje proces tvarování nehlubokých plechových dílů pomocí vypínání přístřihu plechu přes tvarový profil razníku a matrice. Nástřih plechu je v rámci procesu nejprve sevřen přidržovačem podél vnější obvodové hrany. Přidržovač svírá plech takovým způsobem, aby mu bylo umožněno částečné vtahování do pracovního prostoru nástroje, avšak současně musí působit dostatečnou silou tak, aby docházelo k vypínání materiálu. Silový efekt přidržovače je zpravidla řízen pomocí takzvaných brzdných lišt, které produkují větší sílu přidržení než plochý povrch. Následně dochází k vypínání plechu přes tvarovou plochu tažníku, a to až do sevření nástroje. [25]

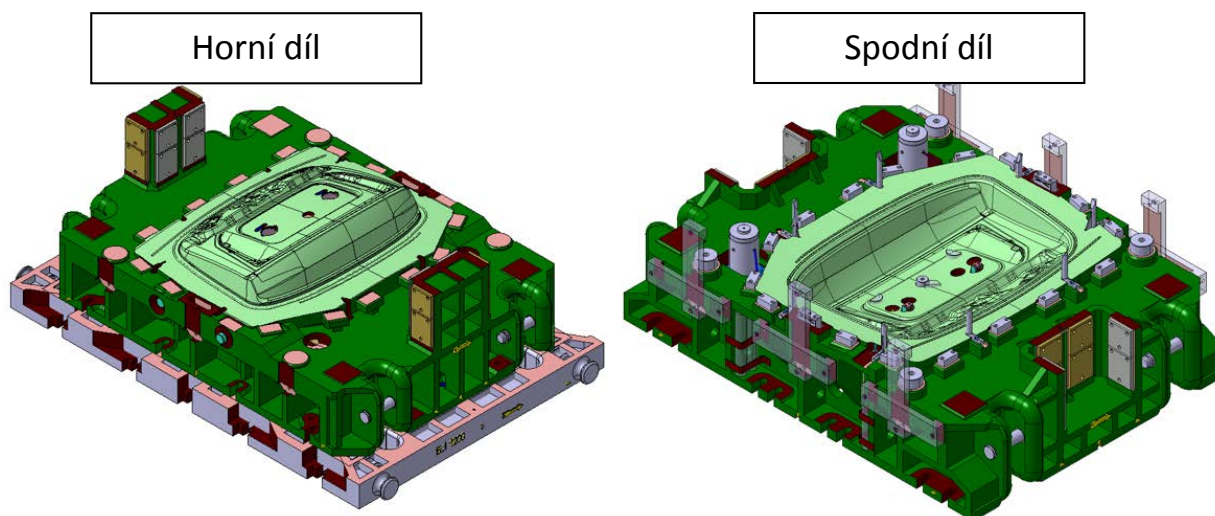
Lisování představuje základní proces výroby součástí automobilové karosérie, který probíhá v několika operacích. Přístřih plechu je nejprve tvarován v rámci operace hlubokého tažení, které je takzvaně dvojčinné, což znamená, že v průběhu tváření dochází zvlášť k pohybu přidržovače a razníku. Základní schématické znázornění tohoto tvářecího procesu lze pozorovat na následujícím Obrázku 24. [25]



Obrázek 24 - Schématické znázornění jednoduchého lisovacího procesu [25]

Po operaci hlubokého tažení následují další střížné a kalibrační úkony, jejichž množství je závislé na složitosti geometrie lisované součásti. [25]

Ukázku reálného sériového nářadí pro operaci hlubokého tažení lze pozorovat na Obrázku 25. Horní díl je v tomto případě tažník, který je umístěn na pohyblivém beranu klikového lisu. Spodní díl v tomto případě reprezentuje matici.



Obrázek 25 - Příklad konstrukce lisovacího nářadí pro operaci hlubokého tažení

3.2 Modelování tvářecích procesů – numerická simulace

Technologie modelování tvářecího procesu mají v rámci inženýrské analýzy tři důležité cíle. V první řadě je analýza zacílena na optimalizaci a eliminaci případných chyb v rámci návrhu výrobního procesu či nástroje. Zadruhé tato analýza umožňuje navrhnout požadovanou součást tak, aby byla snadno a efektivně vyrobitelná. V neposlední řadě pak umožňuje snadno a efektivně řešit problémy, které se mohou objevit v již navržených výrobních procesech. Modelování tvářecího procesu tak vede ke snižování nákladů spojených s výrobou nářadí a zároveň umožňuje lépe pochopit příslušný technologický proces. [26]

V rámci analýzy pomocí metody konečných prvků je tvářené těleso reprezentováno souborem subdomén, které se nazývají konečné prvky. Tyto prvky jsou vzájemně vázány sadou uzlů a definují lokalizované hmotnostní a tuhostní vlastnosti modelu. Každý element je popsán pomocí rovnic rovnováhy a příslušných fyzikálních předpokladů, které společně utváří systém rovnic. Tento systém rovnic je následně řešen za účelem získání neznámých veličin. Obecně platí, že metoda analýzy pomocí metody konečných prvků je aproximativního charakteru a její přesnost se odvíjí od množství použitých elementů. [26]

Popis deformace kontinua lze provést pomocí dvou metod, kterými jsou Lagrangeova a Eulerova. Lagrangeova metoda využívá souřadnice materiálového bodu v nezdeformovaném stavu jako nezávislé proměnné, Eulerova metoda naopak tyto souřadnice využívá v deformovaném stavu materiálového bodu. Z tohoto důvodu je v případě Eulerovy metody měrná síť prostorově fixována. V případě Lagrangeovy metody se naopak měrná síť pohybuje s materiálem. Postup výpočtu lze provést implicitně a explicitně, kdy implicitní postup je spíše aplikován v případě menších měrných sítí a postup explicitní v případě větších a složitějších sítí. [26], [27]

3.3 Oceli pro hluboké tažení

Plechové komponenty automobilové karosérie se často vyznačují poměrně komplexní a tvarově náročnou geometrií. Z tohoto důvodu je nezbytně nutné zvolit takový materiál, který bude plně schopen prodělavat operace hlubokého tažení, a to bez ztráty strukturní integrity. Vhodným materiálem pro tyto operace jsou takzvané hlubokotažné oceli, které díky své čistě feritické matici dosahují vyhovující tváritelnosti. Z tohoto důvodu tak umožňují vytvářet i vysoce komplexní díly, kterými jsou například vnitřní či vnější panely dveří. [28], [29]

V automobilovém průmyslu se využívají oceli pro hluboké tažení, jejichž dodací podmínky jsou specifikovány dle evropských norem ČSN EN 10152 a ČSN EN 10346. Norma EN 10152 specifikuje ocelové ploché výrobky válcované za studena, které jsou elektrolyticky pozinkované a určené pro tváření za studena. Tyto oceli jsou rovněž kvalifikovány dle standardu německé asociace automobilového průmyslu (VDA). Oproti tomu norma EN 10346 zahrnuje ploché ocelové produkty, které jsou kontinuálně žárově zinkovány. Označení těchto ocelí DX pak určuje hlubokotažné oceli bez specifikovaného výrobního postupu. Přibližné chemické složení těchto materiálů lze pozorovat v následující Tabulce 1. [30], [31], [32]

Tabulka 1 - Chemické složení hlubokotažných DC, DX ocelí [28], [30], [31], [32]

Hlubokotažné oceli válcované za studena							
Značení dle VDA 239-100	Značení dle EN 10130	Chemické složení [v hm. %]					
		C Max.	P Max.	S Max.	Mn Max.	Ti Max.	-
CR	DC01	0,12	0,045	0,045	0,6	-	-
CR2	DC03	0,1	0,035	0,035	0,45	-	-
CR3	DC04	0,08	0,030	0,030	0,4	-	-
CR4	DC05	0,06	0,025	0,025	0,35	-	-
CR5	DC06	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3	-
CR6	DC07	0,01	0,020	0,020	0,2	0,2	-
Hlubokotažné oceli, nespecifikovaný způsob výroby							
Značení dle EN 10346	-	Chemické složení [v hm. %]					
		C	P	S	Mn	Si	Ti
DX51D	-	0,18	0,12	0,045	1,20	0,50	0,30
DX52D - DX58D	-	0,12	0,10	0,045	0,60	0,50	0,30

V tabulce uvedené chemické složení ocelí jakosti CR- CR6 (DC01 – DC07) je specifikováno dle příslušné normy ČSN EN 10152. Oproti tomu chemické složení ocelí typu DX je specifikováno dle normy ČSN EN 10346.

Jednotlivé oceli se v závislosti na dané materiálové jakosti částečně liší chemickým složením a rozptylem mechanických vlastností. Obecně platí, že ocel vyšší jakosti poskytuje užší a tedy i přesnější pásmo jednotlivých mechanických vlastností. Materiál je dodáván formou tenkého plechu požadované tloušťky, který je navinutý do takzvaného svitku. Za účelem zvýšení protikorozní ochrany je plech již z výroby opatřen vrstvou zinku dle specifického označení GI či EG, čímž se rozlišuje žárově (GI) či galvanicky (EG) nanesený zinek. [28], [29]

Mechanické vlastnosti vybraných hlubokotažných ocelí lze pozorovat v následující Tabulce 2. Uvedené hodnoty jsou spíše orientačního charakteru a částečně se liší dle dodavatele či v závislosti na tloušťce použitého plechu.

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti DC a DX ocelí [28], [30], [31], [32]

Hlubokotažné oceli válcované za studena					
Značení dle VDA 239-100	Značení dle EN 10130	Mechanické vlastnosti			
		$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	$A_{80,min}$ [%]	$r_{90,min}$
CR	DC01	-	270 – 410	28	–
CR2	DC03	140 – 240	270 – 370	34	1,3
CR3	DC04	140 – 210	270 – 350	38	1,6
CR4	DC05	140 – 180	270 – 330	40	1,9
CR5	DC06	110 – 170	270 – 330	41	2,1
CR6	DC07	110 – 170	250 – 310	44	2,5
Hlubokotažné oceli, nespecifikovaný způsob výroby					
Značení dle EN 10346	-	Mechanické vlastnosti			
		R_e [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	$A_{80,min}$ [%]	$r_{90,min}$
DX51D	-	–	270 – 500	22	–
DX52D	-	140 – 300	270 – 420	26	–
DX53D	-	140 – 260	270 – 380	30	–
DX54D	-	120 – 220	260 – 350	36	1,6
DX55D	-	140 – 240	270 – 370	30	–
DX56D	-	120 – 180	260 – 350	39	1,9
DX57D	-	120 – 170	260 – 350	41	2,1
DX58D	-	120 – 160	260 – 330	43	2,3

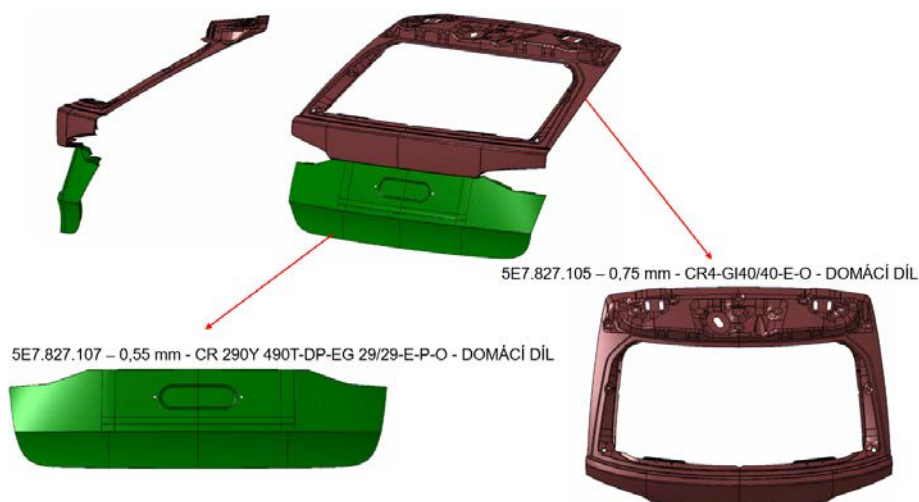
Výše uvedené hodnoty pro materiály CR – CR6 (DC01 – DC07) jsou specifikovány dle normy ČSN EN 10152. Mechanické vlastnosti pro oceli DX jsou stanoveny dle příslušné normy ČSN EN 10346.

4 Experimentální část

Experimentální část této diplomové práce se zabývá reálnou aplikací numerických simulací při výrobním procesu lisování a lemování tenkých plechů pro účely automobilového průmyslu. Účelem experimentu je zkoumání vlivu dílčích nastavení softwaru AutoForm na výslednou kvalitu vyráběných plechových dílů pátých dveří vozu Škoda Octavia IV. generace (SK382). Zároveň je zkoumán technologický proces lemování celé sestavy pátých dveří. Tento experiment byl prováděn ve spolupráci s oddělením konstrukce lisovacího nářadí (PSW-P) společnosti ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi.

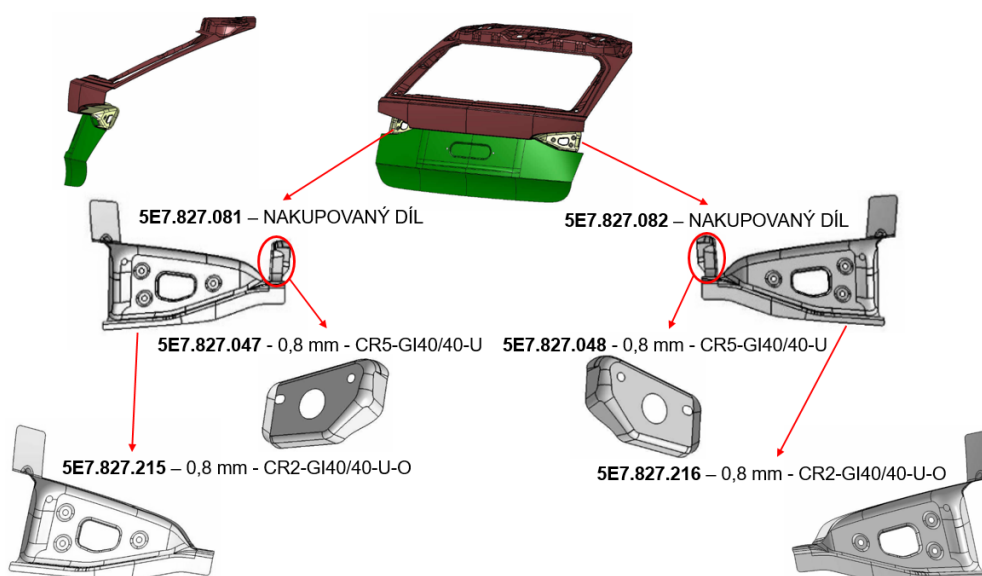
4.1 Sestava pátých dveří SK382 – dělení

Vnější část sestavy pátých dveří je tvořena plechovými díly nesoucími označení 5E7.827.105 a 5E7.827.107, které lze pozorovat na následujícím Obrázku 26. Výroba těchto komponent je prováděna interně v rámci společnosti ŠKODA AUTO a.s., tudíž se jedná o takzvané domácí díly.



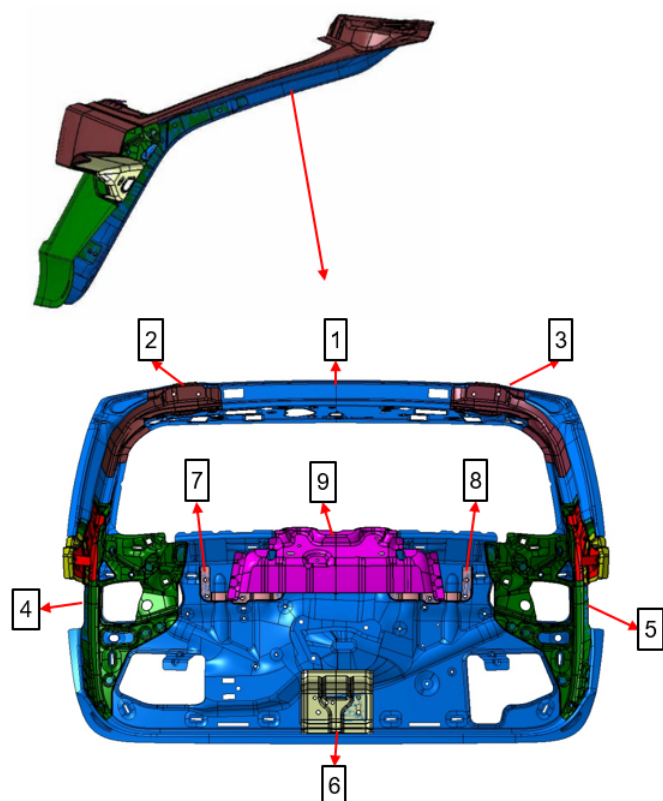
Obrázek 26 - Sestava 5. dveří SK382 - domácí díly

Nedílnou součástí sestavy jsou strukturální komponenty, které jsou poptávány od externích dodavatelů. Rozdělení a popis těchto dílů lze pozorovat na následujícím Obrázku 27.



Obrázek 27 - Sestava 5. dveří SK382 – díly 5E7.827.105, 5E7.827.107 + strukturální komponenty

Kompletní sestava je pak doplněna o vnitřní plech 5E7.827.159 a jeho příslušné strukturální komponenty, ty lze pozorovat na následujícím Obrázku 28.



1) 5E7.827.159 – DOMÁCÍ DÍL

NAKUPOVANÉ DÍLY:

2) 5E7.827.177

3) 5E7.827.178

4) 5E7.827.169

5) 5E7.827.170

6) 5E7.827.173

7) 5E7.827.141

8) 5E7.827.142

9) 5E7.827.219

Obrázek 28 - Sestava 5. dveří SK382 - díl 5E7.827.159 + strukturální komponenty

Znalost stavu a chování externě dodávaných komponent je nezbytně nutná pro simulaci procesu lemování, neboť jejich vlivem dochází k ovlivnění celé sestavy pátých dveří.

4.2 Rámcový výrobní postup

Geometrie každého vyráběného dílu je nejprve navržena v centru technického vývoje, odkud je návrh následně předán na oddělení konstrukce lisovacího nářadí. V rámci oddělení se provede koncepční návrh, tedy návrh metodického plánu a analýza vyrobiteľnosti. Pokud analýza vyrobiteľnosti odhalí nevyrobiteľnou geometrii, je nezbytně nutné na daném díle provést příslušné úpravy. Zároveň se provádí testování navrženého lisovacího procesu na prototypovém nářadí. Účelem tohoto kroku je eliminace případných chyb či problémů před odlitím nástroje z tvárné litiny. Veškeré úpravy odlitého nástroje jsou nákladné a časově náročné, tudíž je snaha tyto tvarové korekce limitovat. Tento vývojový stupeň je ukončen jedním ze tří milníků, a to milníkem nazvaným P-Freigabe. V rámci P-Freigabe dochází k uvolnění nehmotné přípravy, což znamená, že díl splňuje parametry vyrobiteľnosti a daná výrobní metoda byla schválena. Následně se přistupuje k tvorbě konstrukčních dat, tedy ke tvorbě modelů lisovacích nástrojů pro jednotlivé operace. Tento vývojový stupeň je ukončen milníkem nazvaným G-Freigabe, který navržené nástroje uvolňuje do odlitků. V tomto bodě už tedy dochází k výrobě lisovacích nástrojů, které jsou nejprve vymodelovány z polystyrénu a následně odlity z tvárné litiny. Případné další korekce tvaru už musejí být menší, než je zvolený přídavek na obrábění, řádově tedy do 5 milimetrů. Poslední milník, nazvaný B-Freigabe, pak symbolizuje uvolnění do hmotné přípravy, kdy je daný lisovací nástroj plně uvolněn do výroby a převezen do lisovny.

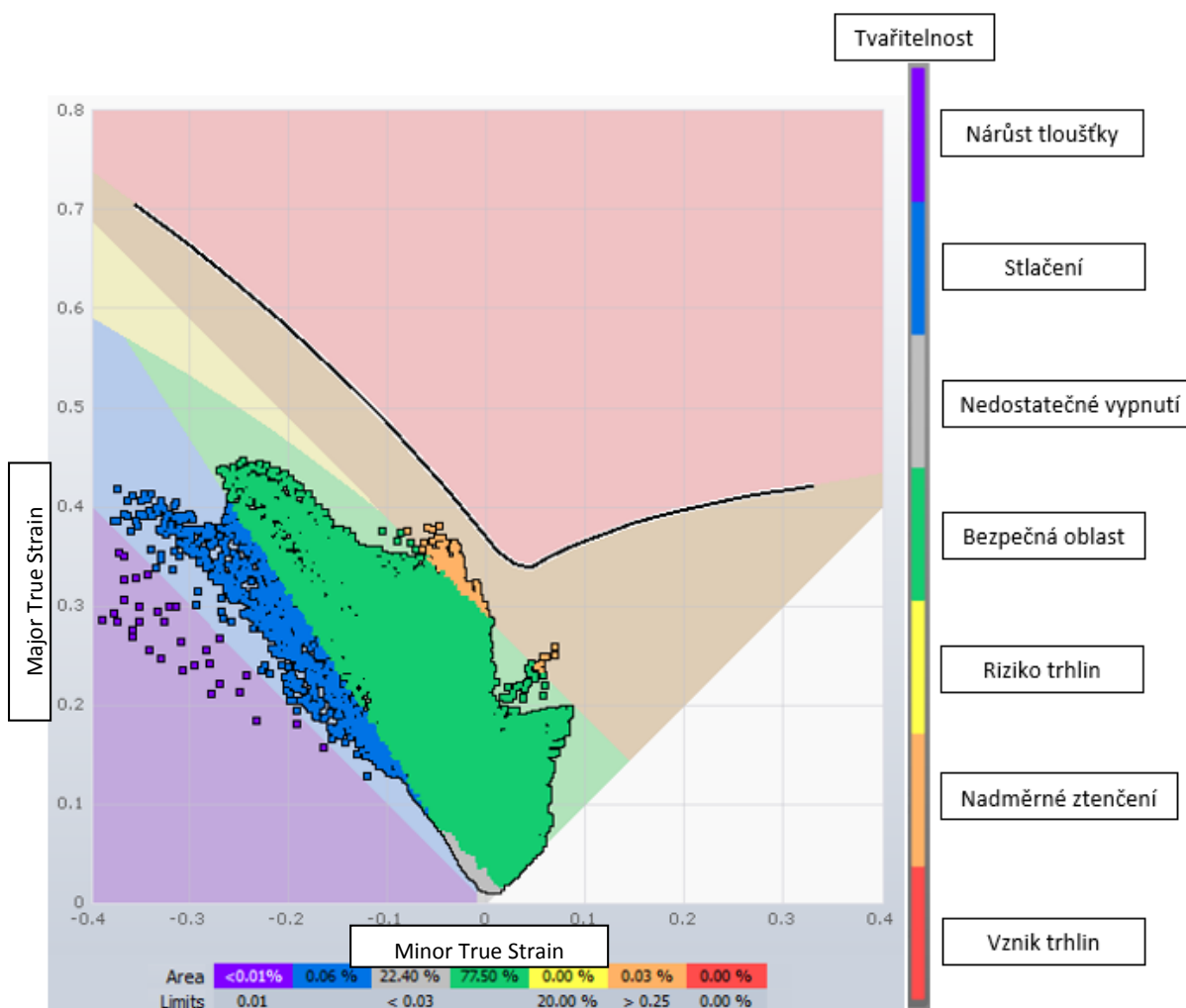
4.3 Návrh experimentu

Simulace lisovacího procesu probíhá v prostředí softwaru AutoForm, který aproximuje výrobní proces pomocí metody konečných prvků. V rámci této kapitoly je zejména diskutován metodický postup experimentální simulace, včetně stručného popisu jednotlivých nastavení.

Vstupními daty jsou takzvaná NCM (frézovací) data pro stupeň B-Freigabe, která obsahují činné plochy nástrojů se všemi příslušnými korekcemi tvaru. Jedná se tedy o nejaktuálnější stav tvarových ploch reálného nářadí.

4.3.1 Vyhodnocení lisovatelnosti

Zajištění kvalitativně vyhovujícího dílu je pro automobilku nezbytné, neboť jakékoliv defekty mohou ovlivnit jak funkční, tak estetické vlastnosti dané plechové komponenty. Z tohoto důvodu je v rámci numerické simulace nezbytně nutné kontrolovat náchylnost na případné defekty a kompenzovat jakékoliv kvalitativní parametry, které překročily mezní hodnoty předepsané dle standardů kvality. Hlavními ukazateli, z hlediska vyrobitelnosti vyhovujícího výlisku, jsou diagram mezních přetvoření (FLD), ztenčení plechu (Thinning) a zvlnění povrchu (Wrinkles). Princip vyhodnocení vyrobitelnosti pomocí diagramu mezních přetvoření v prostředí softwaru Autoform lze pozorovat na následujícím Obrázku 29.



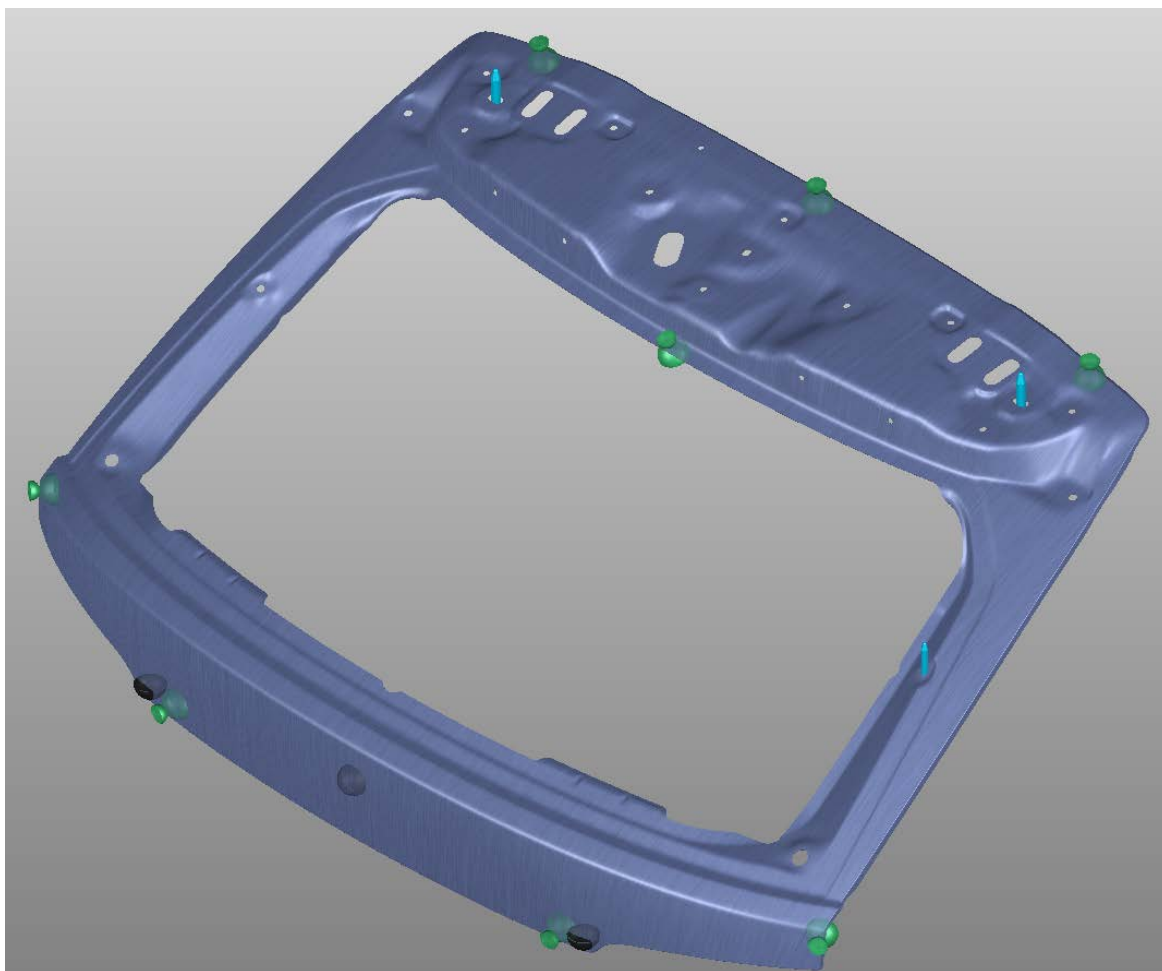
Obrázek 29 - Diagram mezních přetvoření (FLD) v prostředí Autoform

4.3.2 Analýza odpružení plechového dílu (Springback)

Jak již bylo v teoretické části uvedeno, materiál je po ukončení dané lisovací operace vystaven efektu odpružení, které vzniká v důsledku uvolnění elastické deformace. Software Autoform umožňuje tento jev měřit, a to pomocí dílčích nastavení metod vyhodnocení odpružení (springbacku).

Odpružení (springback) jednotlivých plechových dílů je, v rámci tohoto experimentu, měřeno dvěma hlavními způsoby. Nejprve je provedeno měření mezioperačního takzvaného volného odpružení (Free Springback), kdy je součást prostorově zavazbena dle automatického nastavení Autoformu a software z hlediska odpružení neuvažuje vliv gravitace. Tento způsob nastavení představuje nejjednodušší možnost definice odpružení, neboť uživatelský vstup je minimální.

Druhý způsob měření odpružení probíhá pomocí finálního skutečného měření (Real Measurement), kdy je daný plechový díl upnut dle předepsaných požadavků a podmínek, které jsou stanoveny měrovými protokoly daného dílu. Díl je tak nejprve ustaven na středící kolíky, které slouží k jeho zafixování. Následně dojde k sevření pomocí upínek (clampů) a provede se měření odpružení. Příklad uchycení dílu při reálném měření lze pozorovat na následujícím Obrázku 30, kde středící kolíky jsou vyznačeny světle modrou barvou a upínky (clampy) barvou zelenou.



Obrázek 30 - Simulace skutečného měření odpružení (springbacku)

Výsledné vyhodnocení míry odpružení je pak provedeno pomocí vzdálenosti odchýlení od referenční geometrie v normálovém směru.

4.3.3 Nastavení brzdných lišt

Účel brzdných lišt primárně spočívá v zafixování nástřihu pro operaci hlubokého tažení tak, aby nedocházelo k jeho posunutí v průběhu tvářecího procesu. Geometrie brzdných lišt a jejich silový efekt zároveň velice výrazně ovlivňují míru vtahování materiálu do dutiny pracovního nástroje, čímž přímo působí na distribuci materiálu během procesu tváření.

Z hlediska výpočtu numerické simulace se primárně rozlišují dva typy definice brzdných lišt, kterými jsou takzvané geometrické a adaptivní. Geometrické lišty představují tvarově naprosto přesné lišty, které jsou do simulace importovány jako součást funkčních ploch nástroje. Využití geometrických lišt tedy představuje nejpřesnější metodu výpočtu, která je ovšem pro software časově náročnější a simulace tak běží déle než v případě adaptivních lišt.

Druhá možnost definice brzdných lišt je pomocí takzvaných adaptivních lišt, které jsou definovány přímo v prostředí softwaru AutoForm. Tento způsob definice lišt umožňuje několik variant jejich nastavení pro snížení času výpočtu. Nejjednodušší způsob nastavení je pomocí takzvaných adaptivních liniových lišt, kdy se pro importovanou křivku, jenž specifikuje polohu lišt, provede definice konstantního profilu lišty. Na základě definovaných parametrů pak software uvažuje pouze silové působení lišty v průběhu tvářecího procesu, ale v rámci simulace už nedochází k jejímu vylisování a lišta se tak svou geometrií do daného procesu nepromítne. Složitější nastavení simulace lze v softwaru provést pomocí funkce profilové lišty, která se do procesu promítne i svou geometrií. Takto definovaná brzdná lišta zároveň umožňuje využít funkcí Flattening a Unflattening, které za účelem snížení času výpočtu vylisovanou lištu zploští (Flattening) a na konci operace hlubokého tažení jí opět vytvarují (Unflattening). Tímto způsobem lze tedy v rámci operace číslo 20 uspořit čas výpočtu a zároveň zlepšit míru tvarové návaznosti brzdných lišt.

Pro účely tohoto experimentu je v rámci nastavení všech variant využito geometrických lišt, které jsou do softwaru importovány jako součást funkčních ploch nástroje dle příslušných frézovacích (NCM) dat.

4.3.4 Koeficient tření

Důležitým parametrem nastavení numerické simulace je mazání, které výrazně ovlivňuje chování tvářeného plechu v průběhu všech operací, neboť přímo ovlivňuje koeficient tření μ . Software AutoForm z hlediska defaultního nastavení uvažuje třecí chování dle prostého Coulombova modelu. Uživatelem předepsaná hodnota koeficientu tření je tedy dynamická a program běžně uvažuje hodnotu $\mu = 0,15$. Právě tento způsob nastavení představuje předmět první simulace dle varianty číslo 1.

V rámci návrhu simulace dle varianty číslo 2 je využito funkce tlakové závislosti koeficientu tření, jehož vstupní hodnota je v tomto případě stanovena na $\mu = 0,12$. Tlaková závislost je programem aproximována pomocí modelu, který je dán dle níže uvedeného matematického předpisu a udává efektivní hodnotu koeficientu tření.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu \cdot \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^{(e-1)} \quad (25)$$

Z hlediska návrhu experimentu je tak hlavně zkoumán vliv dílčích nastavení koeficientu tření na výslednou tvářitelnost a ztenčení vybraných plechových dílů, jenž náleží sestavě 5. dveří ŠKODA OCTAVIA IV. generace.

4.4 Horní díl vnější 5E7.827.105 – Simulace lisovacího procesu

Díl 5E7.827.105 představuje horní pohledový díl sestavy pátých dveří, který svým designem a výslednou kvalitou výrazně ovlivňuje estetiku a funkční schopnost 5. dveří. Tento díl lze pozorovat na následujícím Obrázku 31.



Obrázek 31 - Horní díl vnější 5E7.827.105

4.4.1 Horní díl vnější 5E7.827.105 – Základní parametry

Následující Tabulka 3 znázorňuje příslušné parametry tohoto dílu, včetně jeho přesných mechanických vlastností, definovaných dle materiálových dat softwaru AutoForm. Dále je zde uvedeno chemické složení použité hlubokotažné oceli (DC05), které je specifikováno dle normy ČSN EN 10152 a odpovídá jakosti CR4.

Tabulka 3 - Díl 5E7.827.105 – Základní parametry, chemické složení, mechanické vlastnosti, [31]

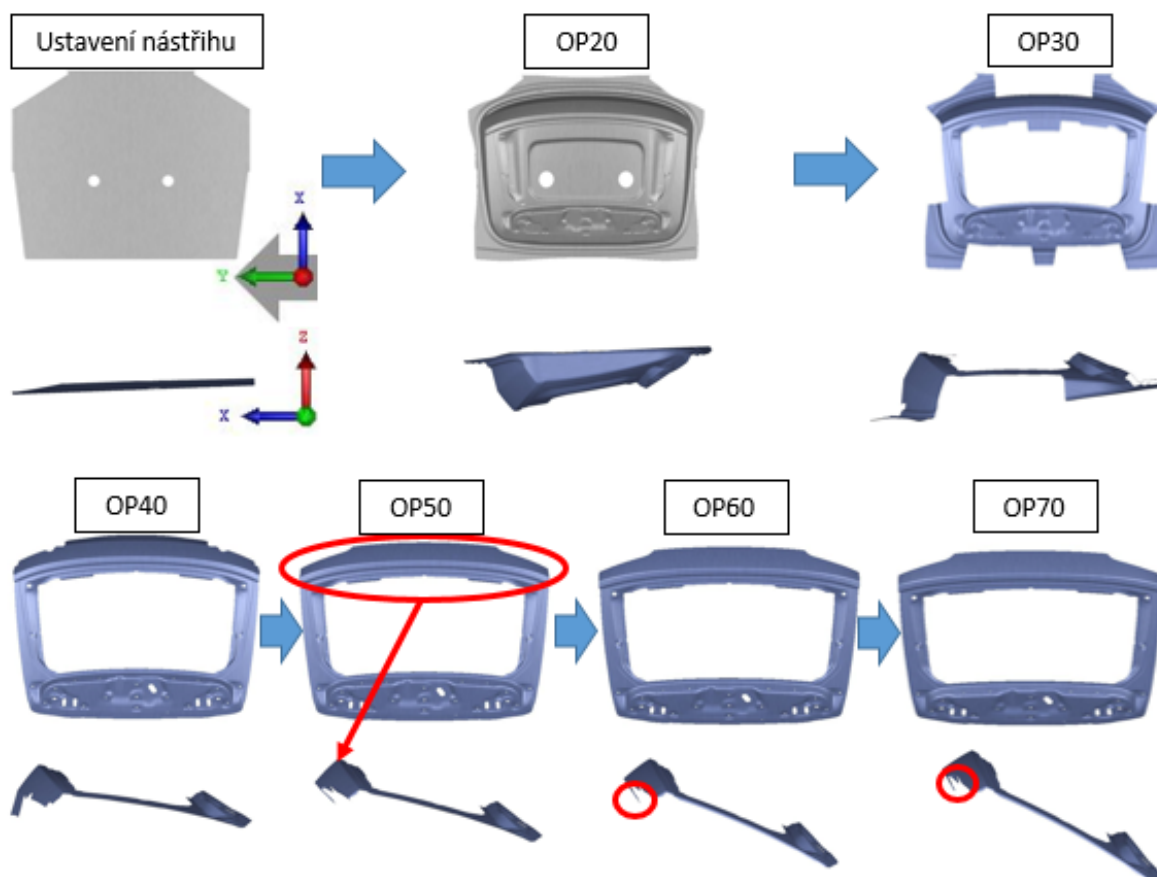
Stav TM				7			
Tloušťka materiálu				0,75 mm			
Materiál – CR4 – EG40/40-U-O							
Chemické složení [v hm. %]							
C max	Mn	P max	S max	Ti	-	-	-
0,06	0,35	max 0,025	max 0,025	-			
Mechanické vlastnosti							
σ_0 [MPa]	R_m [MPa]	n [-]	A_g [%]	r_0 [-]	r_{45} [-]	r_{90} [-]	r_m [-]
165	301	0,228	27	1,8	1,5	2,4	1,8

Tomuto dílu je předepsán materiál CR4-EG40, což je uklidněná hlubokotažná ocel s výbornými vlastnostmi i pro ty nejnáročnější tažné operace. Ocel tohoto typu se v automobilovém průmyslu využívá zejména pro svou vysokou tvářitelnost a celkovou vhodnost pro operace hlubokého tažení. Materiál zároveň vykazuje poměrně nízký rozptyl mechanických vlastností, což umožňuje při výrobních lisovacích operacích dosáhnout optimální produktivity. Označení CR4 znázorňuje jakost materiálu, která dle evropských norem odpovídá jakosti materiálu DC05. Popisek EG40 znázorňuje, že ocelový plech je opatřen vrstvou galvanického zinku v tloušťce 4 μm , a to zejména za účelem zvýšení korozní odolnosti. Vstupní tloušťka přístřihu plechu činí 0,75 mm [30]

4.4.2 Horní díl vnější 5E7.827.105 – Výrobní postup

Každý vyráběný díl je specifický svou vlastní geometrií, která udává technologickou náročnost výrobního procesu. Technologická složitost jednotlivých dílů má přímý vliv na počet operací v celkovém lisovacím procesu a zároveň ovlivňuje komplexnost konstrukce daného lisovacího nástroje. Pro zajištění technologicky správné, ale i ekonomicky výhodné výroby je tudíž nezbytně nutné zajistit vhodný návrh dílčích výrobních operací.

Díl 5E7.827.105 je kvůli svým geometrickým predispozicím vyráběn pomocí šesti dílčích výrobních operací. Těmito operacemi jsou zejména tažné, střížné a kalibrační procesy, či jejich kombinace. Výrobní postup této komponenty je znázorněn v následujícím sledu operací na Obrázku 32.

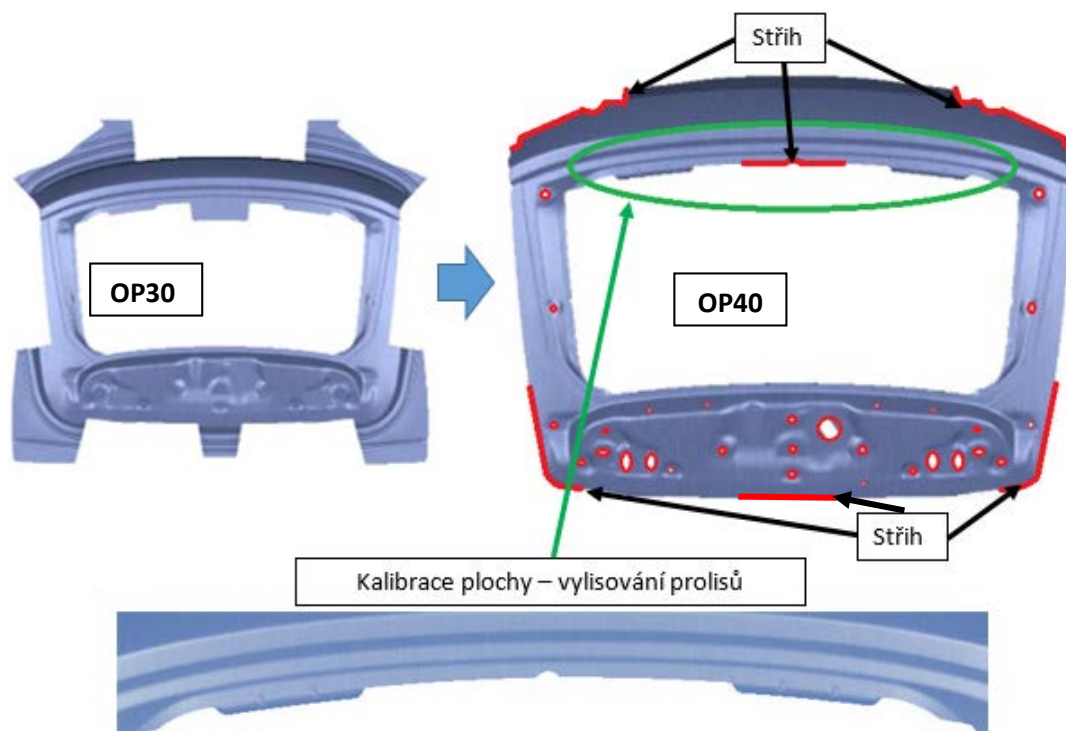


Obrázek 32 - Díl 5E7.827.105 - Sled výrobních operací

V první řadě dochází k ustavení předpřipraveného nástřihu na středící kolíky lisovacího nástroje pro operaci číslo 20. V rámci této operace dochází k hlubokému tažení, kdy je provedeno vytvarování hlavních geometrických prvků daného dílu. Ustavený nástřih je nejprve sevřen přídržovačem, čímž dojde k vylisování brzdných drážek, které zajistí optimální vtahování a vypínání přístřihu plechu. Vrchní přídržovač působí silou 1300 kN a spodní přídržovač silou 375 kN. Následuje vertikální pohyb beranu, na kterém je upevněn tažník, jenž svým silovým působením deformuje materiál do dutiny vespod položené tažnice. V průběhu této operace dochází k největší míře přetvoření, neboť deformace probíhá ve většině plochy nástřihu, což vede k přemístování velké části materiálového objemu. Finálním produktem OP20 je výtazek, který svým hlavním tvarem odpovídá finálnímu dílu, avšak musí být dále zpracován. Zejména musí dojít k odstřížení přebytečného materiálu a dotvarování specifických tvarových ploch.

Následující výrobní operace číslo 30 je primárně střížného charakteru, kdy dochází k odstranění přebytečných ploch. Výtažek je v prostoru nástroje ustaven a v příslušných místech přidržen. Přidržení je zejména důležité v místě stříhu a je provedeno tak, aby nedocházelo k deformaci či třepení ostřížené hrany. Síla vrchního přidržovače činí 450 kN. Zpravidla tedy dochází k sevření nástroje v tenkých plochách podél dílčích střížných křivek, a to tak, aby bylo zajištěno dostatečné přidržení v průběhu střížného procesu.

Výstupní díl z OP30 je přemístěn do prostoru nářadí operace číslo 40, kde je ustaven a dále ostřížen a tvarován. Kalibrační a střížné úkony, jenž náleží OP 40, lze pozorovat na následujícím Obrázku 33. Z tohoto obrázku je patrné, že dochází k odstřížení přebytečných ploch, které zůstaly z OP20 (hluboké tažení). Toto ostřížení je provedeno podél střížných křivek, které jsou znázorněny červenou barvou. Dále pak dochází k odstřížení přebytečného materiálu v prostoru okna a prostříhu červeně znázorněných otvorů. Zeleně vyznačená oblast znázorňuje kalibrovanou plochu, která je v průběhu operace tvarována do finální podoby. Zejména dochází k vylisování prolisů, jenž slouží pro uchycení dalších součástí. V průběhu operace je opět provedeno přidržení dílu v předem určených místech, primárně pak v oblastech okolo střížných křivek. Horní přidržení o síle 300kN způsobuje, že zpracovávaný díl je v průběhu procesu stabilní a nedochází k ovlivnění kvality či otřepení ostřížených hran.



Obrázek 33 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP40

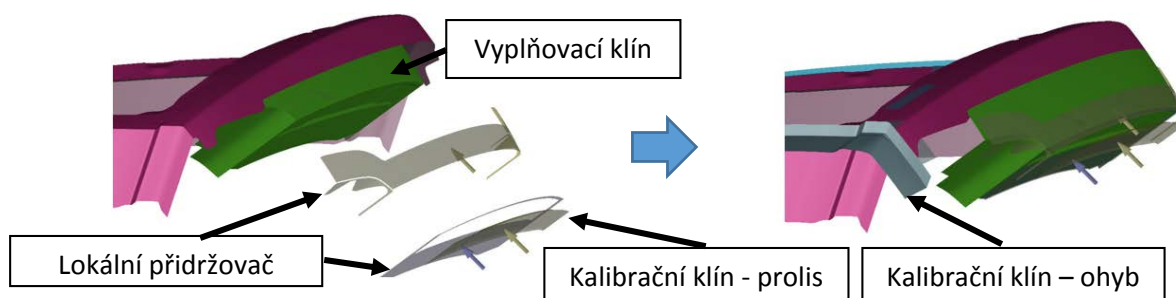
Následující operace číslo 50 je primárně kalibračního charakteru a jejím účelem je především dotvarování plochy v místě budoucího spojení s dílem 5E7.827.107. Tato plocha rovněž slouží jako místo uchopení 5. dveří při jejich otvírání. Schématické znázornění kalibračního úkonu lze pozorovat na následujícím Obrázku 34.



Obrázek 34 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP50

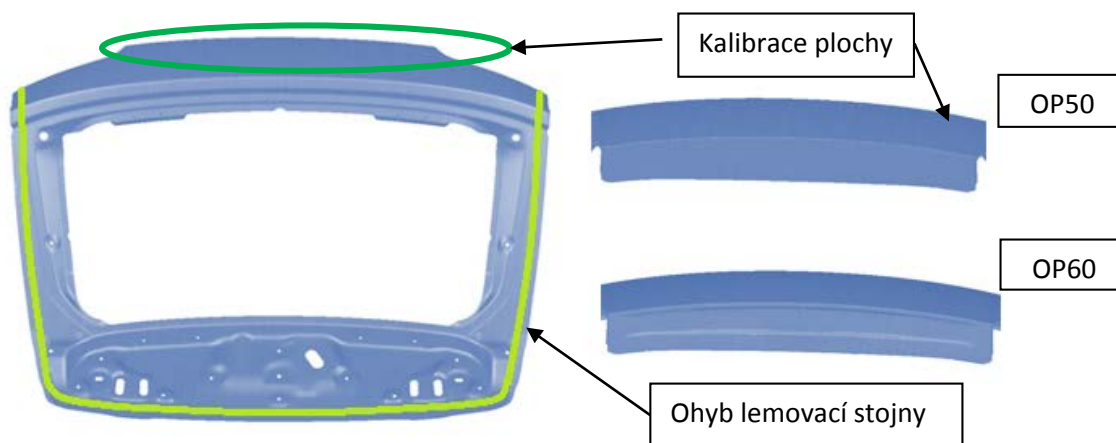
V rámci OP50 je velmi důležité zabránit deformaci již přesně vytvarovaných ploch. Pouhé ustavení na nástavku ve spodní části lisovacího nářadí by však neumožnilo vyjmutí hotového dílu z nářadí. Z tohoto důvodu je tedy využito pohyblivého vyplňovacího klínu, který se na počátku operace vsune pod plochy, které jsou v blízkosti tvářené oblasti, čímž dojde k jejich podepření. Toto přidržení zabrání zborcení hotových ploch, které by mohlo vzniknout v důsledku silového působení od právě ohýbané plochy. Zároveň dochází k přidržení od vrchního přidržovače, a to silou 1550 kN. Po dokončení kalibračního procesu tento klín vyjede z pozice přidržení a uvolní díl pro vyjmutí.

V rámci operace číslo 60 dochází primárně k ohybu lemovacích stojen po vnějším obvodu dílu a ke kalibraci plochy pro uchycení 5. dveří. Tato kalibrace je rovněž provedena pomocí vyplňovacího klínu, jehož funkci v rámci OP60 lze pozorovat na následujícím Obrázku 35. Síla horního přidržení činí 1450 kN.



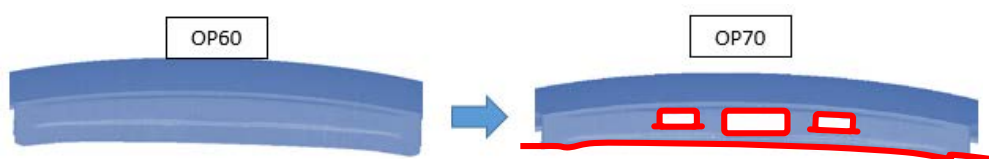
Obrázek 35 - Díl 5E7.827.105 - Využití vyplňovacího klínu v O60

Schématické znázornění metodiky výrobního postupu v rámci operace číslo 60 lze pozorovat na následujícím Obrázku 36. Ohybová hrana lemovacích stojen je zde znázorněna světle zelenou barvou.



Obrázek 36 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP60

Finální operace číslo 70 je primárně střížného charakteru a jejím účelem je prostřížení otvorů pro usazení svítilen v místě uchopení víka 5. dveří, jak je patrné z následujícího Obrázku 37. Celá tato plocha je zároveň ostřížena a zkrácena. Výsledkem této operace je díl ve své finální podobě, který je dále přeměřen za účelem stanovení míry odpružení.

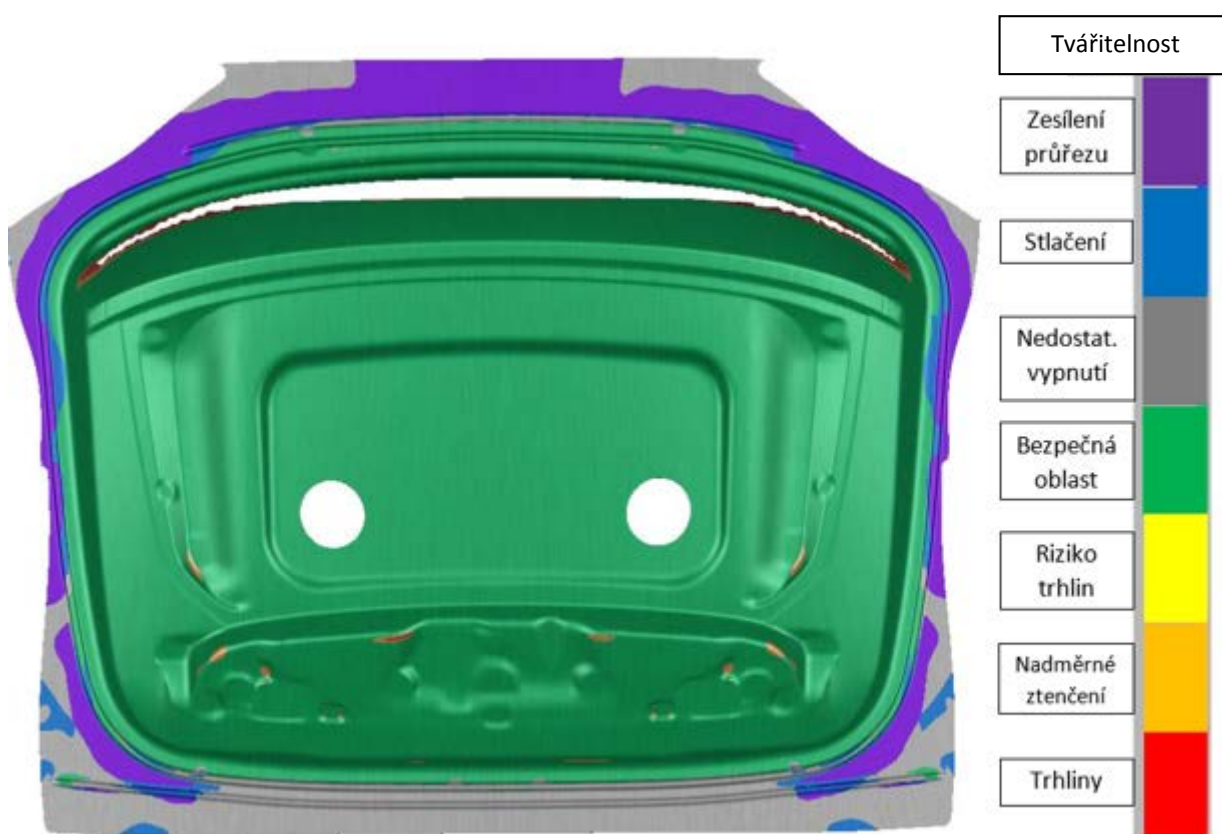


Obrázek 37 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP70

4.4.3 Horní díl vnější 5E7.827.105 – Vyhodnocení simulace – Varianta 1

Rozlišujícím faktorem z hlediska nastavení individuálních simulací je zejména hodnota koeficientu tření a jeho tlaková závislost. V rámci varianty číslo 1 je pro díl 5E7.827.105 předepsán dynamický třecí koeficient $\mu = 0,15$, tudíž není uvažována závislost této veličiny na působící tlakové síle.

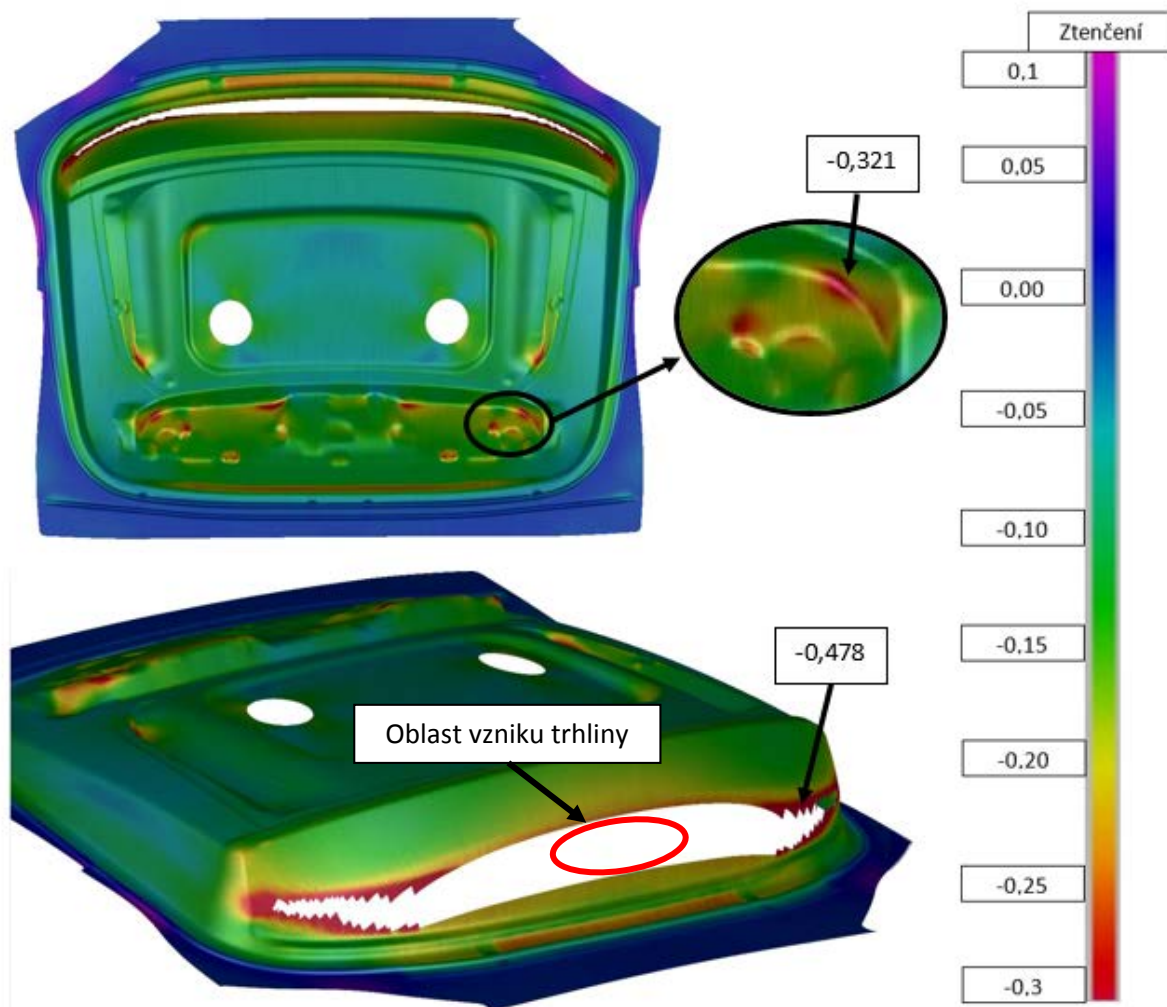
Z hlediska vyhodnocení operace číslo 20 je zejména důležité sledovat míru vtahování materiálu do dutiny pracovního prostoru náradí, neboť právě tato míra ovlivňuje optimální distribuci materiálu v průběhu lisovacího procesu. Z hlediska vtahování materiálu je patrné, že v levé a pravé části plechu dochází k žádoucímu vtahování do pracovního prostoru, naopak v horní a spodní části přístřihu plechu dochází ke vzniku značného problému, neboť plech se v této oblasti do dutiny nástroje prakticky vůbec nevtahuje. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena příliš vysokou účinností brzdných lišt v kombinaci s vyšší hodnotou koeficientu tření, což má za následek nadměrně vypínání plechu a jeho následné prasknutí. Dle simulace tak v této operaci dochází ke katastrofálnímu selhání integrity materiálu a roztržení výlisku. Vyhodnocení tvářitelnosti dílu, dle výsledků softwaru AutoForm, lze pozorovat na následujícím Obrázku 38.



Obrázek 38 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Tvářitelnost

Z výše uvedeného obrázku je primárně patrné katastrofální porušení integrity v horní části výlisku. Zároveň však dochází k nadměrnému ztenčování plechu v místě tvarových prolisů podél střešní oblasti. V rámci vyhodnocení tvářitelnosti jsou tyto lokální oblasti ztenčení znázorněny oranžovou barvou.

Míra ztenčení plechu na konci operace číslo 20 vyplývá z následujícího Obrázku 39. Maximální povolené ztenčení dle interních standardů kvality činí 30 %. Z obrázku je jednoznačné, že k překročení této limitní hodnoty dochází hned v několika místech. Tato skutečnost je patrná například v oblasti prolisů u střešní části tohoto dílu, která je v detailu zobrazena na níže uvedeném obrázku. Míra ztenčení v této oblasti dosahuje přibližně hodnoty 32,1 %.



Obrázek 39 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení

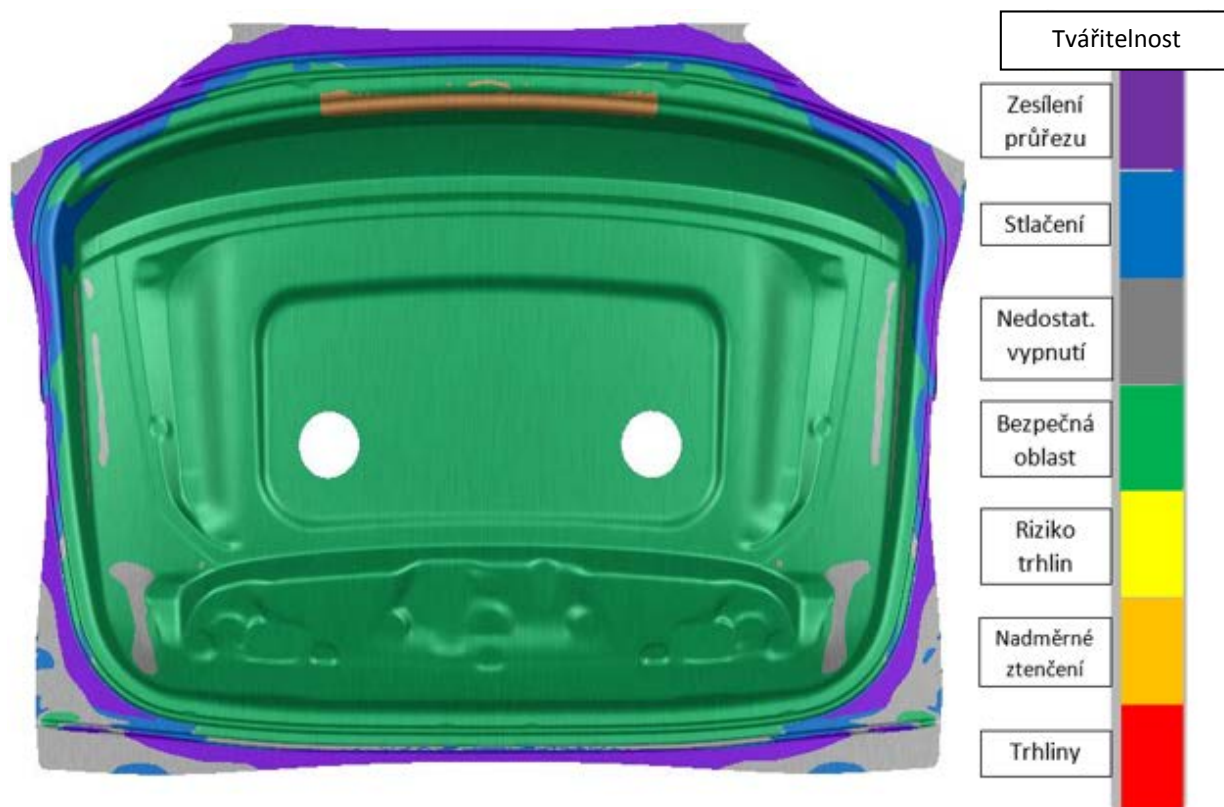
Červeně vyznačená oblast na výše uvedeném obrázku udává místo, kde došlo k první iniciaci porušení integrity a vzniku trhliny. Následné silové působení pak vedlo k jejímu lavinovému šíření a roztržení plechu až po okraj dané plochy. Toto poškození je z hlediska kvalitativních parametrů naprosto nepřijatelné a zamezuje jakémukoliv dalšímu zpracování tohoto vylisku.

Z výsledků numerické simulace je tedy patrné, že porušení vylisku vzniká v důsledku příliš vysokého účinku brzdných lišt, který plně neodpovídá reálnému lisovacímu procesu. Vystává tedy otázka: “Proč v simulaci dochází k porušení dílu, když reálné sériové nářadí produkuje kvalitní vylisky bez defektů, jenž vyhovují standardům kvality?” Za účelem získání odpovědi je tedy žádoucí prozkoumat dílčí parametry, jenž efektivitu brzdných lišt ovlivňují. Změna geometrie brzdných lišt by znamenala zásah do funkčních ploch lisovacího nářadí, což by bylo nejen pracné, ale i poměrně finančně náročné. Mnohem jednodušší je zaměřit se na vliv koeficientu tření μ a definovat ho tak, aby přesněji odpovídal reálnému lisovacímu procesu, což je provedeno v rámci nastavení numerické simulace dle varianty číslo 2.

4.4.4 Horní díl vnější 5E7.827.105 – Vyhodnocení simulace – Varianta 2

V rámci nastavení varianty číslo 2 je předepsán tlakově závislý (PD – pressure dependent) koeficient tření $\mu = 0,12$. Tato hodnota se tedy v průběhu lisovacího procesu mění, a to v důsledku působící tlakové síly.

Vyhodnocení hlubokého tažení v rámci varianty číslo 2 ihned poskytuje mnohem příznivější výsledky než v případě simulace dle varianty 1. Tato skutečnost je patrná z následujícího Obrázku 40, jenž znázorňuje tvářitelnost dílu na konci OP20.

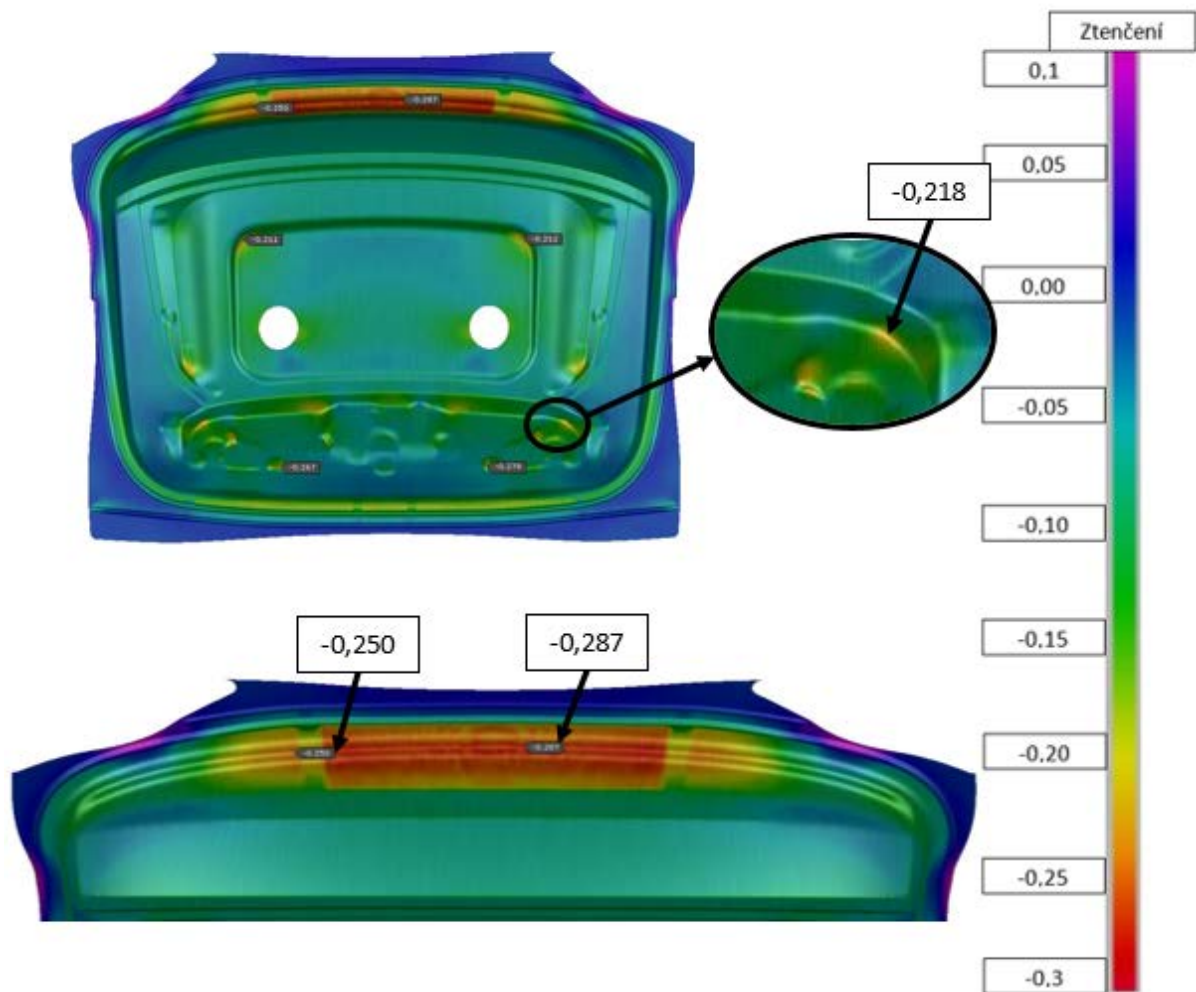


Obrázek 40 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Tvářitelnost - Varianta 2

Z obrázku je patrné, že dochází k vhodnějšímu vtahování přístřihu do pracovní dutiny nástroje než v případě varianty číslo 1, a to zejména v horní a spodní části výlisku. Tato skutečnost je primárně způsobena snížením hodnoty třecího koeficientu μ a nastavením jeho tlakové závislosti, což významně ovlivňuje míru vypínání plechu a snižuje tak riziko nadměrného ztenčování. V případě varianty číslo dvě tedy nedochází ke ztrátě integrity materiálu a poškození výlisku v důsledku lavinového šíření trhliny.

Z hlediska vyhodnocení tvářitelnosti je získaný výtažek z velké části zvýrazněn zelenou barvou, která v rámci tvářecího procesu specifikuje takzvanou bezpečnou oblast. Takto označené plochy jsou dle softwaru AutoForm optimálně vytvarovány a nevykazují náchylnost ke vzniku trhlin. Výjimku činí pouze oblast addenda v horní části výlisku za tažnou lištou, kde dochází k výraznějšímu ztenčení tloušťky plechu, které je na výše uvedeném obrázku znázorněno oranžovou barvou.

Následující Obrázek 41 znázorňuje celkové ztenčení plechu, které vzniká v důsledku operace hlubokého tažení při nastavení simulace dle varianty číslo 2. Limitním faktorem je maximální dovolené ztenčení, které dle standardů kvality činí 30 %.

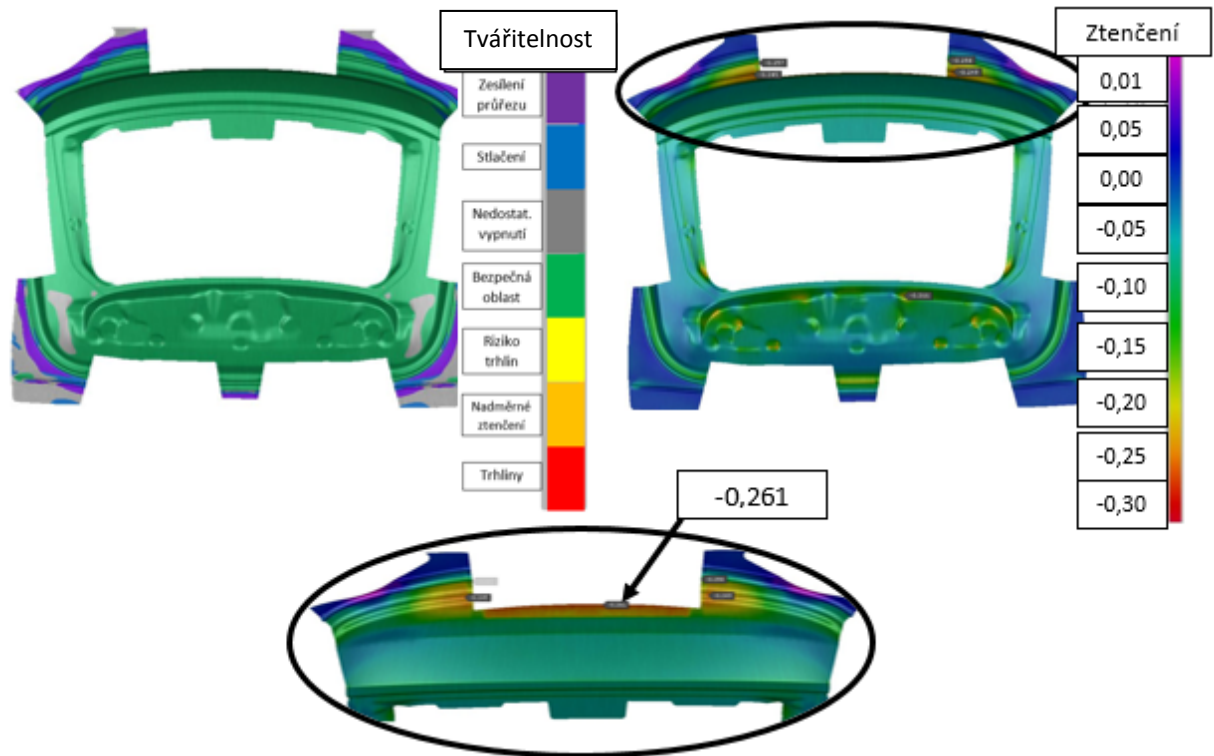


Obrázek 41 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 2

Z obrázku je patrné, že změna koeficientu tření μ velice příznivě ovlivnila distribuci materiálu v průběhu tvářecího procesu, což výrazně ovlivnilo míru vypínání plechu ve specifických oblastech. Ve srovnání s variantou číslo 1 tak nedochází k nežádoucí ztrátě integrity materiálu či nadměrnému ztenčování nad maximální povolenou hodnotu 30 %. Těto podmínce vyhovuje i nejvíce namáhaná oblast addenda v horní části výlisku, která vykazuje maximální ztenčení přibližně 28,7 %. Menší míra ztenčení je však nejvíce patrná v oblasti tvarových prolisů, kde došlo ke snížení o přibližně 10 % oproti předchozí variantě. Získaný výlisek zároveň nevykazuje žádnou známku zvlnění povrchu, a tudíž celkově vyhovuje předepsaným standardům kvality. Tato skutečnost umožňuje jeho další zpracování a automatizované přesunutí do prostoru náradí operace číslo 30.

V průběhu operace číslo 30 dochází dle metodického plánu pouze k ostřížení přebytečného materiálu. Účelem operace je tedy zejména odstranění odpadního materiálu pomocí střížných úkonů, a to bez jakéhokoliv ovlivnění vytvarovaných ploch.

Z důvodu absence kalibračních úkonů tak nedochází ke změně tvářitelnosti či dalšímu ztenčení plechu, což je patrné dle následujícího Obrázku 42.



Obrázek 42 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP30 - Tvářitelnost, Ztenčení - Varianta 2

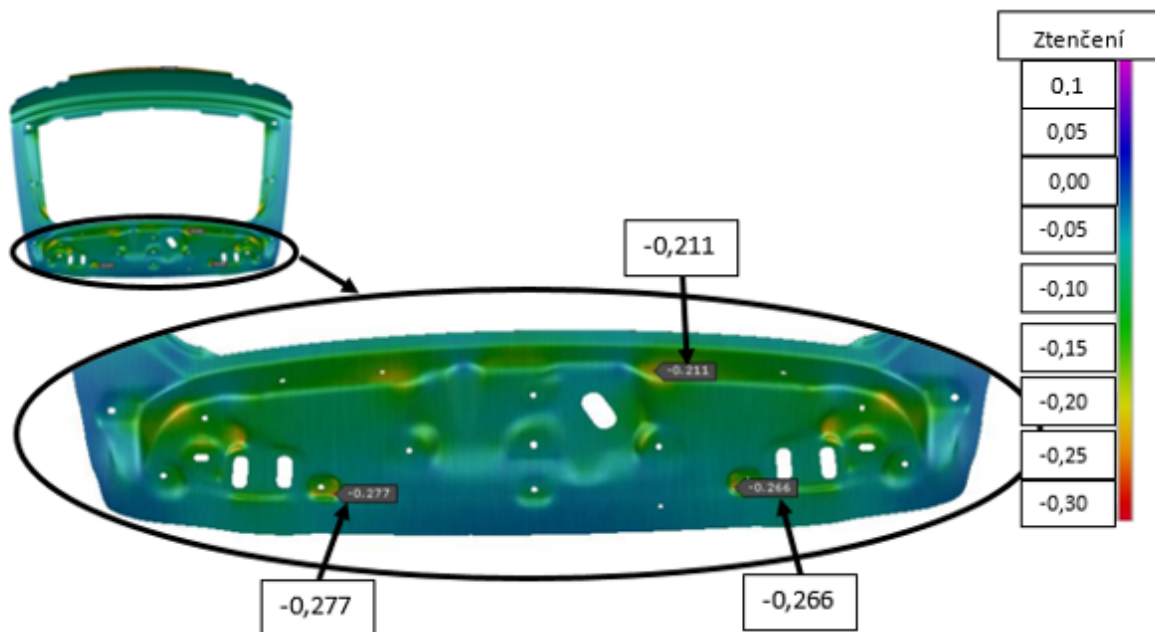
Výše uvedený obrázek rovněž znázorňuje odstřížení nejvíce ztenčené oblasti v horní části výlisku za geometrickou lištou. Po odstřížení této oblasti tak ztenčení dosahuje maximální hodnoty 26,1 %. V důsledku této střížné operace taktéž nedochází ke vzniku zvlnění a odstranění zbytkového materiálu je tak bezproblémové.

V průběhu operace číslo 40 nedochází k výraznému ovlivnění tvářitelnosti v důsledku provedených střížných a kalibračních úkonů, což je patrné na následujícím Obrázku 43.



Obrázek 43 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP40 - Tvářitelnost - Varianta 2

Dle Obrázku 43 je rovněž patrné, že oblast výrazného ztenčení z operace číslo 20 byla v důsledku střížných úkonů v rámci OP30 a OP40 prakticky zcela odstraněna. K identifikovatelným změnám dochází pouze v oblasti tvarových prolisů, kde je provedena kalibrace plochy. V této oblasti primárně dochází k lokálnímu ztenčování plechu okolo funkčních otvorů, což je zobrazeno na Obrázku 44. Tato lokální ztenčení nepředstavují problém, neboť vyhovují limitní podmínce 30 %.



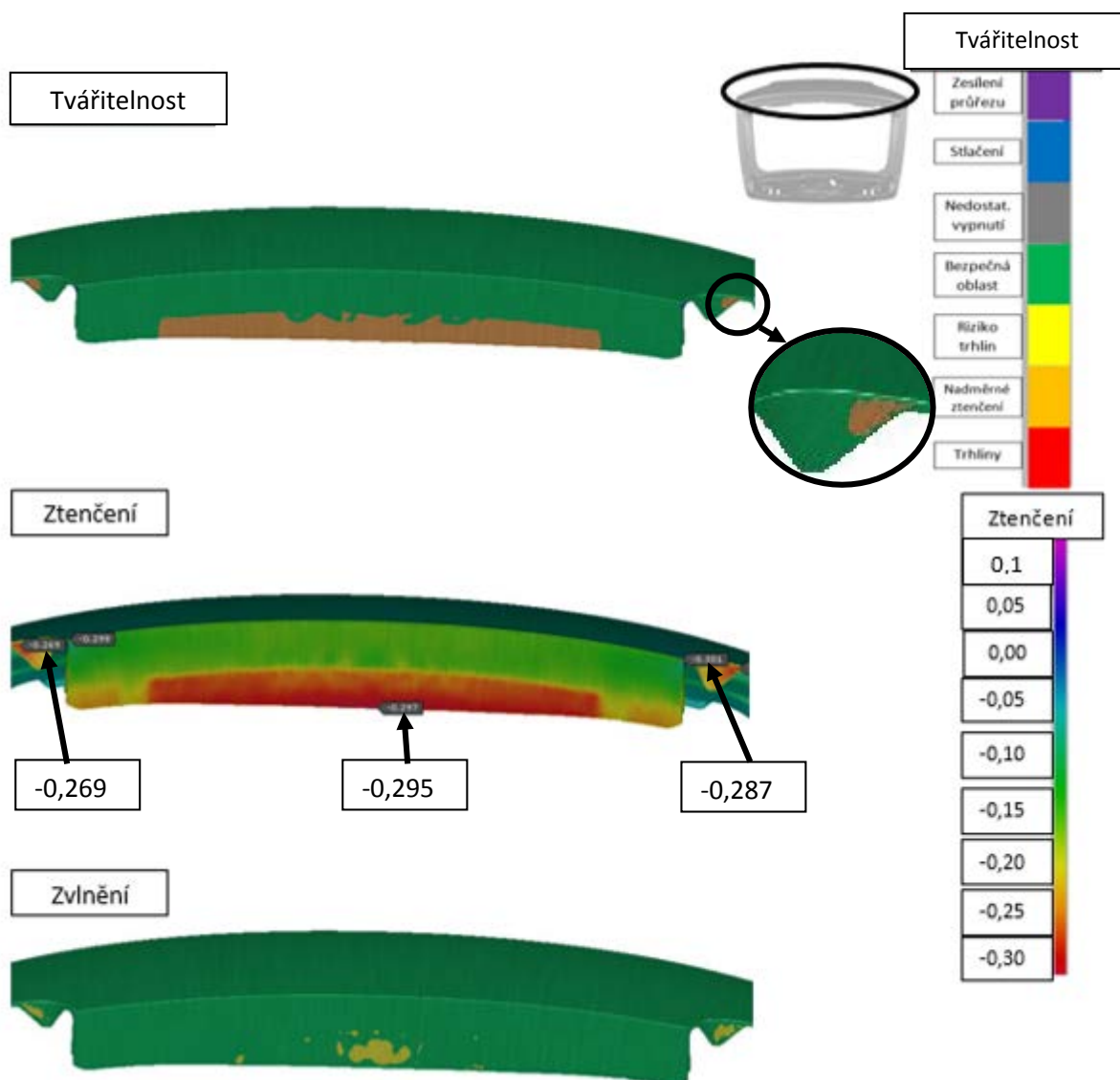
Obrázek 44 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP40 - Ztenčení - Varianta 2

Primární účel operace číslo 50 spočívá v ohnutí plochy uchycení, která je v průběhu následujících operací kalibrována a prostřížena za účelem vytvoření otvorů pro osvětlení. Tato operace je za účelem bezproblémového vyjmutí provedena pomocí vyplňovacího klínu, který tak plní funkci lokálního spodního přidržovače. Dostatečné a vhodné přidržení je zejména v této operaci velice důležité, neboť dochází k ohybu poměrně velké plochy, která by tak v důsledku silového působení mohla způsobit nemalé deformace na již zhotovených plochách. Vzhledem k délce ohýbané plochy za ohybovou hranou je rovněž nezbytně nutné počítat s mnohem vyšší mírou odpružení (springbacku), která je rovněž výrazně ovlivněna hodnotou navrženého ohybového rádiu.

Z hlediska vyhodnocení tvářitelnosti (Obrázek 45) dochází v ohýbaných plochách primárně ke ztenčování materiálu, které převážně vzniká podél koncové hrany ohýbané plochy. Ztenčení se rovněž v menší míře uplatňuje na opěrných plochách pro usazení zadních světelných reflektorů automobilu. Tyto oblasti rovněž dle výsledků simulace vykazují náchylnost na vznik povrchového zvlnění. Zejména oblast pro uchycení 5. dveří je nezbytně nutné pečlivě sledovat, neboť případný výskyt zvlnění by zásadně ovlivnil estetiku nalakovaného dílu.

Analýza ztenčení (Obrázek 45) ukazuje, že v oblasti ploch pro usazení zpětných reflektorů vozu dosahuje ztenčení lokálního maxima 28,7 %, což vyhovuje podmínce maximální povolené hodnoty 30 %. Zejména podél koncové hrany ohýbané plochy dochází k intenzivnímu ztenčení, které zde nabývá hodnoty 29,5 %. Tato hodnota sice nepřekračuje limitní podmínku, avšak dá se považovat za hraniční. Z tohoto důvodu tedy představuje potenciální riziko a může zde docházet ke vzniku trhlin.

Vyhodnocení jednotlivých parametrů pro operaci číslo 50 je graficky znázorněno na následujícím Obrázku 45.

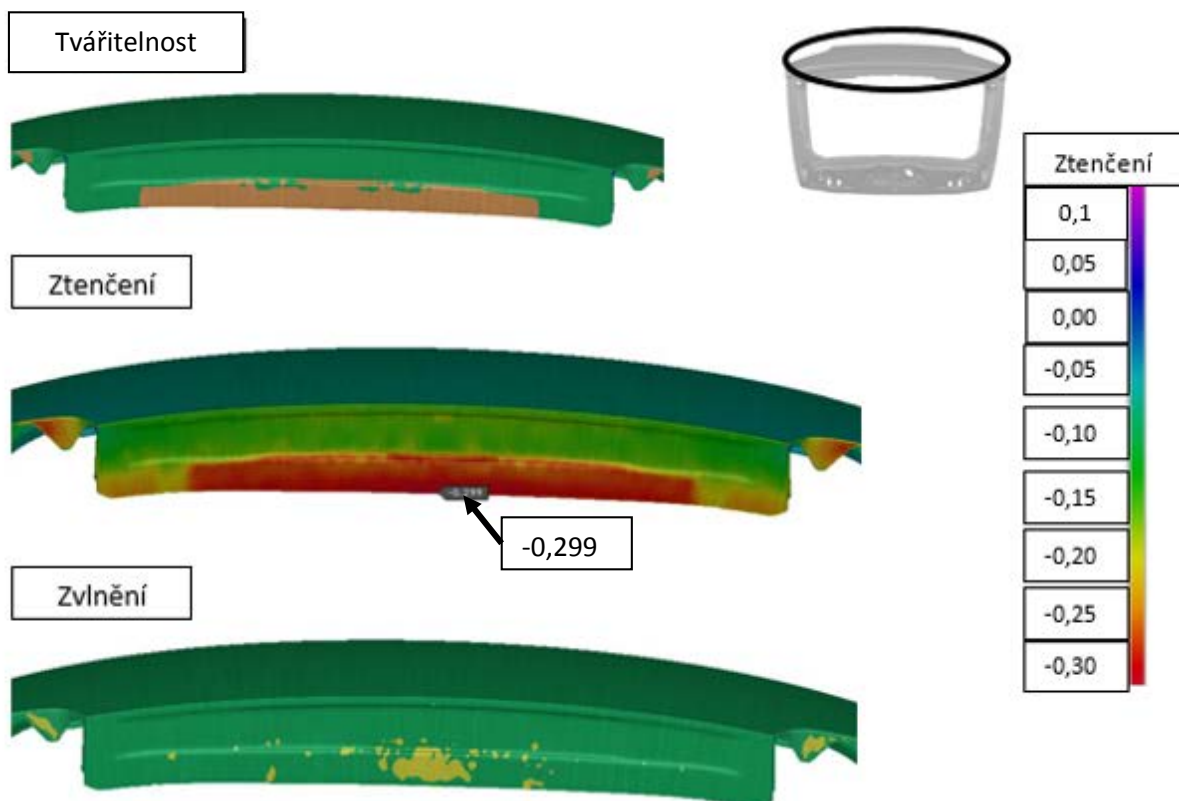


Obrázek 45 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP50 - Tvářitelnost, Ztenčení, Zvlnění - Varianta 2

Dle těchto kvalitativních parametrů je výstupní díl z OP50 vyhovující a může být dále zpracován. Ve specifických oblastech však dochází k výraznému ztenčování plechu, které musí být blíže monitorováno, a to zejména proto, aby nedocházelo ke vzniku trhlin.

V rámci operace číslo 60 je plocha uchycení víka 5. dveří kalibrována, čímž dochází k vytvarování prolisů pro umístění osvětlení. Právě v této operaci je rovněž proveden i ohyb lemovacích stojen po obvodu výlisku. Zejména dotvarování lemovacích stojen probíhá bez větších problémů a nezpůsobuje nežádoucí deformaci či ztenčování plechu ve tvářené oblasti. Naopak tvarování plochy pro umístění osvětlení musí být pečlivě sledováno, neboť zde na začátku operace dosahuje hodnota ztenčení 29,5 %.

Analýza dílčích parametrů vyhodnocení pro operaci číslo 60 je graficky znázorněna na dalším Obrázku 46.



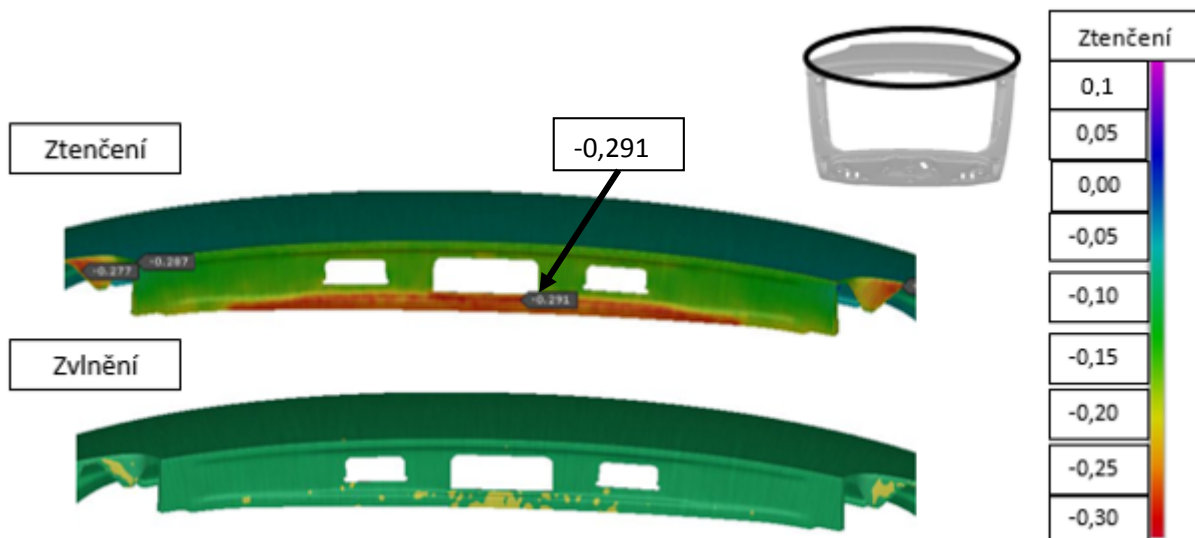
Obrázek 46 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP60 - Tvářitelnost, Ztenčení, Zvlnění - Varianta 2

Například vyhodnocení tvářitelnosti dle křivky mezních přetvoření (FLC) neposkytuje příliš mnoho informací, neboť oranžová oblast nadměrného ztenčení se v důsledku tvářecí operace mění pouze minimálně (Obrázek 46). Z tohoto důvodu je v tomto případě mnohem důležitější vyhodnocení ztenčení, které naopak zřetelně ukazuje nárůst ztenčení podél hrany na prakticky limitní hodnotu 29,9 %. Toto místo by mohlo být značně problematické, neboť numerická simulace pomocí metody konečných prvků pracuje s určitou odchylkou, která by v rámci reálného výrobního procesu mohla způsobit překročení limitní hodnoty 30 %.

Dotvarování plochy uchycení rovněž vede k lehkému zhoršení parametru náchylnosti ke zvlnění, což je znázorněno na výše uvedeném Obrázku 46. Oblast náchylná na vznik zvlnění je zde zvýrazněna žlutou barvou. V tomto místě ke zvlnění povrchu nemusí nezbytně docházet, avšak je zapotřebí dbát zvýšené pozornosti a zejména zde dosáhnout vhodného přidržení.

Účelem finální operace číslo 70 je v první řadě prostřižení otvorů pro umístění osvětlení v oblasti uchycení víka 5. dveří. V druhé řadě pak dochází k ostřížení a zkrácení této plochy podél její spodní hrany. Tato operace je primárně střížného charakteru, tudíž dle simulace nedochází ke zřetelným změnám z hlediska vyhodnocení tvářitelnosti, ztenčení plechu či zvlnění povrchu.

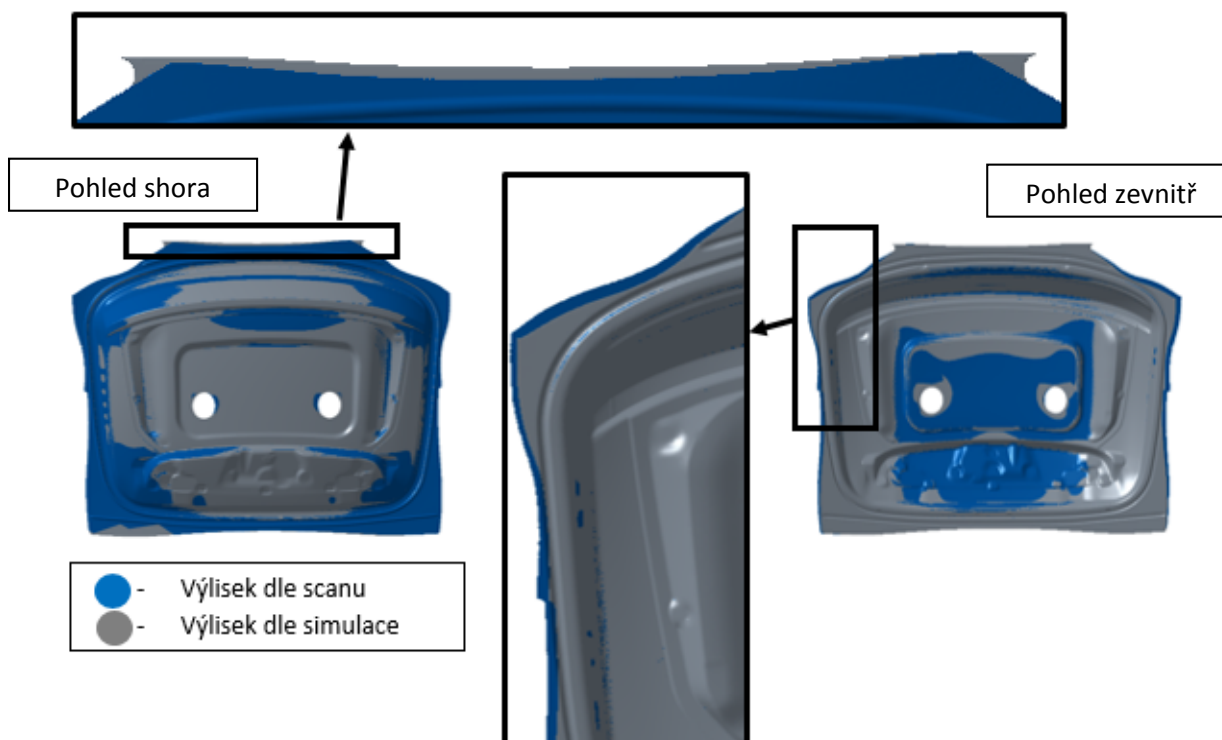
V důsledku zastřížení a zkrácení plochy během OP70 rovněž dochází ke zmenšení oblasti nadměrného ztenčení, které tak lokálně dosahuje hodnoty 29,1 %, což je patrné z následujícího Obrázku 47.



Obrázek 47 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP70 - Ztenčení, Zvlnění - Varianta 2

4.4.5 Horní díl vnější 5E7.827.105 – Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku

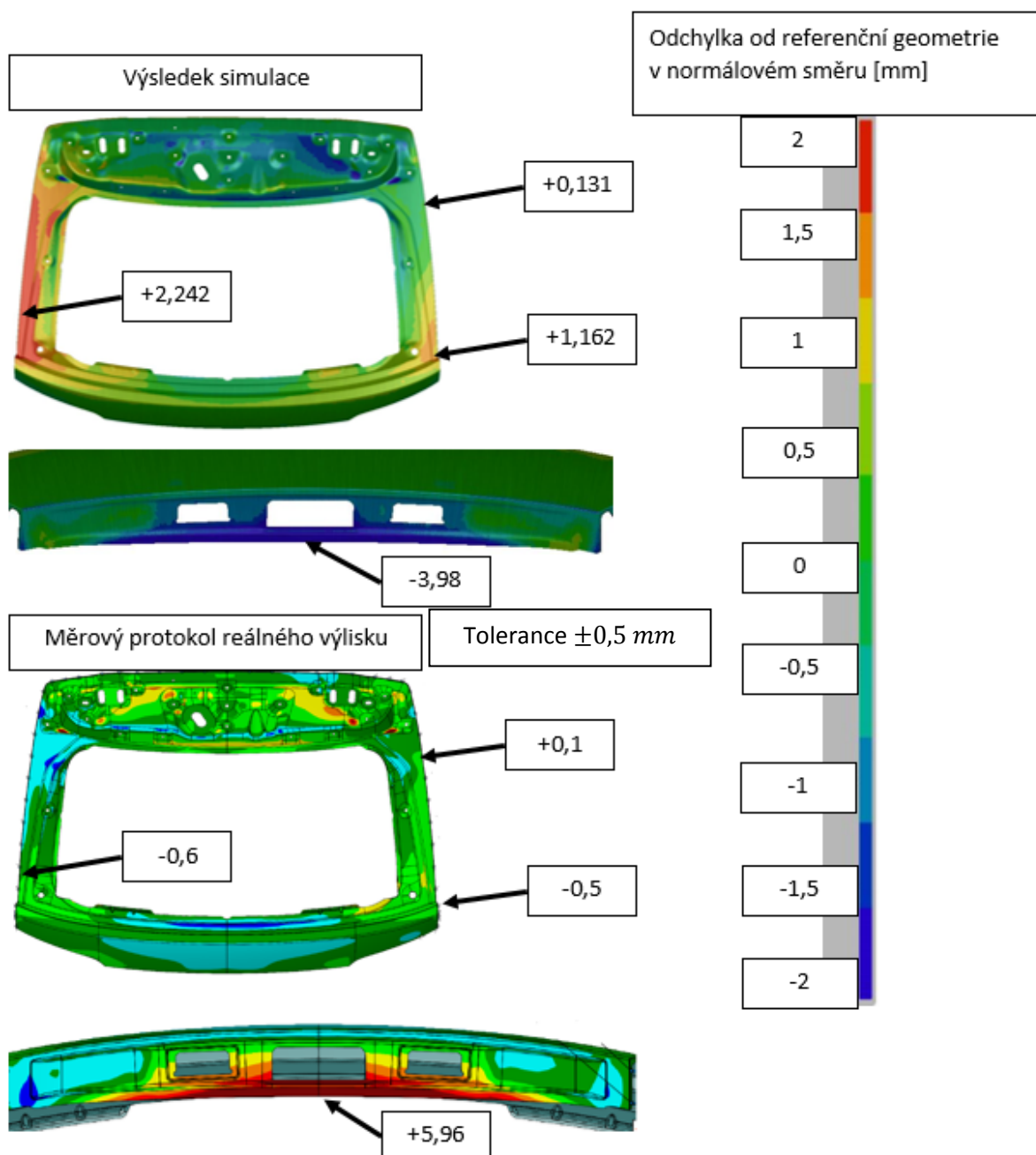
Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku je poprvé provedeno na konci operace hlubokého tažení (OP20). Geometrie sériového výlisku je nejprve naskenována a následně je ve formě STL souboru importována do CAD softwaru. V prostředí CAD softwaru je následně provedeno srovnání s geometrií výlisku dle výsledků simulace. Primárním aspektem srovnání jsou vtahy plechu, dle kterých se hodnotí, zda dochází k ekvivalentnímu toku materiálu do dutiny nástroje. Toto srovnání vtaů plechu lze pozorovat na následujícím Obrázku 48.



Obrázek 48 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vtahy v OP20

Z Obrázku 48 je patrné, že výlisek dle simulace ve velké míře odpovídá reálnému výlisku. Reálný výlisek vykazuje vyšší míru vtažení v horní části a naopak lehce menší míru vtažení po levé a pravé straně. Vtahy na spodní části výlisku jsou prakticky identické. Tvarové plochy se téměř shodují, případné odlišnosti vznikají zejména v důsledku mezioperačního odpružení.

Z hlediska vyhodnocení odpružení (Obrázek 49) je patrné, že výsledek dle simulace následuje obdobný trend jako v případě reálného výlisku, avšak hodnoty odchýlení vykazují opačnou orientaci. Důvod této skutečnosti pravděpodobně spočívá v definici ustavení výlisku v numerické simulaci a jeho eliminace tak vyžaduje další zkoumání.



Obrázek 49 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Odpružení

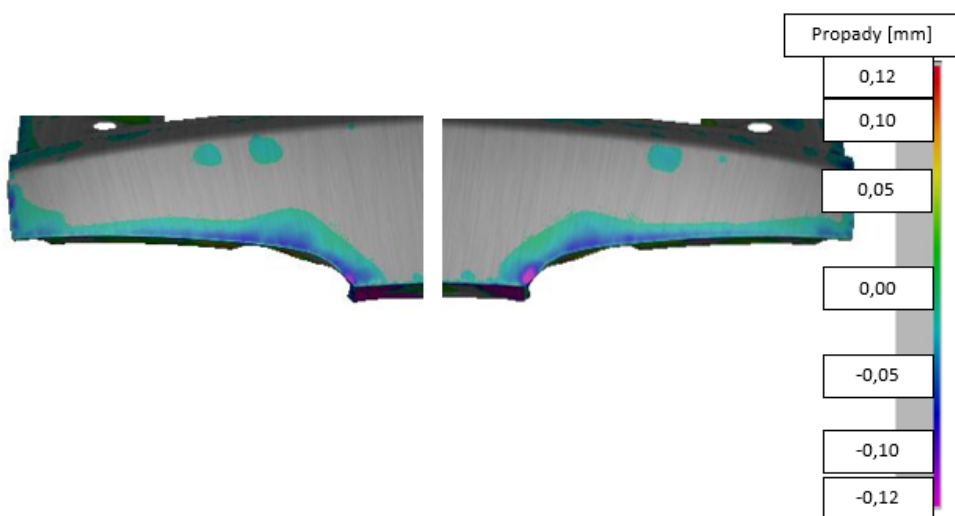
Výše uvedený obrázek jasně ukazuje, že největší míra odchýlení od referenční geometrie vzniká v místě umístění uchycení 5. dveří v prostoru pro umístění osvětlení. Tato skutečnost je zde primárně způsobena velice ostrou geometrií, kdy ohnutá plocha po vytvarování značně odpruží.

Za účelem srovnání reálného výlisku a výlisku dle simulace je v neposlední řadě důležité zkontrolovat problémy, které byly u daného dílu nalezeny v rámci auditové kontroly. Tato kontrola primárně nenašla místa hraničního ztenčování či problematického zvlnění povrchu. Dochází však k vzniku jiných problémů, které jsou zvýrazněny na Obrázku 50.



Obrázek 50 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Auditové závady

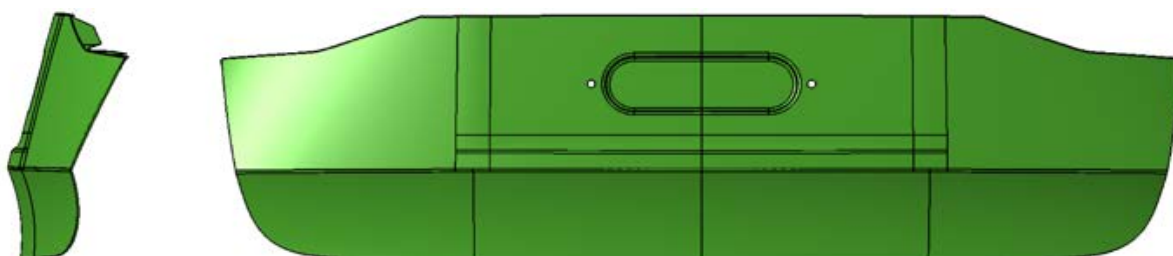
Dle auditové kontroly dochází k přetažení designové hrany, která je označena číslem 1. Rovněž dochází ke vzniku otřepu, a to v místě otvorů pro umístění led svítilen (bod 2). Problematická místa, jenž jsou označena číslem 3, znázorňují propad geometrie ve vyznačených oblastech. Bod číslo 4 pak znázorňuje vznik nepravidelného rádiu. Numerická simulace umožňuje předvídání mnoha z těchto problémů, avšak jejich podrobné vyhodnocení překračuje rámec této diplomové práce. Z tohoto důvodu je pro znázornění přiblížen defekt v bodech číslo 3. Propady geometrie dle výsledků numerické simulace lze pozorovat na dalším Obrázku 51, kde lze vidět, že propady vznikající v simulaci ve velké míře odpovídají závadě na reálném výlisku.



Obrázek 51 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vznikající propady

4.5 Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Simulace lisovacího procesu

Komponenta 5E7.827.107 představuje spodní pohledový díl sestavy pátých dveří, který nejen že pomáhá utvářet designový celek zadní části vozu, ale současně i obsahuje prolis pro uchycení registrační značky automobilu. Tento plechový díl lze pozorovat na následujícím Obrázku 52.



Obrázek 52 - Spodní díl vnější 5E7.827.107

4.5.1 Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Základní parametry

Níže uvedená Tabulka 4 specifikuje základní parametry příslušící dílu 5E7.827.107, zejména jsou zde uvedeny přesné mechanické vlastnosti oceli HCT500X, jenž jsou získány z materiálových dat softwaru AutoForm. Tabulka rovněž uvádí chemické složení tohoto materiálu dle normy ČSN EN 10346.

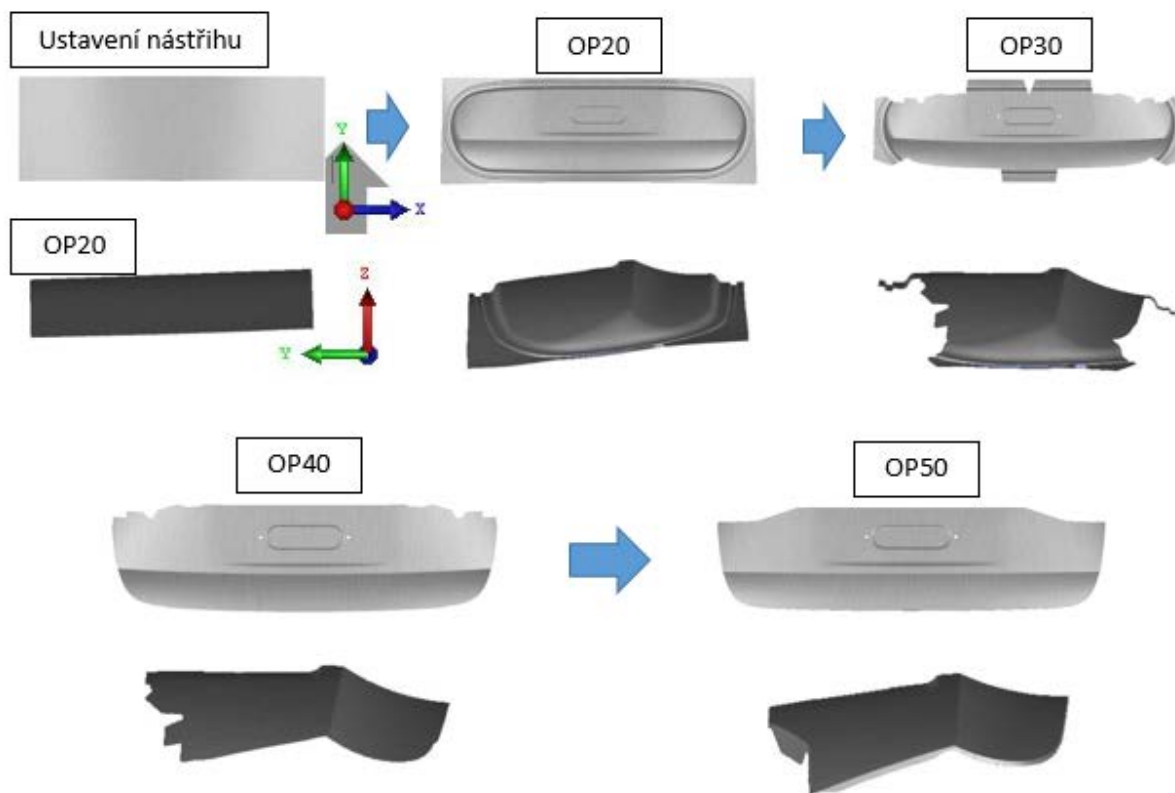
Tabulka 4 - Díl 5E7.827.107 – Základní parametry, chemické složení, mechanické vlastnosti, [32]

Stav TM					8				
Tloušťka materiálu					0,55 mm				
Materiál – HCT500X_D090									
Chemické složení [v hm. %]									
C max	Si max	Mn max	P max	S max	Al total	Cr + Mo max	Nb + Ti max	V max	B max
0,14	0,8	2,0	0,08	0,015	≤ 2,0	1,0	0,15	0,2	0,005
Mechanické vlastnosti									
σ_0 [MPa]	R_m [MPa]	n [-]	A_g [%]	r_0 [-]	r_{45} [-]	r_{90} [-]	r_m [-]	-	-
320,8	511,8	0,171	17,7	0,87	0,95	1,07	0,96	-	-

Předepsaný materiál HCT 500X představuje dvoufázovou výšepevnou ocel, která se vyznačuje feritickou a martenzitickou strukturou. Kombinace těchto materiálových struktur má za účel dosažení optimální kombinace pevnosti a tažnosti materiálu. Feritická fáze dodává oceli lepší tažnost, čímž zlepšuje její tvářitelnost a tím i vhodnost pro lisovací operace. Martenzitická fáze naopak velice příhodně zlepšuje pevnostní charakteristiky oceli, což vede ke zlepšení například únavové pevnosti či míry absorbované energie při nárazu. Dle příslušného standardu ČSN EN 10346 je tato ocel rovněž označována číslem 1.0939. Vstupní tloušťka přístřihu plechu je stanovena na 0,55 mm. [33], [34].

4.5.2 Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Výrobní postup

Výroba dílu 5E7.827.107 probíhá pomocí čtyř dílčích tvářecích operací, neboť tento díl disponuje poměrně jednoduchou geometrií. V první řadě se jedná o operaci hlubokého tažení (OP20), která je následována dílčími střížnými operacemi (OP30, OP40). Tyto střížné operace mají primárně za účel odstranění přebytečného materiálu. Finální operace číslo 50 pak slouží pro kalibraci specifických ploch. Schématický výrobní postup zobrazuje následující Obrázek 53.

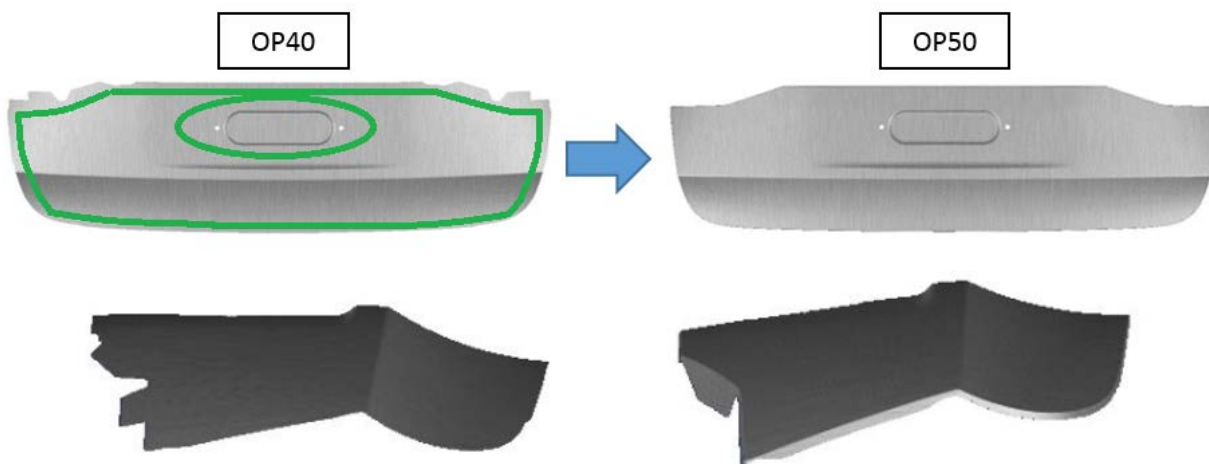


Obrázek 53 - Díl 5E7.827.107 - Sled výrobních operací

V rámci výrobního procesu nejprve dojde k ustavení předpřipraveného nástřihu do prostoru lisovacího nástroje v operaci číslo 20 (hluboké tažení). Přístřih plechu je usazen na středící kolíky, a to tak, aby se zabránilo jeho posunutí či vychýlení v průběhu lisovací operace. V této chvíli dochází k pohybu beranu směrem do dolní úvratě, kdy nejprve dojde k sevření přidržovače a vylisování brzdných lišt, což způsobí zafixování polohy nástřihu. Následuje deformace nástřihu v důsledku silového působení tažníku, jenž deformovaný plech vytlačuje do dutiny tažnice. Síla spodního přidržení by měla ve chvíli sevření matrice a přidržovače dosahovat hodnoty 1136 kN . V zalisované poloze by pak síla spodního přidržovače měla činit 1300 kN . Po dosažení dolní úvratě dojde k vytvarování výsledného výtažku, který je po následném odlehčení vyjmut a přesunut do další operace.

Následné střížné operace (OP30, OP40) jsou v případě vnějšího spodního dílu 5E7.827.107 poměrně specifické. Primárním účelem těchto operací je pouhé odstranění přebytečného materiálu po obvodu dílu, který zůstává z hlubokého tažení. Tento úkon však nemůže být proveden jednooperačně, neboť by nebylo možné odstřížený materiál odstranit z prostoru nářadí. Za tímto účelem je tedy odstranění zbytkového materiálu z OP20 rozděleno do dvou dílčích střížných operací. V průběhu obou operací je využito přidržení od vrchního přidržovače, které dosahuje síly 600 kN .

Poslední operace číslo 50 je primárně kalibračního charakteru a v tomto případě slouží k ohybu lemovacích stojen a k dotvarování plochy prolisu, jenž slouží pro umístění registrační značky vozidla. Metodický postup této operace je znázorněn na dalším Obrázku 54.



Obrázek 54 - Díl 5E7.827.107 - Metodický postup - OP50

Vnější zelená obvodová linie na výše uvedeném obrázku označuje ohybovou hranu lemovacích stojen a vnitřní zelená oblast naopak vyznačuje místo provedení kalibrace plochy. Z hlediska přidržení dochází k využití vrchního (600 kN) a spodního přidržovače (136 kN). Zdárným dokončením této operace dostáváme finální díl, který je následně přesunut ke kontrole míry odpružení v důsledku uvolnění elastické deformace.

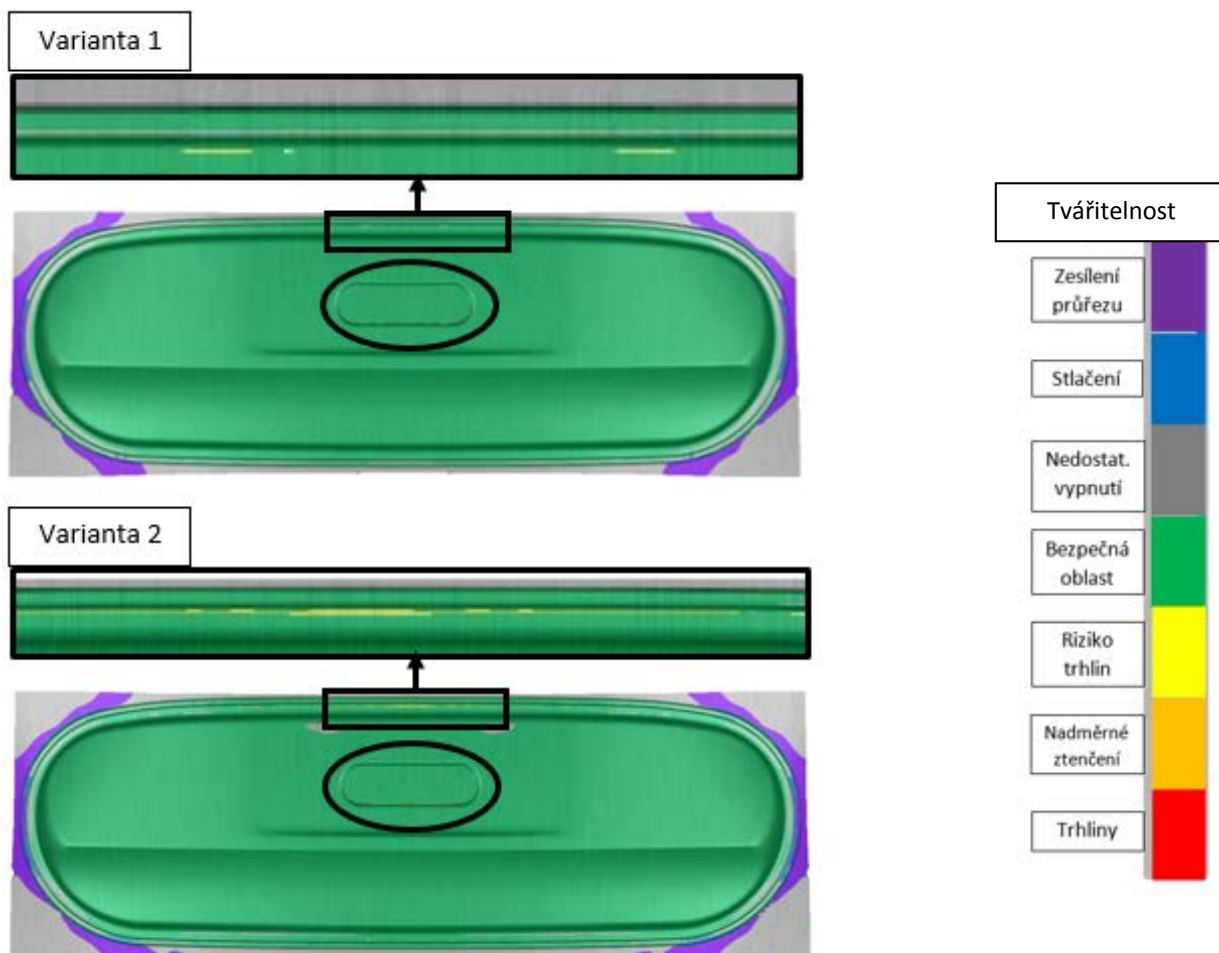
4.5.3 Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Vyhodnocení simulace dle návrhu Varianty 1 a 2

V případě první varianty výrobní simulace dílu 5E7.827.107 je předepsán třecí koeficient $\mu = 0,15$. Hodnota koeficientu tedy není tlakově závislá a v průběhu všech tvářecích operací konstantní. Nastavení varianty číslo 2 naopak výrobní simulace pro díl 5E7.827.107 specifikuje tlakově závislý (PD – pressure dependent) koeficient tření $\mu = 0,12$.

Tyto dvě varianty nastavení primárně umožní zkoumat vliv koeficientu tření na míru vypínání a ztenčování plechu v průběhu lisovacího procesu. Zejména výsledek operace hlubokého tažení je nastavenou hodnotou koeficientu tření výrazně ovlivněn, neboť zde dochází k velice intenzivnímu vypínání materiálu v důsledku tvarového přetvoření. Zvolený třecí koeficient zde poměrně extenzivně ovlivňuje efektivitu brzdných lišt a tím i míru vtahování materiálu do dutiny lisovacího nářadí. Případné nedostatečné vtahování materiálu do dutiny nástroje by v krajních případech mohlo mít za následek porušení integrity a roztržení výlisku. V případě příliš nízkého efektu brzdných lišt by naopak mohlo docházet k nedostatečnému vypnutí plechu a vtažení části nástřihu do dutiny, což by způsobilo tvarovou deformaci. Za účelem nastavení numerické simulace, která bude odpovídat reálnému procesu, je tak nezbytně nutné zvolit vhodné nastavení koeficientu tření.

Z hlediska výrobního procesu představuje díl 5E7.827.107 relativně jednoduchou komponentu, která je vyrobena pomocí čtyř operací, kterými jsou hluboké tažení, dvě dílčí ostřížení a finální kalibrace specifických ploch.

Tvářitelnost dílu 5E7.827.107 na konci operace hlubokého tažení lze pro obě varianty sledovat na následujícím Obrázku 55.



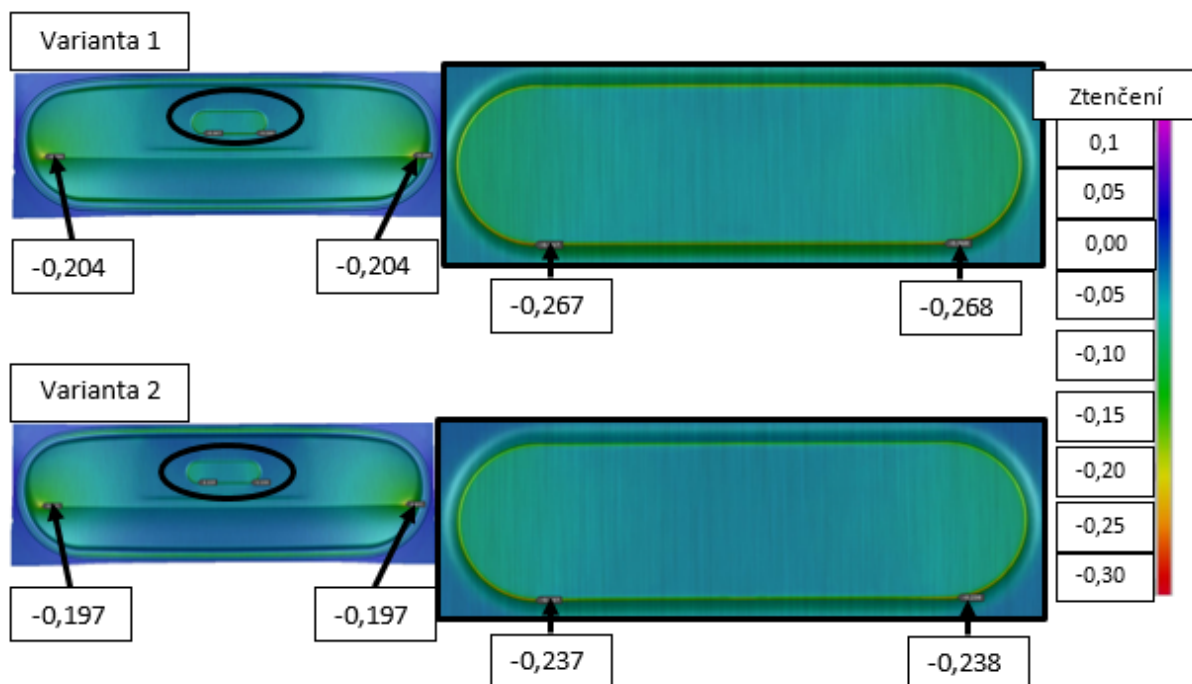
Obrázek 55 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 1, 2

Výše uvedené grafické srovnání tvářitelnosti variant 1 a 2 se může na první pohled zdát takřka bez rozdílů, avšak při bližším pohledu je patrné, že v důsledku úpravy koeficientu tření dochází k viditelným změnám. Tyto změny jsou nejvíce viditelné v oblasti prolisu pro registrační značku vozu a v horní části výlisku podél brzdové lišty.

Dle obrázku vykazuje varianta 1 lehkou náchylnost ke vzniku trhlin podél horní brzdové lišty a ztenčování v oblasti prolisu, kde může docházet až ke vzniku trhlin. V případě varianty číslo 2 je v horní části výlisku podél brzdové lišty zřetelné malé zvýšení náchylnosti ke vzniku trhlin než u předchozí varianty. Oproti tomu oblast prolisu vykazuje značné zlepšení a mnohem menší míru ztenčení plechu.

Bližší popis ovlivněných oblastí však pomocí vyhodnocení tvářitelnosti není možný, a proto je nezbytně nutné provést analýzu ztenčení, která poskytuje podrobnější informace ohledně problémových míst.

Následující Obrázek 56 znázorňuje srovnání ztenčení na konci OP20 pro díl 5E7.827.107 dle varianty nastavení simulace číslo 1 a 2.



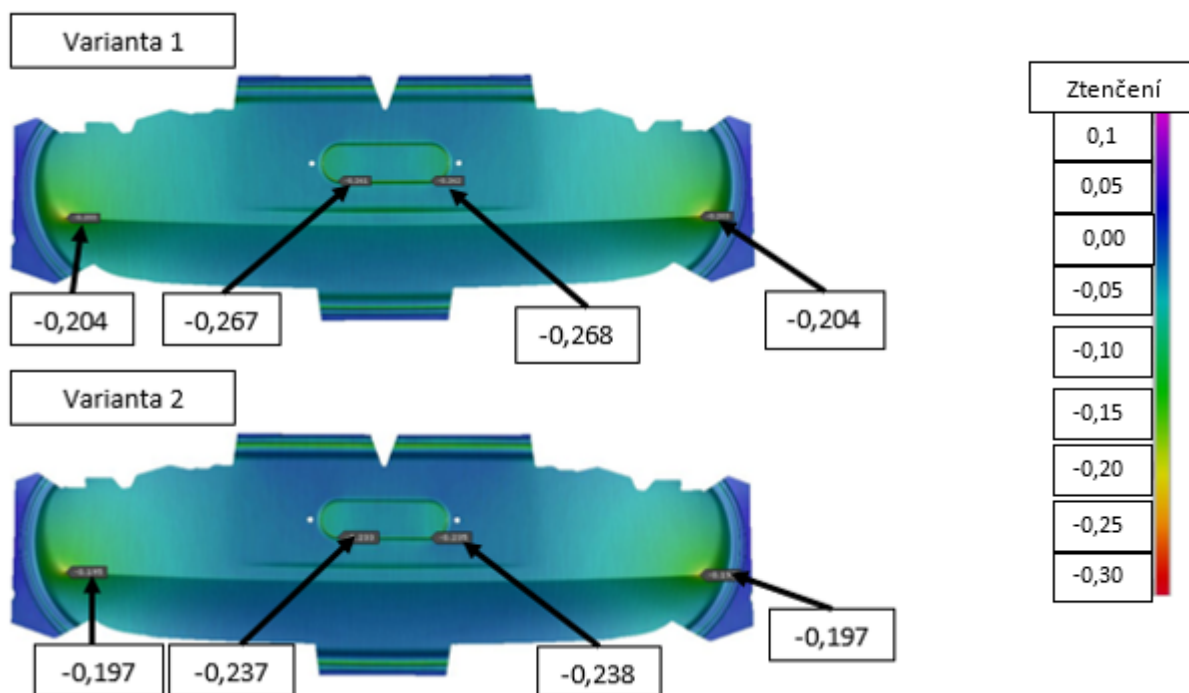
Obrázek 56 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 1 a 2

Vyhodnocení ztenčení jasně ukazuje, že v horní části výlisku za tažnou lištou nedochází k výraznému ztenčování, neboť zde jeho hodnota řádově nepřekračuje 10 %, a to v případě obou variant. Vyšší míra ztenčení se vyskytuje například v místech zakončení designové linie po levé a pravé straně dílu. Hodnota ztenčení v těchto místech se řádově pohybuje okolo 20 %, což plně vyhovuje limitní podmínce maximálního ztenčení. Rozdíl mezi jednotlivými simulacemi je v tomto místě menší než 1 % a dá se tedy považovat za zanedbatelný.

Hlavní rozdíl mezi simulacemi dle návrhu 1 a 2 primárně nastává v oblasti tvarového prolisu, který slouží pro umístění registrační značky. V případě varianty číslo 1 je zde patrná vyšší míra vypnutí plechu, kdy ztenčení v místě přechodového rádiu dosahuje přibližně hodnoty 27 %. Míra ztenčení v případě varianty číslo 2 je oproti tomu mnohem příznivější a lokálně dosahuje maxima okolo 24 %. Obě varianty jsou tedy z hlediska míry ztenčení vyhovující, neboť v žádném místě výlisku nedochází k překročení limitní hodnoty maximálního ztenčení, která činí 30 %. Tato analýza tedy jasně ukazuje, že v případě specifikace tlakově závislého koeficientu tření $\mu = 0,12$ dochází ke snížení míry ztenčování.

Výstupní výlisek z OP20 rovněž v obou případech nevykazuje náchylnost na vznik zvlňnění povrchu. Z hlediska vyhodnocení dílčích kvalitativních parametrů je tak díl plně vyhovující a lze provést jeho další zpracování.

V průběhu operace číslo 30 dochází primárně k odstranění přebytečného materiálu. Zpracováváný díl musí být v průběhu operace zejména vhodně přidržen, a to i podél střížných hran. Díky vhodnému přidržení, tedy dle simulace, prakticky nedochází k deformaci či ovlivnění již vytvarovaných ploch. Tato skutečnost je patrná dle následujícího Obrázku 57.



Obrázek 57 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP30 – Ztenčení - Varianta 1 a 2

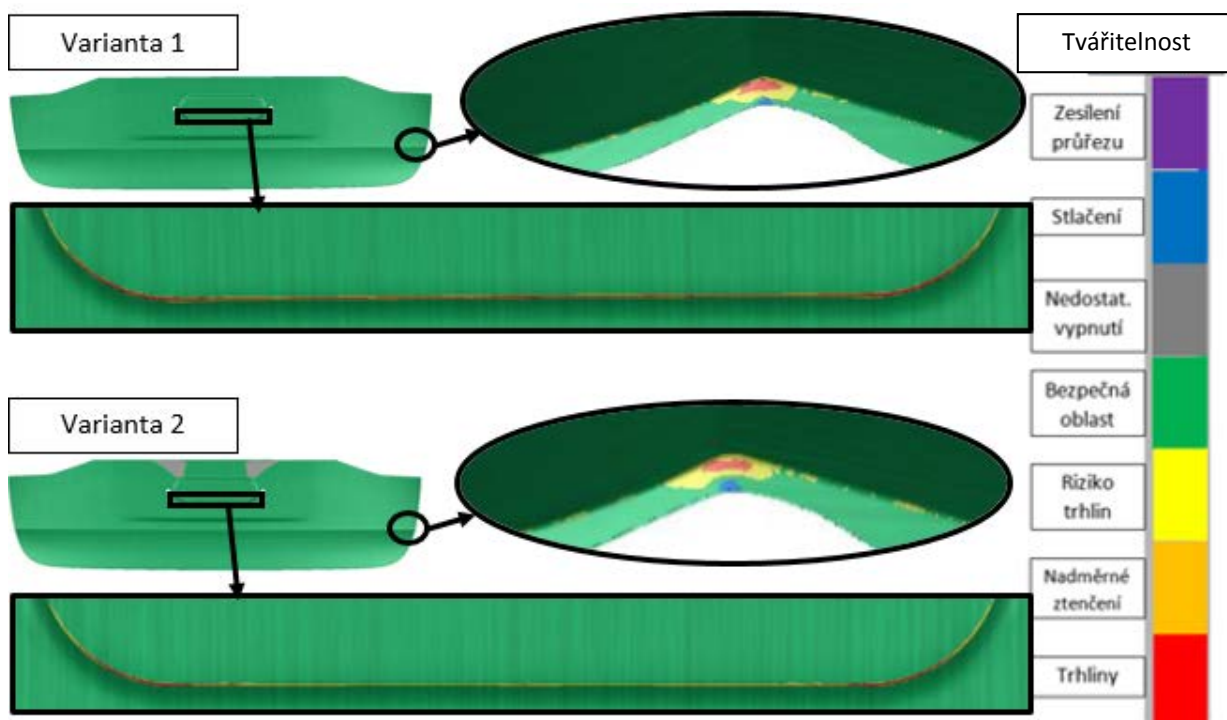
Z obrázku jasně vyplývá, že hodnoty ztenčení v jednotlivých místech plně odpovídají stavu na konci OP20. V průběhu operace číslo 30 tak nedochází k ovlivnění tvářitelnosti či ztenčení a zároveň nedochází ke vzniku zvlnění povrchu.

Operace číslo 40 je rovněž primárně střížného charakteru, a tak i zde dochází hlavně k odstranění přebytečného materiálu z OP20 dle metodického plánu. Za předpokladu aplikace optimálního přidržení rovněž nedochází k deformaci či jinému ovlivnění výlisku. Dle softwaru tak stejně jako u předchozí operace nedochází k ovlivnění tvářitelnosti, ztenčení či zvlnění povrchu výlisku.

Účelem operace číslo 50 je zejména ohyb lemovacích stojen po obvodu dílu a kalibrace oblasti prolisu pro registrační značku vozu. Dochází tedy k finálnímu dotvarování všech ploch, a to tak, aby výlisek rozměrově a kvalitativně odpovídal parametrům předepsaným dle technického návrhu.

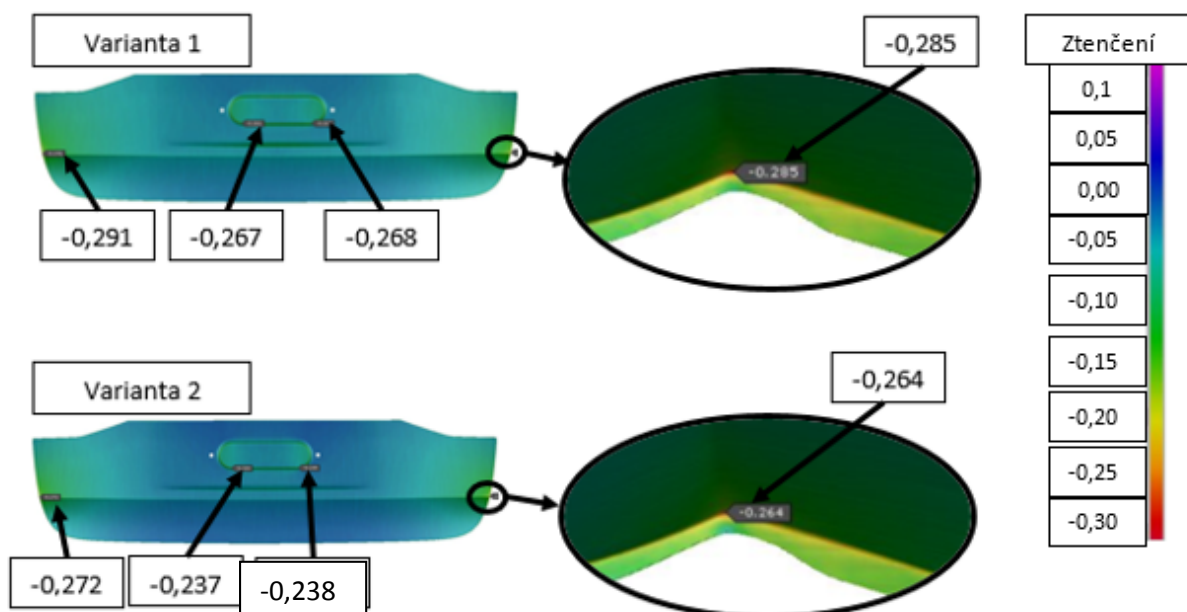
Vyhodnocení tvářitelnosti (Obrázek 58) především znázorňuje vznik potenciálně problematické oblasti v místě zakončení designové hrany u ohybového rádiu lemovací stojny. Dle výsledků simulace zde díl vykazuje zvýšenou náchylnost na vznik trhlin, kde by mohlo docházet k případnému porušení integrity a prasknutí výlisku. Především v této oblasti je tedy nezbytně nutné dbát zvýšené pozornosti a v případě, že bude docházet ke vzniku trhliny, provést geometrickou korekci nástroje. Z hlediska srovnání návrhů číslo 1 a 2 vyplývá, že v případě první varianty vykazuje výlisek vyšší náchylnost ke vzniku trhlin v oblasti prolisu pro registrační značku.

Vyhodnocení tvářitelnosti na konci OP50 lze pro obě varianty pozorovat na následujícím Obrázku 58.



Obrázek 58 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP50 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2

Výše zobrazená problematická oblast u ohybového rádiu prakticky nevykazuje pozorovatelný rozdíl a její vliv je tedy nezbytně nutné vyhodnotit pomocí analýzy ztenčení, kterou lze pozorovat na dalším Obrázku 59.

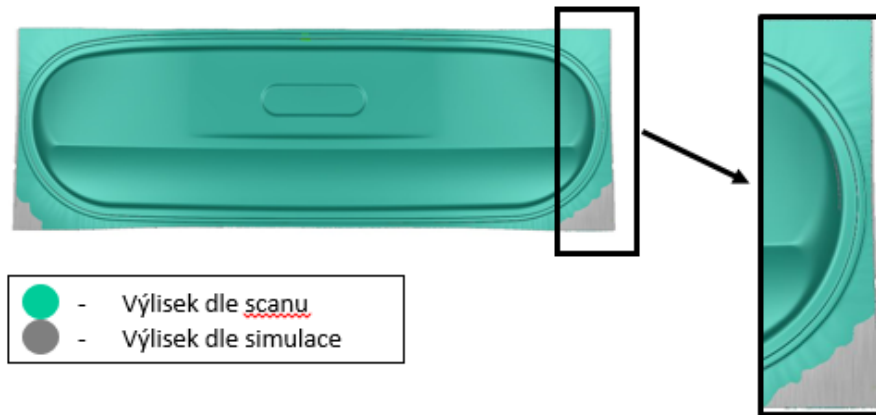


Obrázek 59 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP50 - Ztlnění - Varianta 1 a 2

Výše uvedená analýza ztenčení ukazuje, že v případě návrhu číslo 2 dochází k příhodnějším tváření dílu, neboť ztenčení v místě ohybového rádiu dosahuje přibližně 26,4 %, což představuje zlepšení oproti 28,5 % v případě návrhu číslo 1.

4.5.4 Spodní díl vnější 5E7.827.107 – Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku

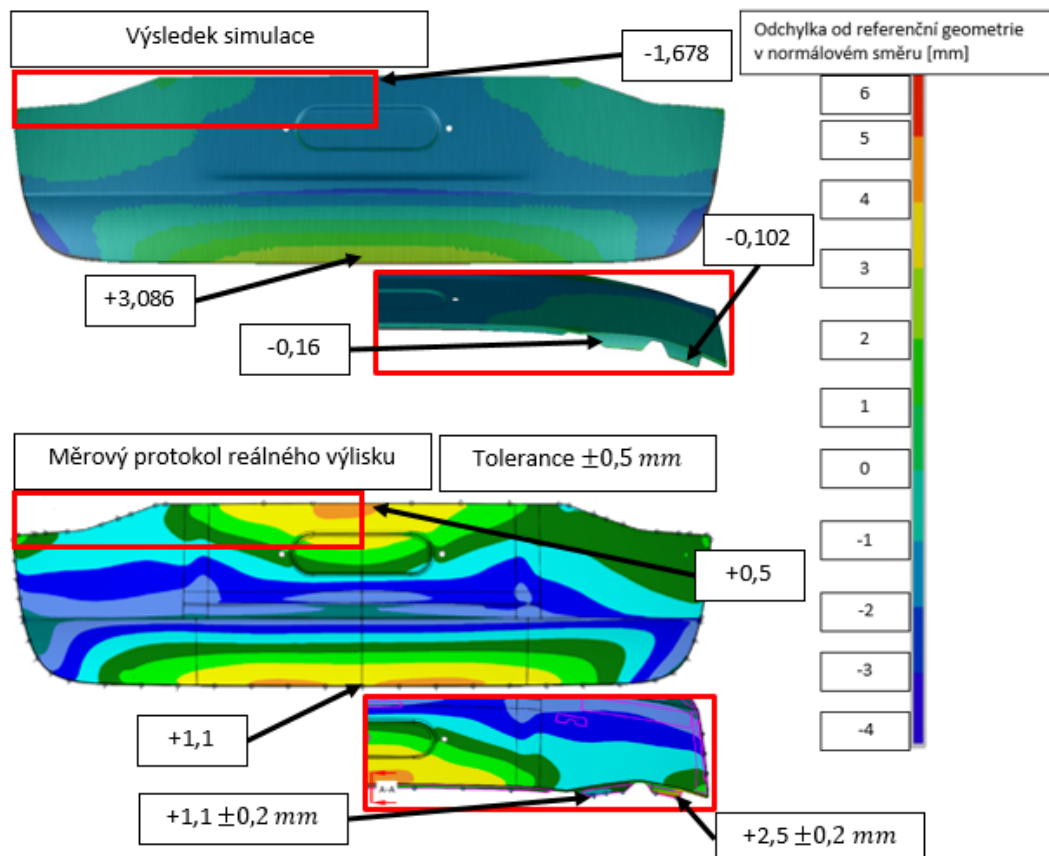
V rámci této podkapitoly bude vyhodnocena pouze varianta číslo 2, tedy tlakově závislý koeficient tření $\mu = 0,12$, neboť tato varianta poskytuje příznivější výsledky. Srovnání výlisku dle simulace a scanu reálného výlisku na konci operace číslo 20 je zobrazeno na Obrázku 60.



Obrázek 60 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vtahy v OP20

Z tohoto obrázku vyplývá, že vtahy jsou po celém obvodu prakticky identické. Tvarové plochy mají ekvivalentní tvar, avšak nedosedají na sebe. Tato skutečnost je způsobena mezioperačním odpružením, které u tohoto dílu dosahuje mnohem vyšší míry, a to z důvodu využití dvoufázové výšepevné oceli.

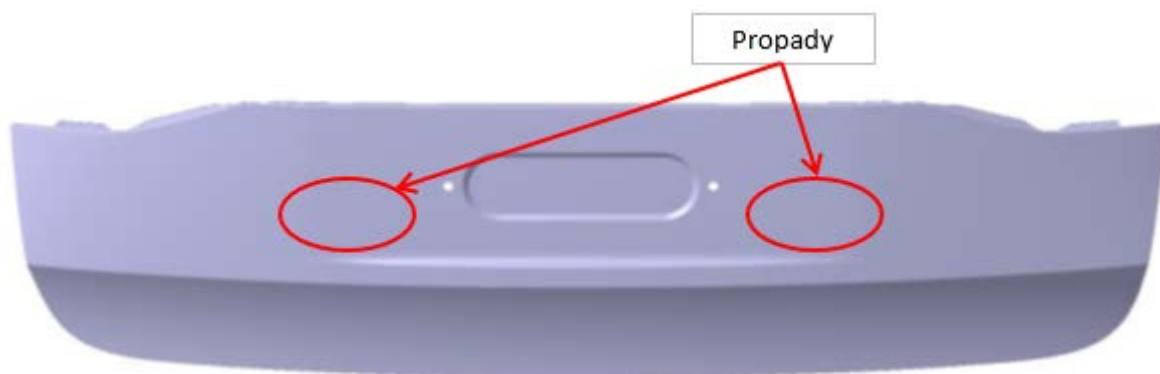
Vyhodnocení odpružení pro finální díl 5E7.827.107 je graficky znázorněno na níže uvedeném Obrázku 61.



Obrázek 61 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Odpružení

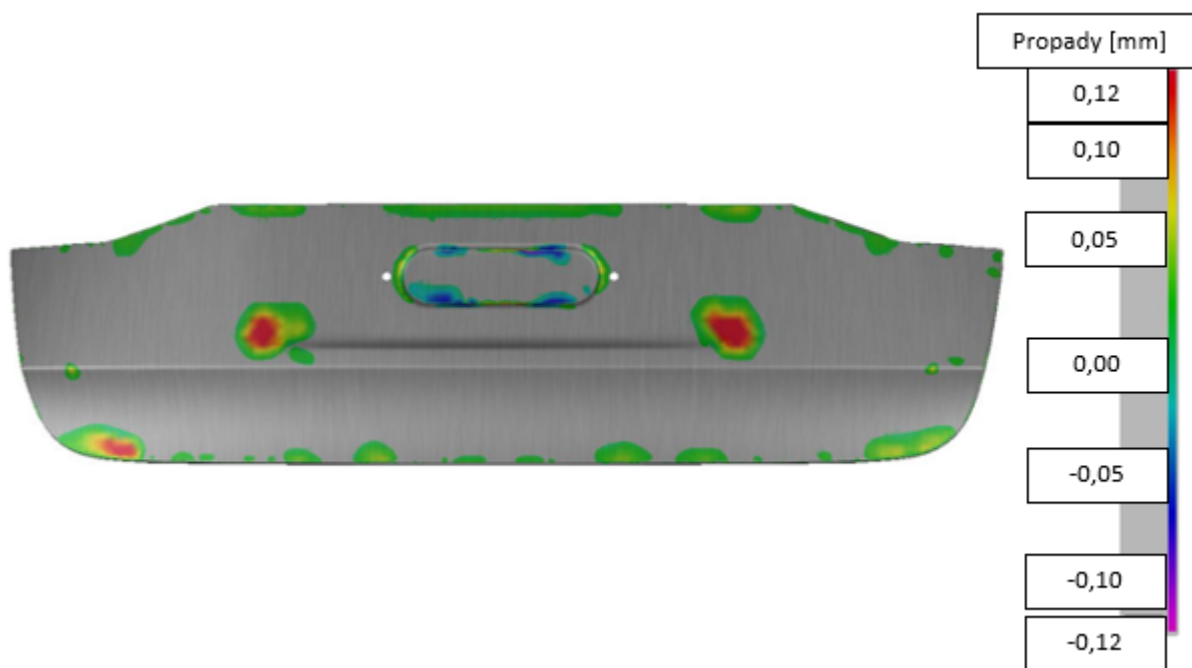
Srovnání simulace a reálného výlisku z hlediska odpružení poskytuje poměrně rozdílné výsledky. Určitou míru podobnosti trendu vykazuje výlisek ve své spodní části, avšak liší se zejména hodnotami. V místě, kde simulace předpovídá odpružení okolo 3 mm, dosahuje reálný výlisek hodnoty odchýlení pouze $1,1 \pm 0,5$ mm. Největší rozdíl pak nastává v oblasti lemovací stojen, kde v případě reálného výlisku dochází k lokálnímu vychýlení od referenční geometrie až 2,5 mm a v případě simulace k vychýlení přibližně 0,1 mm. Z této skutečnosti lze tedy usoudit, že simulace v tomto případě neaproximuje míru odpružení přesně. Otázkou tak je, zdali tato chyba vzniká v důsledku nastavení samotného měření odpružení nebo v důsledku toho, jak software aproximuje odpružení dvoufázového výšepevného plechu.

Protokoly auditových závad primárně ukazují, že v případě dílu 5E7.827.107 dochází hlavně ke vzniku propadů, jenž jsou zobrazeny na Obrázku 62. Auditová kontrola naopak nenašla případný vznik zvlnění či extrémního ztenčování plechu.



Obrázek 62 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Auditové závady

Nalezené propady geometrie rovněž předpovídá i samotná numerická simulace, což je zřetelně pozorovatelné na níže uvedeném Obrázku 63. Z hlediska srovnání výsledků simulace a reálného výlisku se tak dá hovořit o obdobném chování výlisku.



Obrázek 63 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vznikající propady

4.6 Díl vnitřní 5E7.827.159 – Simulace lisovacího procesu

Vnitřní díl 5E7.827.159 představuje hlavní strukturální komponentu konstrukce 5. dveří Škody Octavia IV. generace. Právě tento díl slouží k uložení a propojení externě poptávaných strukturálních komponent a vnějších pohledových dílů vyrobených ve Škoda Auto. Tato vnitřní komponenta je zobrazena na následujícím Obrázku 64.



Obrázek 64 - Díl vnitřní 5E7.827.159

4.6.1 Díl vnitřní 5E7.827.159 – Základní parametry

Vnitřní díl 5E7.827.159 je vyroben z materiálu CR4 – GI40, jehož přesné mechanické vlastnosti, dle databáze materiálových dat softwaru AutoForm, jsou uvedeny v následující Tabulce 5. Pro znázornění tabulka dále uvádí chemické složení hlubokotažné oceli jakosti CR4, a to dle normy ČSN EN 10346.

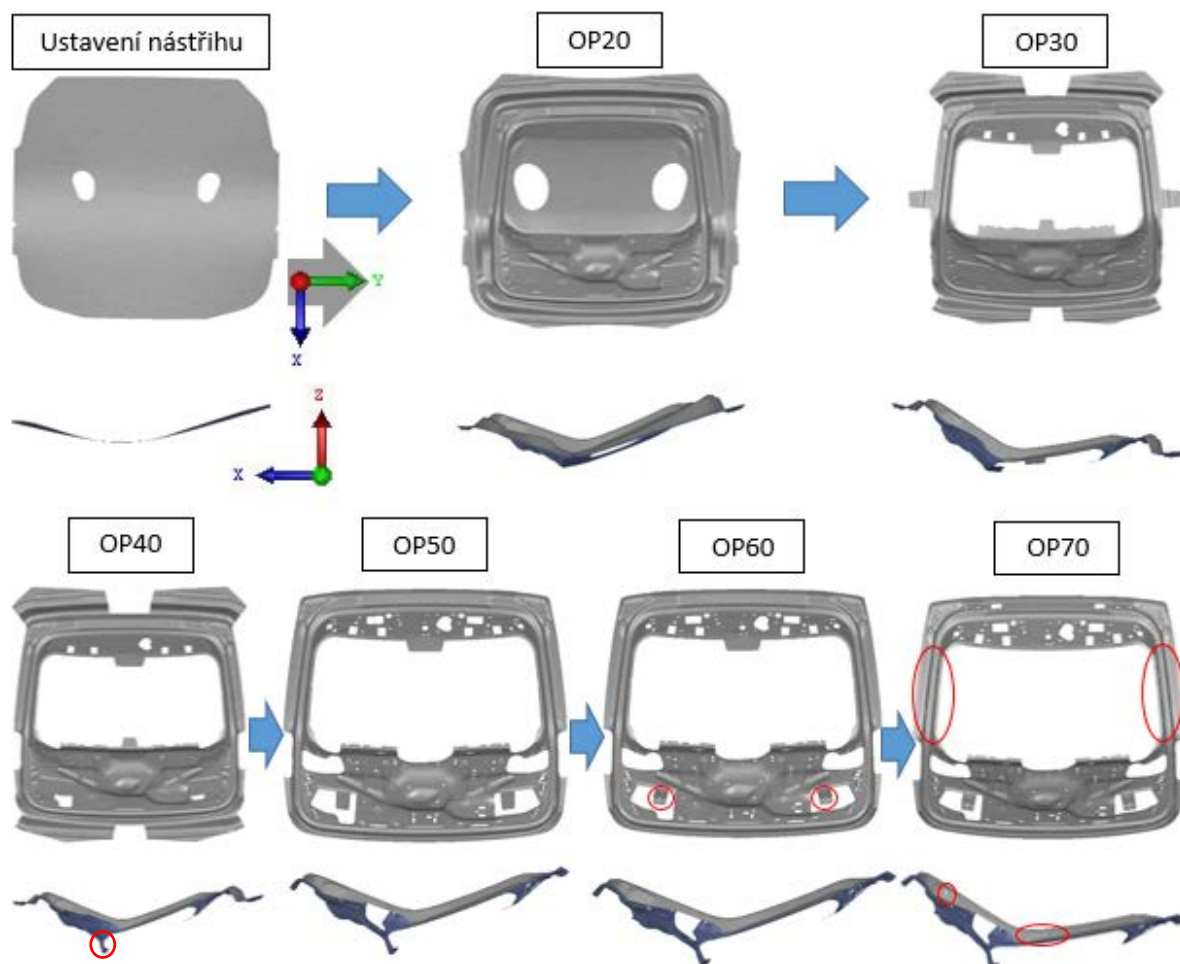
Tabulka 5 - Díl 5E7.827.159 – Základní parametry, chemické složení, mechanické vlastnosti, [32]

Stav TM				13			
Tloušťka materiálu				0,65 mm			
Materiál – CR4 – GI40-U-O							
<i>Chemické složení [v hm. %]</i>							
C max	Si max	Mn max	P max	S max	Ti max	-	-
0,12	0,5	0,6	max 0,1	max 0,045	0,3	-	-
<i>Mechanické vlastnosti</i>							
σ_0 [MPa]	R_m [MPa]	n [-]	A_g [%]	r_0 [-]	r_{45} [-]	r_{90} [-]	r_m [-]
133,9	291,7	0,254	29,8	2	1,7	2,4	1,95

Dílu 5E7.827.159 je předepsán materiál jakosti CR4, jenž odpovídá hlubokotažné oceli DX56D, což je feritická ocel, která je díky své tvářitelnosti vhodná pro operace hlubokého tažení. Tyto vlastnosti jsou zejména pro tento díl velmi žádoucí, neboť zvolená komponenta je poměrně geometricky složitá. Vstupní plech o tloušťce 0,65 mm je za účelem zajištění korozní odolnosti výsledného dílu rovněž opatřen vrstvou žárového zinku o tloušťce 4 μm , což vyplývá z označení GI40. [30]

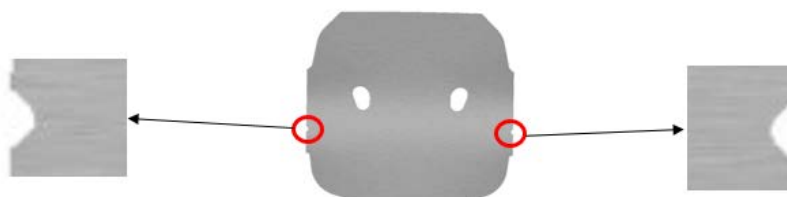
4.6.2 Díl vnitřní 5E7.827.159 – Výrobní postup

Schéma metodického plánu vnitřního dílu 5E7.827.159 lze pozorovat na Obrázku 65. V tomto případě probíhá výroba pomocí šesti dílčích tvářecích operací, a to hlavně z důvodu vyšší geometrické náročnosti dané součásti. Tento díl představuje de facto primární spojovací člen všech součástí sestavy 5. dveří, tudíž je naprosto nezbytné jeho přesné zpracování, a to tak, aby bylo zajištěno bezproblémového spojení celé sestavy.



Obrázek 65 - Díl 5E7.827.159 - Sled výrobních operací

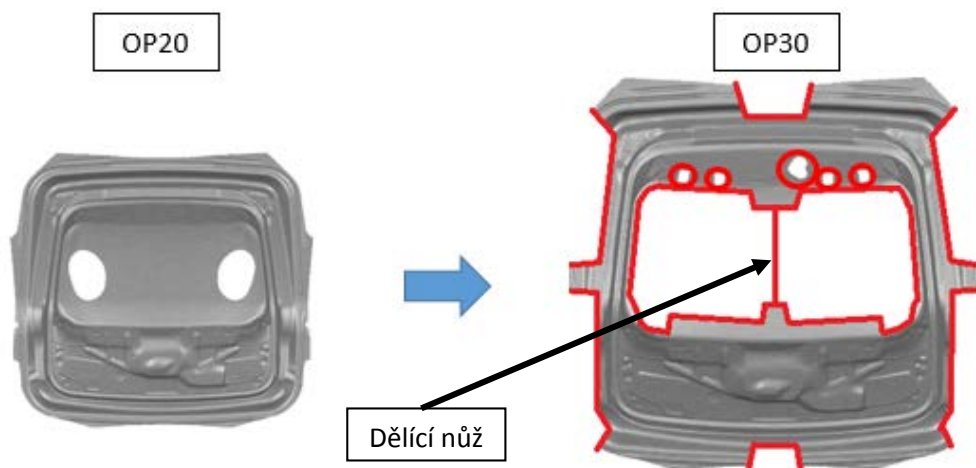
Výrobní proces je zahájen ustavením nástřihu do prostoru lisovacího nářadí v operaci číslo 20, čehož je dosaženo pomocí středících kolíků, které dosednou do speciálních výřezů v nástřihu plechu. Zobrazení těchto výřezů na přístřihu plechu lze pozorovat na následujícím Obrázku 66. Takto ustavený nástřih umožňuje dosáhnout optimálního sevření přidržovače a správného vylisování brzdých lišt. Přidržení je docíleno pomocí spodního (1000 kN) a vrchního přidržovače (1750 kN). V průběhu tažení pak dochází k optimálnímu vypínání a distribuci materiálu. V případě absence středících kolíků by mohlo dojít k posunutí nástřihu, což by vedlo ke špatnému vylisování brzdých lišt a nevhodnému vtahování materiálu.



Obrázek 66 - Díl 5E7.827.159 - Zobrazení zářezů pro středící kolíky na přístřihu plechu.

V rámci prvního kroku, tedy operace číslo 20, je provedeno hluboké tažení, jehož účelem je vytvarování rozměrově přesného dílu, který svým primárním tvarem téměř odpovídá dílu finálnímu, kromě specifických ploch, jenž jsou předmětem navazujících tvářecích operací. Z hlediska namáhání materiálu se tedy jedná o nejnáročnější operaci v celém výrobním procesu a zároveň dochází k největší míře přetvoření. Z tohoto důvodu je tedy nezbytně nutné, aby navržená geometrie odpovídala reálným schopnostem zvoleného materiálu.

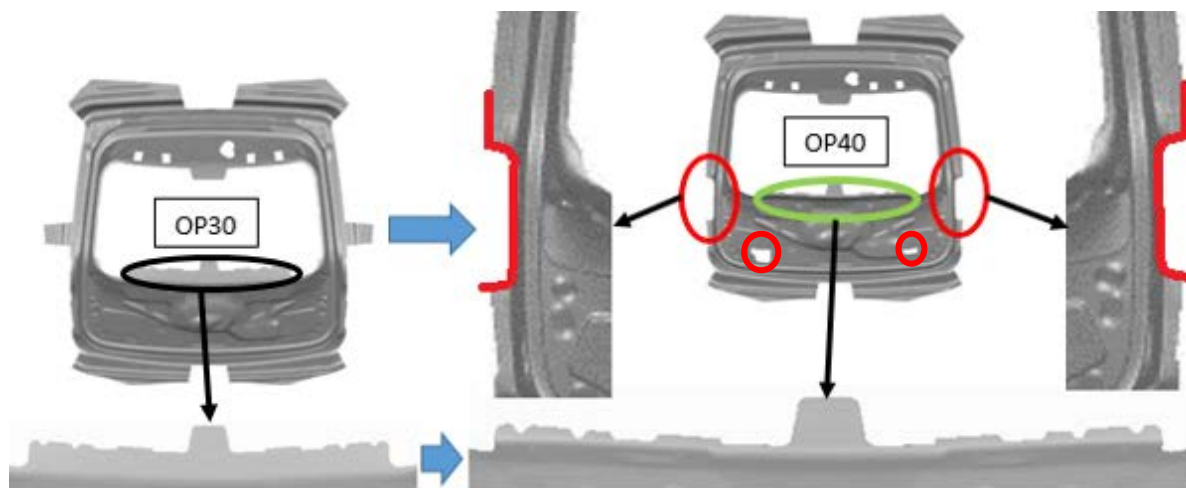
Operace číslo 30 je primárně střížného charakteru a v první řadě dochází zejména k odstranění zbytkového materiálu z operace hlubokého tažení. V druhé řadě pak dochází k prostřížení některých funkčních otvorů v horní části výlisku. Metodický postup OP30 je znázorněn na následujícím Obrázku 67.



Obrázek 67 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP30

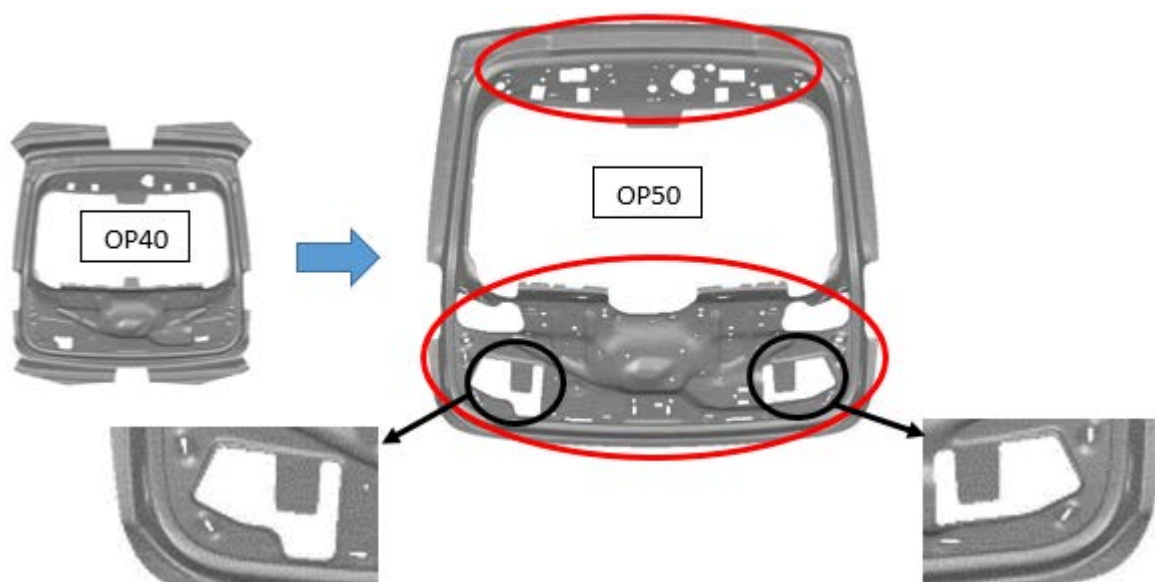
V rámci této operace je zajímavá zejména oblast stříhu otvoru pro zadní sklo, a to z důvodu využití takzvaného dělicího nože, který slouží k rozdělení odstříženého materiálu. Tento úkon je primárně prováděn za účelem zajištění bezproblémového odvodu odpadního materiálu z prostoru náradí. Za účelem zajištění stability procesu je výlisek v celém průběhu operace přidržován (vrchní přidržovač – 1000kN), čímž se rovněž zabráňuje deformaci již finálně zhotovených ploch. Po úspěšném provedení operace číslo 30 je výlisek přemístěn do pracovního prostoru náradí OP40.

Následující operace číslo 40 kombinuje užití střížných a kalibračních nástrojů. Dle uvedeného Obrázku 68 tedy současně probíhá kalibrace plochy v prostoru pro zadní sklo (zeleně označená oblast) a ostřížení podél červených střížných křivek.



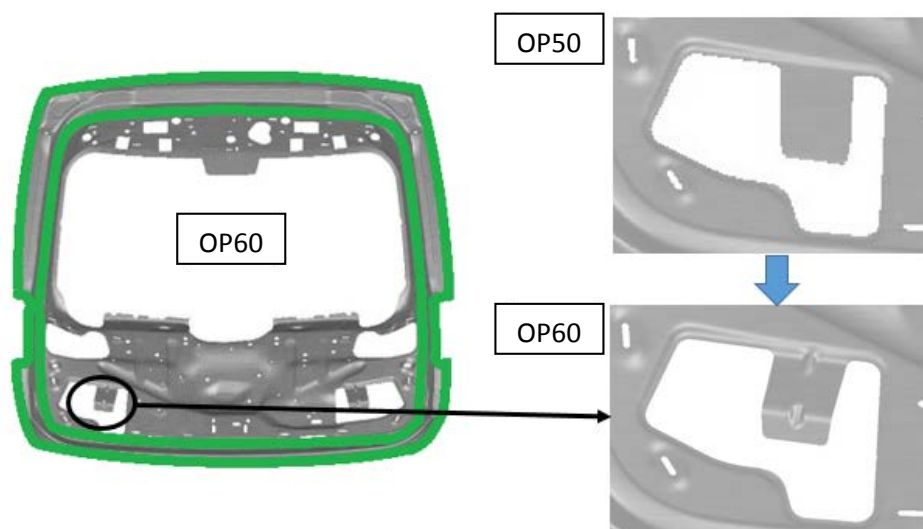
Obrázek 68 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP40

Operace číslo 50 je primárně střížného charakteru a v jejím průběhu dochází zejména k prostřížení většiny zbývajících otvorů a k odstranění zbývajícího odpadního materiálu z operace číslo 20 (hluboké tažení). Rovněž dochází k prostřížení v oblasti strukturních stojen, které budou dále dotvarovány v průběhu operace číslo 60. Schematicky jsou střížné zóny znázorněny červenými oblastmi na následujícím Obrázku 69. Vzhledem k velkému počtu prostřihovaných otvorů je nezbytně nutné dbát na velmi důsledné přidržení v okolí působnosti střížníků, a to zejména za účelem zachování tvarové přesnosti okolních ploch. Přidržení v těchto oblastech zároveň zvyšuje kvalitu ostřížených hran a snižuje náchylnost ke tvorbě otřepů v důsledku stříhu. Síla vrchního přidržovače zde proto činí 600 kN.



Obrázek 69 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP50

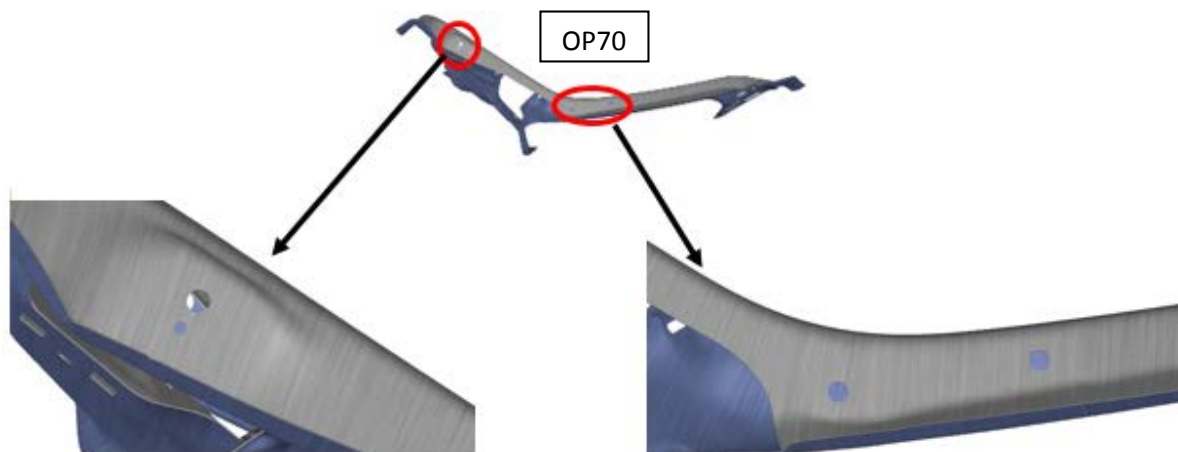
Tvářecí operace označená OP60 je čistě kalibračního charakteru a v jejím průběhu dochází, mimo jiné, k vytvarování strukturních stojen ("pacek"), které po spojení s dílem 5E7.827.107 plní funkci nosných podpěr. Principiálně je tato stojna vytvarována silovým působením od kalibračního klínu, který v daném místě plech ohýbá do požadovaného směru. Stojna je zároveň opatřena tvarovými prolisy, které mají za následek zvýšení její tuhosti. V průběhu OP60 rovněž dochází ke kalibrování plochy podél vnějšího obvodu dílu. Tato plocha je na níže uvedeném Obrázku 70 vymezena zelenými čarami. Obrázek rovněž zobrazuje detail strukturní stojny ve stavu před a po dokončení tvářecí operace.



Obrázek 70 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP60

V průběhu operace číslo 60 je rovněž nutné díl vhodně přidržovat, čehož je dosaženo pomocí vrchního přidržovače, který působí silou 1600 kN.

Finální operace číslo 70 má za účel prostřížení zbývajících funkčních otvorů na bočních stěnách výlisku. Operace je tedy čistě střížného charakteru a hlavní důraz musí být kladen na optimální přidržení v oblastech podél střížných křivek, a to tak, aby nedošlo k deformaci dříve zhotovených ploch. Tohoto přidržení je zejména dosaženo pomocí vrchního přidržovače, který působí silou 450 kN. Zhotovené otvory v rámci této střížné operace lze pozorovat na následujícím Obrázku 71.

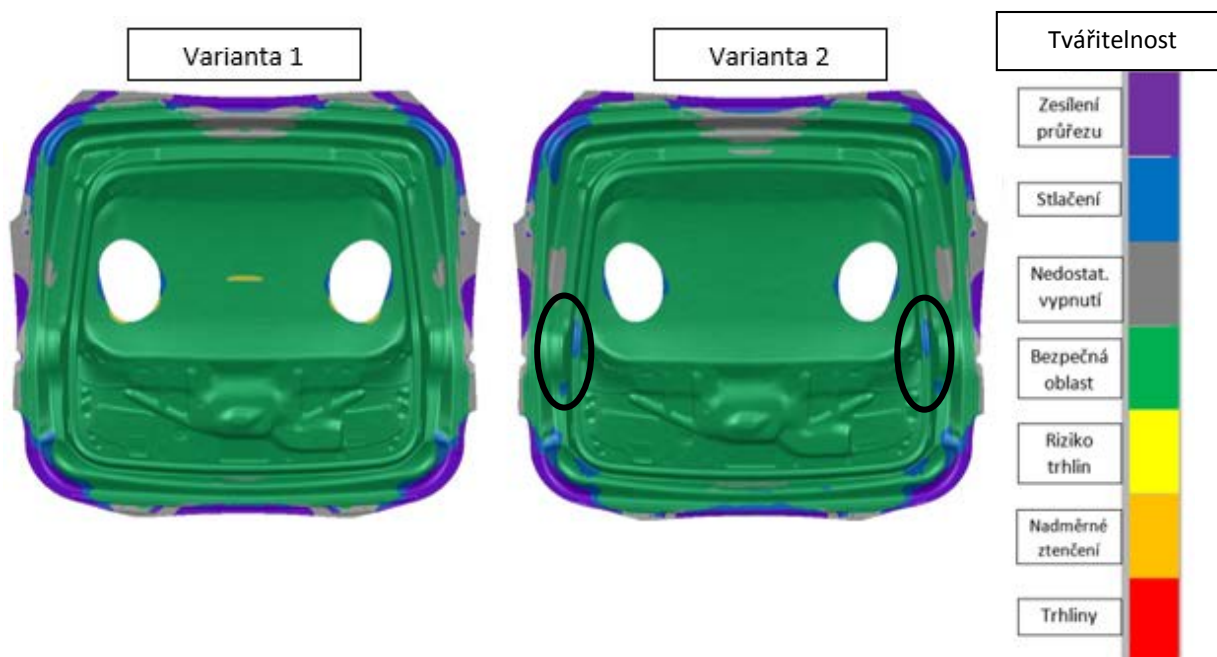


Obrázek 71 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP70

4.6.3 Díl vnitřní 5E7.827.159 – Vyhodnocení simulace dle návrhu varianty 1 a 2

Výrobní simulace dílu 5E7.827.159 probíhá ve dvou variantách, které se primárně liší definicí koeficientu tření μ . V případě varianty číslo 1 je koeficient tření definován jako konstanta $\mu = 0,15$. Varianta číslo 2 pak pracuje s návrhem tlakově závislého koeficientu tření $\mu = 0,12$.

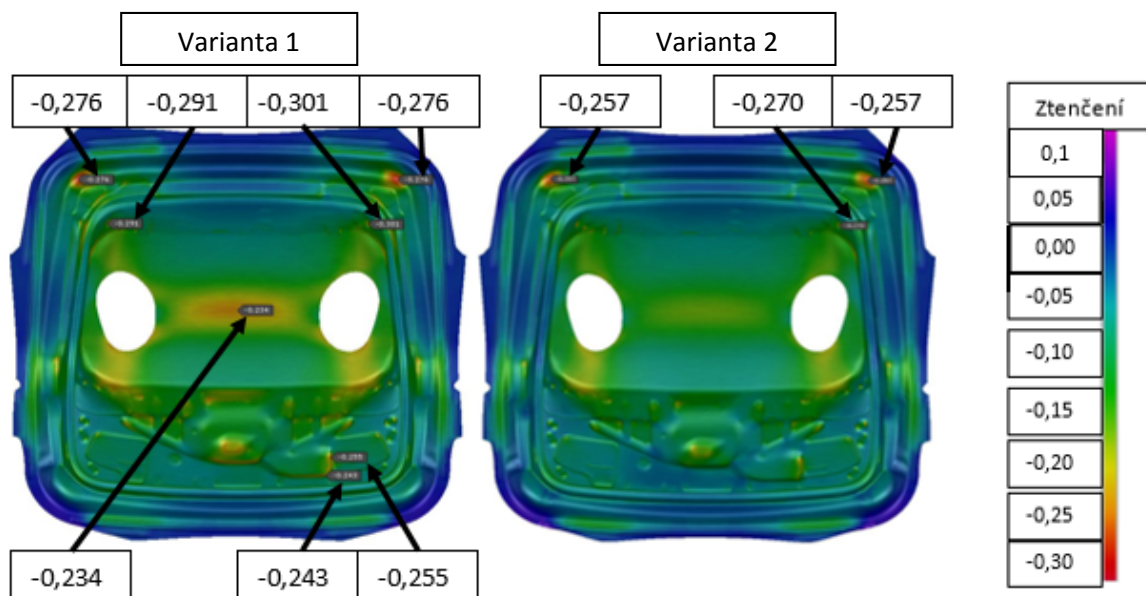
Prvním krokem v rámci výroby vnitřního dílu 5E7.827.159 je dle metodického plánu takzvaná operace hlubokého tažení (OP20). Výsledná tvářitelnost dílu na konci této operace je pro obě varianty znázorněna na následujícím Obrázku 72.



Obrázek 72 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP20 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2

Z obrázku vyhodnocení tvářitelnosti je patrné, že v případě vyššího koeficientu tření dochází k ovlivnění oblasti mezi nástřihovými prostřihy. V tomto místě tak potenciálně může docházet ke tvorbě trhlin. V případě tlakově závislého koeficientu tření tato riziková oblast nevzniká, avšak dochází k tlakovému namožení výlisku ve zvýrazněných oblastech. Míra tlakového namožení je pak dále rozebrána v rámci vyhodnocení ztenčení.

Analýzu ztenčení lze pozorovat na níže uvedeném Obrázku 73, ze kterého je patrné, že varianta číslo 2 dosahuje ve znázorněných oblastech mnohem menší míry ztenčení a zároveň nevykazuje výrazný nárůst tloušťky plechu v oblasti tlakového namožení. V případě varianty číslo 1 je zřetelná vyšší míra ztenčení, která lokálně dosahuje i hodnoty 30,1 %, čímž dochází k překročení limitní podmínky.



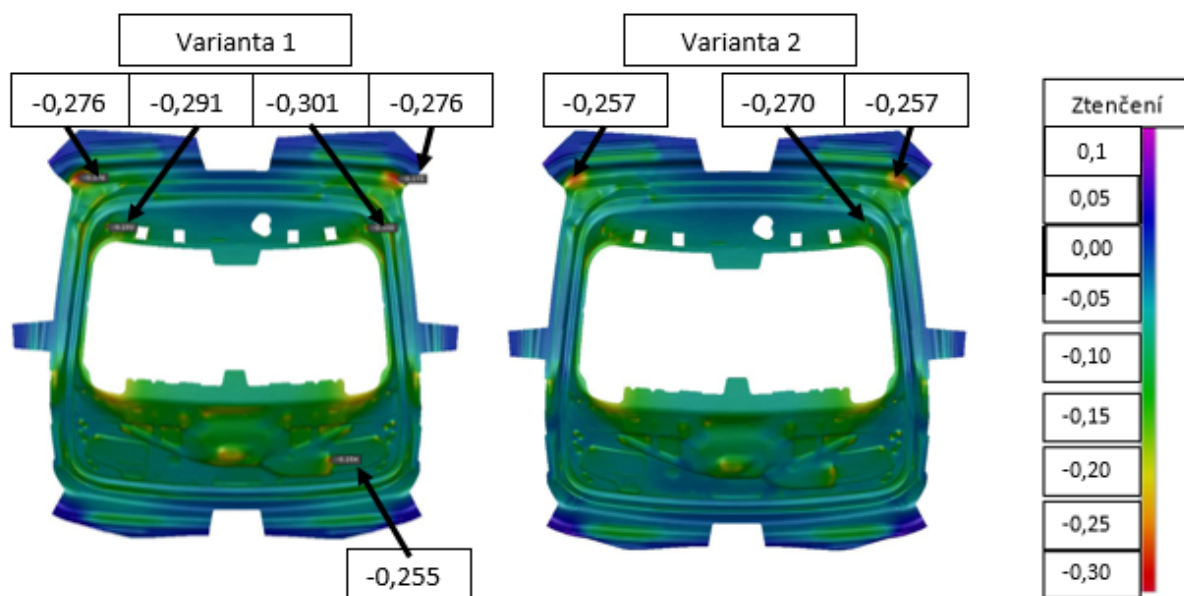
Obrázek 73 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 1 a 2

V důsledku hlubokého tažení zároveň dochází ke vzniku značného zvlnění povrchu, což je zřetelné dle následujícího Obrázku 74. Míra zvlnění je v případě varianty číslo 2 viditelně horší a bude dále diskutována v rámci vyhodnocení finální operace číslo 70.



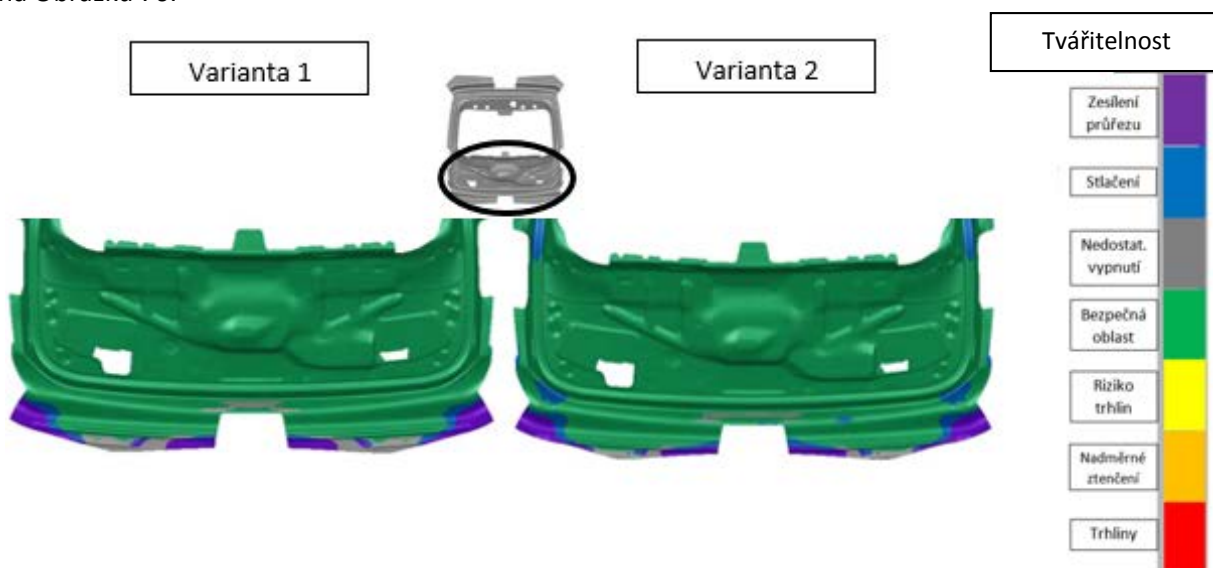
Obrázek 74 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP20 - Zvlnění - Varianta 1 a 2

Účelem střížné operace číslo 30 je odstranění přebytečného materiálu, tudíž nedochází ke zřetelným změnám tvářitelnosti či míry ztenčení, což je patrné dle Obrázku 75. V důsledku vhodného přidržení tak výlisek není nijak deformován.



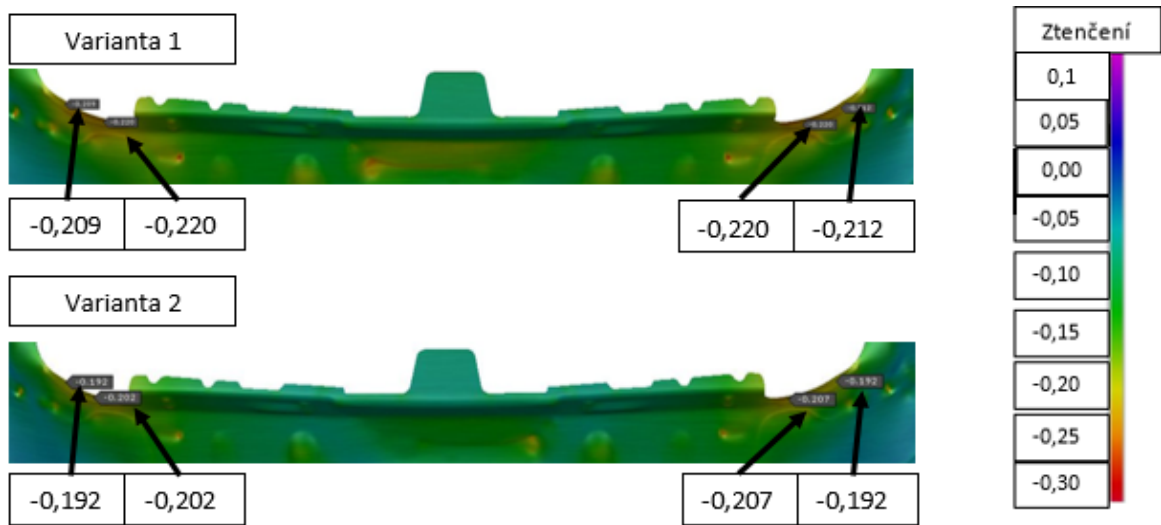
Obrázek 75 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP30 - Ztenčení - Varianta 1 a 2

Operace číslo 40 má zejména za účel kalibrovat tvarovou plochu v oblasti otvoru pro zadní sklo, která slouží pro spojení daného dílu s vnějším horním dílem 5E7.827.105. V rámci operace zároveň, dle metodického postupu, dochází k provedení střížných úkonů ve spodní části výlisku. Primárně je provedeno částečné prostřížení otvorů v oblasti budoucích strukturálních stojen ("pacek"), které jsou vystříženy za účelem zajištění optimálního odvodu odpadního materiálu. Rovněž je v rámci operace provedeno ostřížení v prostoru usazení zadních světelných reflektorů. Tyto tvářecí a střížné úkony zřetelně neovlivňují tvářitelnost daného výlisku, což je patrné dle následujícího znázornění na Obrázku 76.



Obrázek 76 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP40 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2

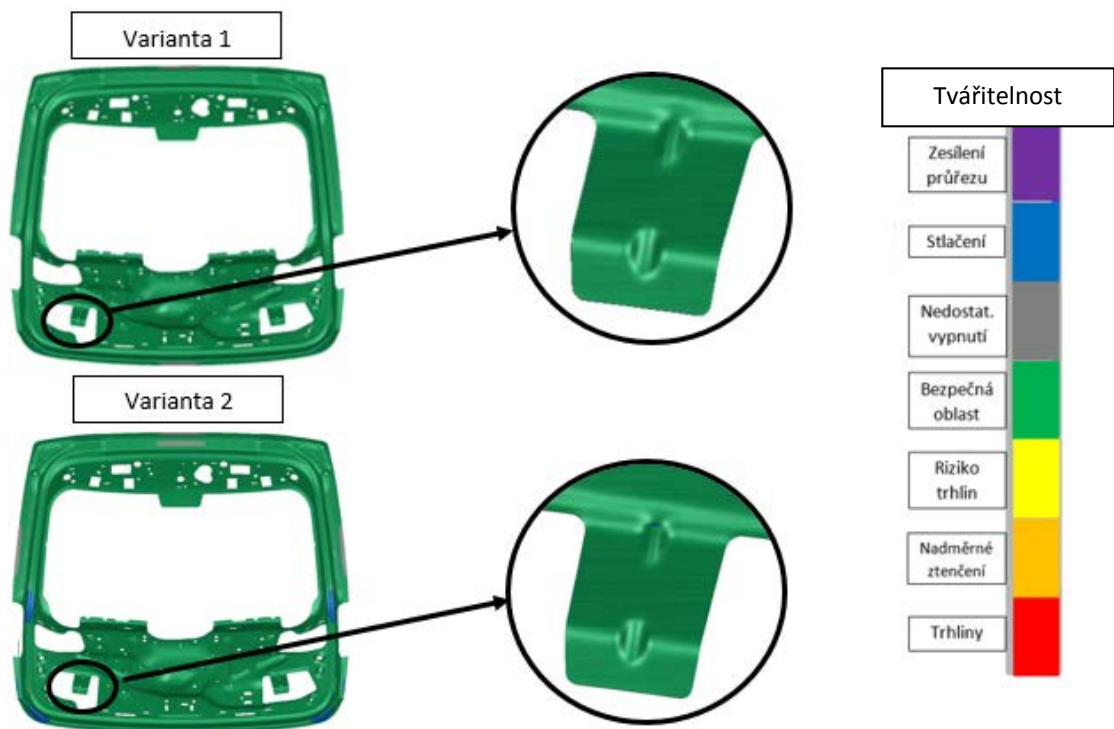
Vyhodnocení ztenčení v rámci OP40 lze pozorovat na dalším Obrázku 77, který jasně ukazuje, že v případě tlakově závislého koeficientu tření, dochází v oblasti tvarového prolisu k menší míře ztenčování, jenž lokálně dosahuje maxima 20,7 %. V případě varianty číslo 1 dosahuje v této oblasti ztenčení lokálního maxima 22 %.



Obrázek 77 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP40 - Ztenčení - Varianta 1 a 2

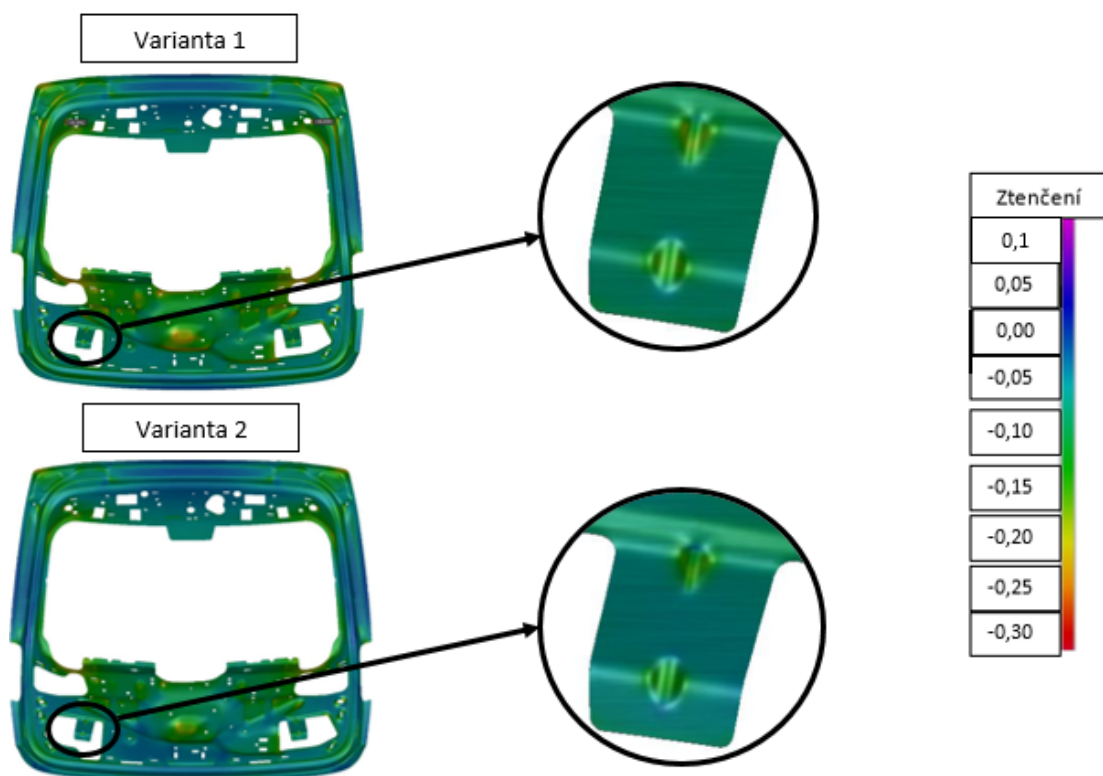
V rámci operace číslo 50 dochází dle metodického plánu k ostřížení přebytečného materiálu a prostřížení otvorů, což za předpokladu aplikace vhodného přidržení znamená, že výlisek není zřetelně deformován či jinak ovlivněn.

Primárním účelem operace číslo 60 je dle metodického postupu nejprve kalibrace plochy po obvodu dílu a potom úkon vylisování strukturálních stojen. Z hlediska vyhodnocení tvářitelnosti (Obrázek 78) je patrné, že v důsledku operace u dílu nedochází k výrazným změnám, a to v případě obou variant.



Obrázek 78 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP60 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2

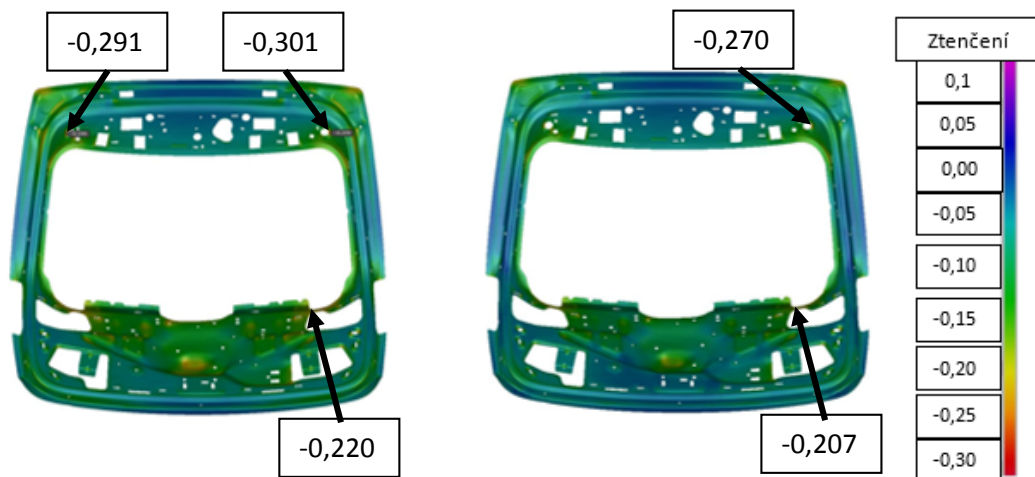
Výsledný vliv kalibračních úkonů, provedených v rámci operace číslo 60, na míru ztenčení je znázorněn na níže uvedeném Obrázku 79.



Obrázek 79 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP60 - Ztenčení - Varianta 1 a 2

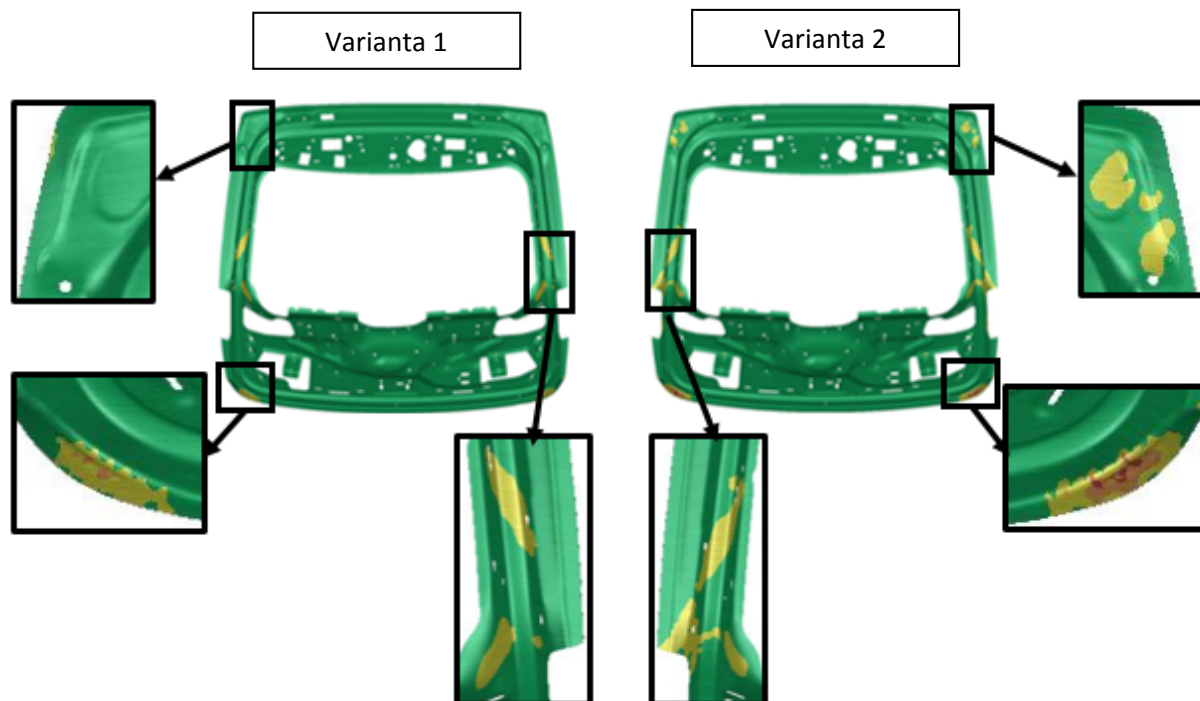
Výše uvedená analýza ztenčení pouze zřetelně ukazuje, že v případě varianty číslo 2 vykazuje výlisek menší míru ztenčení v celé své ploše. Tato skutečnost je však dána výsledkem operace hlubokého tažení, kdy je výlisek dle varianty číslo 2 méně vypínán, a to v důsledku nižší hodnoty koeficientu tření. Z výsledků analýzy tedy není patrná výrazná změna ztenčení, která by se uskutečnila v důsledku operace číslo 60.

Finální operace číslo 70 je primárně střížného charakteru a v jejím průběhu dochází pouze k prostříhu funkčních otvorů na bočních stěnách výlisku. Z tohoto důvodu tedy nedochází ke změně tvářitelnosti či ztenčení oproti stavu na konci operace číslo 60. Tuto skutečnost lze vidět na Obrázku 80, který znázorňuje analýzu ztenčení na konci OP70.



Obrázek 80 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP70 - Ztenčení - Varianta 1 a 2

Náchylnost na vznik zvlnění povrchu lze pro finální výlisek pozorovat na níže uvedeném Obrázku 81. Žlutě vyznačená místa zde vyznačují oblasti potenciální náchylnosti ke vzniku zvlnění povrchu. Červeně zbarvená místa označují oblasti, kde simulace vznik zvlnění přímo predikuje.



Obrázek 81 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP70 - Zvlnění povrchu - Varianta 1 a 2

Z hlediska zvlnění povrchu vykazuje varianta číslo 2 vyšší náchylnost ke tvorbě této povrchové vady, avšak z hlediska tvářitelnosti a ztenčení poskytuje mnohem příznivější výsledek než simulace dle varianty číslo 1.

4.6.4 Díl vnitřní 5E7.827.159 – Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku

Předchozí vyhodnocení lisovatelnosti dílu 5E7.827.159 prokázalo příznivější chování výlisku v případě návrhu dle varianty 2, a proto bude tato varianta využita pro srovnání s reálným výliskem. Nejprve je provedeno srovnání vtaů na konci OP20, které lze pozorovat na dále uvedeném Obrázku 82.



Obrázek 82 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vtahy v OP20

Srovnání vtahů mezi reálným výliskem a výstupem simulace z OP20 (Obrázek 82) ukazuje, že vtahování po obvodu výlisku následuje velmi podobný trend, kromě oblasti ve spodní části, kde je míra vtahování reálného výlisku výrazně vyšší.

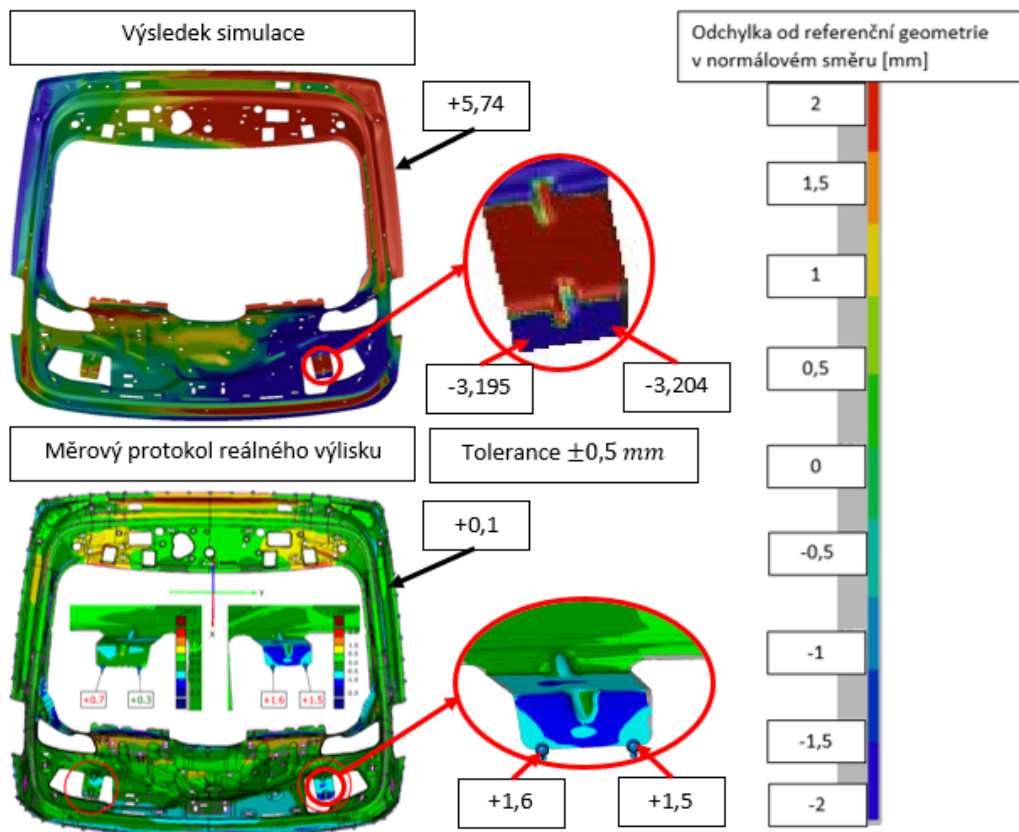
V případě dílu 5E7.827.159 umožňuje scan reálného výlisku rovněž provést kontrolu zvlnění povrchu v místech potenciálního vzniku. Zobrazení těchto potenciálně rizikových míst na reálném výlisku lze pozorovat na dalším Obrázku 83.



Obrázek 83 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vznik zvlnění povrchu na scanu výlisku v OP20

Z obrázku je jasně viditelné, že ve spodní části výlisku dochází ke vzniku zvlnění v místě, kde simulace predikovala vznik vysoce rizikové oblasti. Naopak potenciálně riziková oblast v horní části výlisku vykazuje hlavně namožení a zvlnění je minimální.

Výsledné odpružení (springback) reálného dílu a dílu dle simulace je srovnáno na následujícím Obrázku 84.



Obrázek 84 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Odpružení

Srovnání odpružení (Obrázek 84) poskytuje v případě dílu 5E7.827.159 značně protichůdné výsledky, které se v prakticky celé ploše vylisku liší. Výsledný díl dle simulace například vykazuje vysokou míru odpružení ve své pravé horní části, kde hodnota odchýlení od referenční geometrie dosahuje i hodnoty 5,74 mm. Reálný vylisek však ve stejném místě vykazuje prakticky nulové odchýlení a jeho hodnota se zde pohybuje okolo $0,1 \pm 0,5$ mm. Tato míra neshodnosti je s největší pravděpodobností zaviněna nevhodným sepnutím jedné či více upínek (clampů) v simulaci, což vede k nepřesné aproximaci odpružení.

Z hlediska auditové kontroly docházelo u vylisku 5E7.827.159 k namáhání a praskání některých tvarových ploch v OP20, což bylo dle protokolu řešeno ruční úpravou geometrie náradí. Tyto ruční úpravy však do určité míry porušují zpětnou vazbu vůči simulaci, neboť dochází k částečnému pozměnění geometrie nástroje. Zachování této zpětné vazby by vyžadovalo časově a finančně náročné skenování upravené geometrie lisovacího náradí.

Vybraná problematická místa, kde dochází k namáhání vylisku, jsou pro názornost zvýrazněna na Obrázku 85.



Obrázek 85 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného vylisku - Vybrané auditové závady

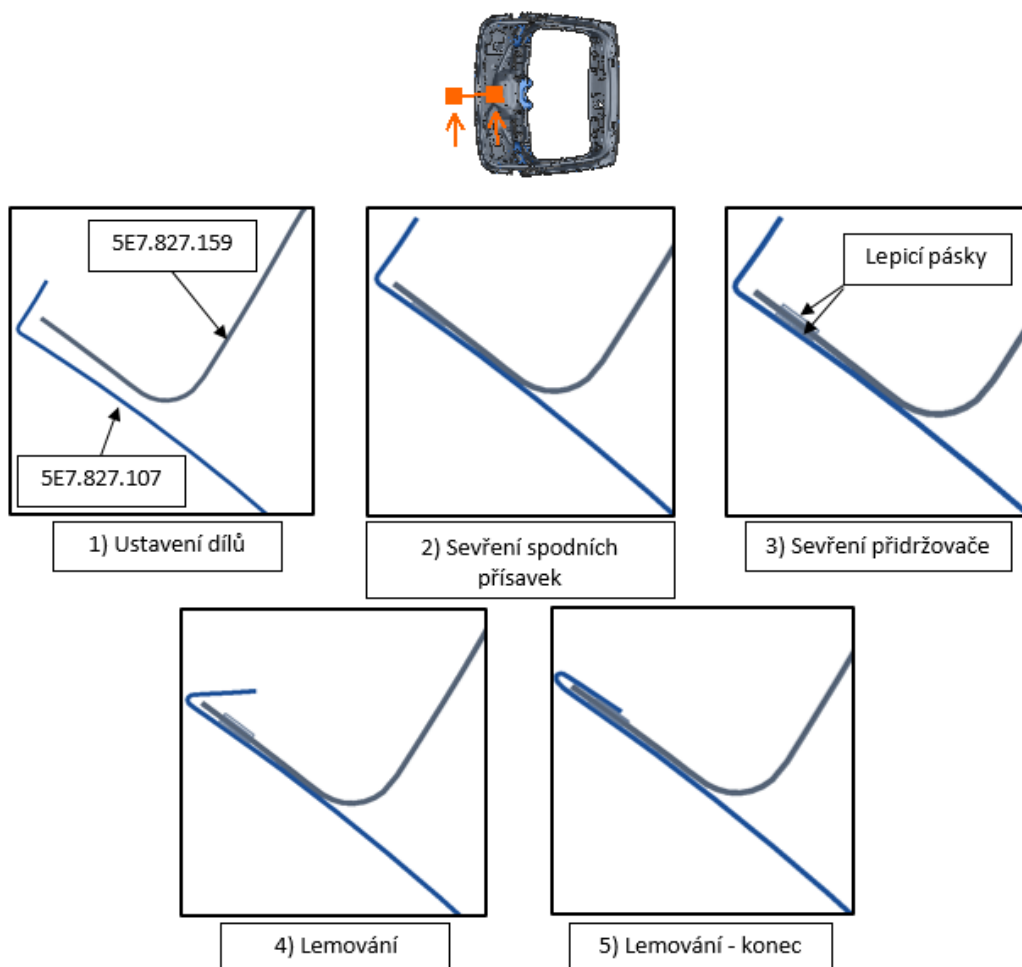
V tomto případě stojí za zmínku, že numerická simulace byla schopná předpovědět namožení a vznik zvlnění ve vyznačených oblastech 1 a 2. Namáhání a praskání vylisku v oblasti nástřihových prostřihů však simulace neukázala. Jak již však bylo zmíněno, kvůli četným ručním úpravám je poměrně složité dohledávat odpovídající stav, který by obsahoval náradí ekvivalentního geometrického tvaru jako v simulaci.

4.7 Sestava 5. dveří - Simulace lemování

Primárním aspektem, ovlivňujícím spojení sestavy 5. dveří, je odpružení (springback). Odpružení vzniká v důsledku uvolnění elastické deformace a může způsobit tvarovou nepřesnost vyráběného dílu. Tato geometrická nepřesnost může následně značně ovlivnit proces spojování všech komponent celé sestavy 5. dveří. Z tohoto důvodu je tak velice žádoucí nejprve proces spojování dílčích plechových dílů nasimulovat.

Numerická simulace lemování umožní identifikovat problémové lokace, kde díly v důsledku odpružení (springbacku) nelicují. Umožní tedy provést nezbytné korekce v rámci lisovacího procesu tak, aby byla snížena míra odpružení v problémových oblastech, čímž bude zaručena plná kompatibilita strukturních a pohledových plechových dílů. Využití simulace lemování tak umožní predikování případných problémů a zajistí možnost jejich včasné a efektivní eliminace. Z výstupu numerické simulace výsledně získáme plnou vizualizaci finální sestavy 5. dveří. Tato simulace je rovněž provedena v prostředí softwaru AutoForm.

V rámci procesu lemování sestavy 5. dveří je nejprve provedeno ustavení dílů do lemovacího přípravku. Po správném ustavení dojde k sevření spodních přísavek na lemovacím loži a přisátí dílů. Spojované díly jsou v předem určených místech slepeny pomocí adhezivních pásek, které jsou rovněž nanесeny v místě zavření lemovací stojny, a to tak, aby došlo k jejímu přilepení. Za zmínku však stojí, že lepidlo získává plný adhezivní účinek až po vytvrzení, které se realizuje v průběhu kataforetického lakování. Následuje sevření vrchního přídržovače a postupné ohýbání lemovací stojny až do jejího uzavření. Schematicky je tento postup znázorněn v řezu na Obrázku 86.



Obrázek 86 - Sestava 5. dveří - Metodický postup lemování

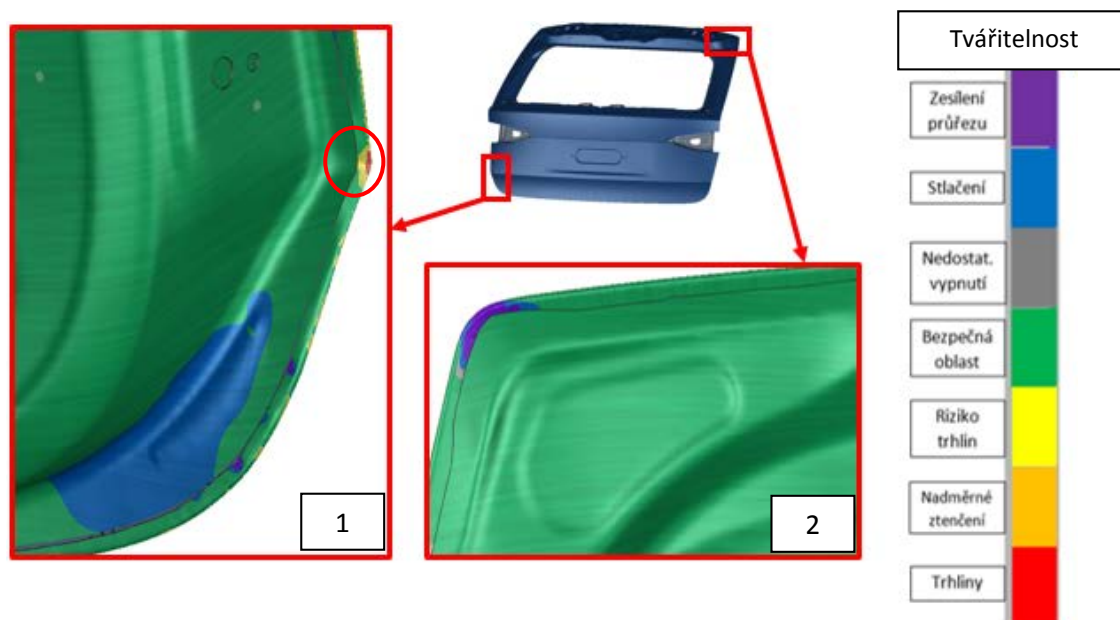
Vizualizace zalemované sestavy 5. dveří se všemi strukturálními komponentami je zobrazena na níže uvedeném Obrázku 87.



Obrázek 87 - Výsledná sestava 5. dveří

4.7.1 Sestava 5. dveří - Simulace lemování - Vyhodnocení

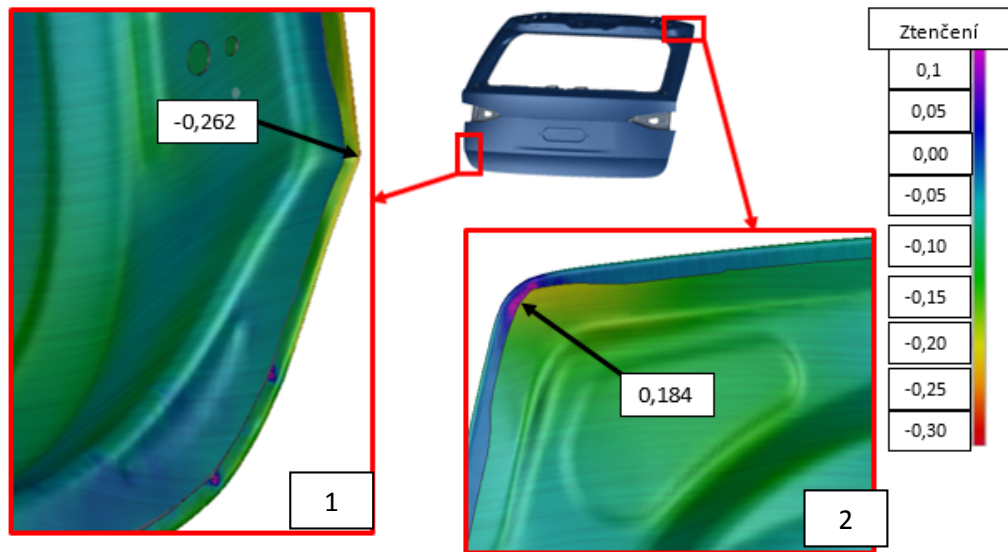
Software umožňuje pro sestavu pátých dveří stejné vyhodnocení jako v případě lisovaných dílů, tudíž je možné hodnotit tvářitelnost či ztenčení jednotlivých plechových komponent v místě spojů. Tato skutečnost je zřetelně viditelná na Obrázku 88, který ukazuje analýzu tvářitelnosti vybraných míst.



Obrázek 88 - Sestava 5. dveří - Vyhodnocení tvářitelnosti

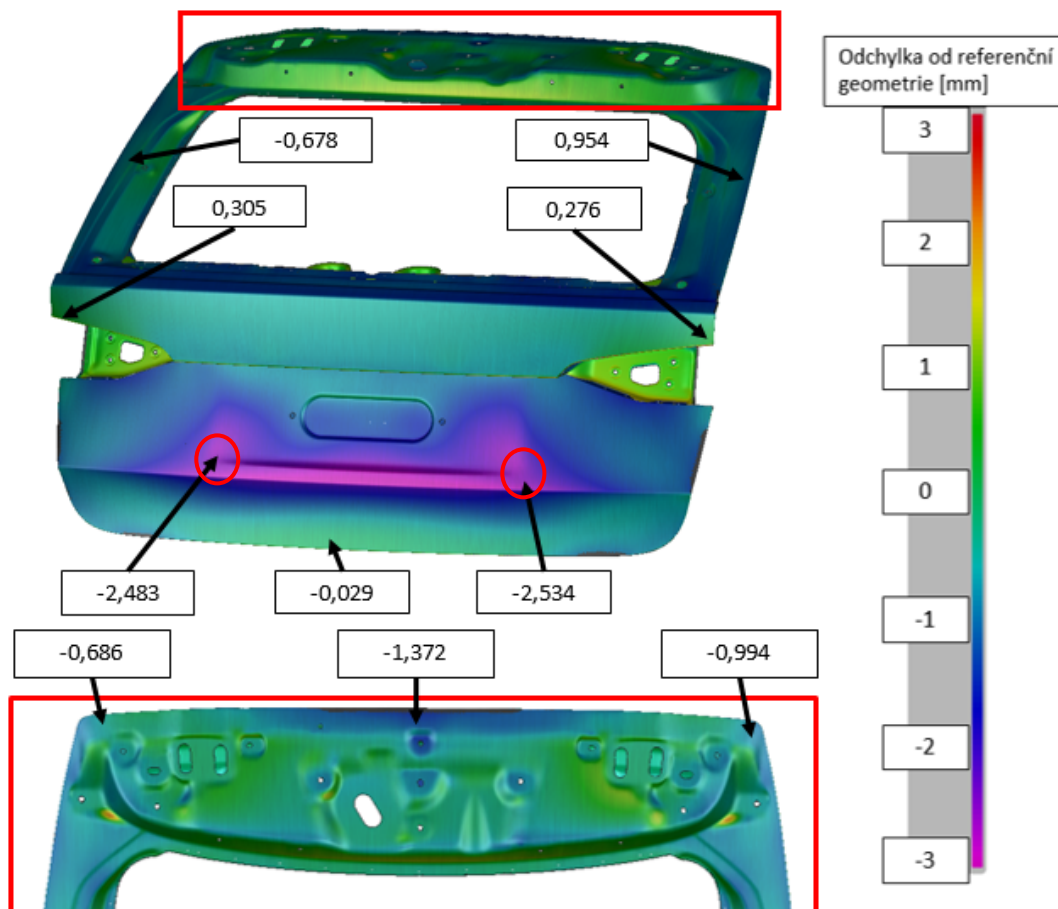
Zobrazené detaily primárně ukazují vybraná potenciálně problematická místa, kde v případě číslo 1 může docházet k vzniku trhlin a v případě číslo 2 naopak dochází k zesilování průřezu v místě lemu.

Analýza těchto potenciálně problematických míst v rámci vyhodnocení ztenčení (Obrázek 89) ukazuje, že v případě číslo 1 ztenčení v místě spoje dosahuje hodnoty 26,2 %. Detail číslo 2 pak jasně znázorňuje, že nárůst průřezu ve vybraném místě činí až 18,4 %.



Obrázek 89 - Sestava 5. dveří - Vyhodnocení ztenčení

Numerická simulace lemování rovněž umožňuje změřit odpružení celé sestavy 5. dveří (Obrázek 90), které vzniká v důsledku spojovacího procesu všech pohledových a strukturálních komponent.



Obrázek 90 - Sestava 5. dveří - Vyhodnocení odpružení

Z hlediska odpružení (springback) je dle Obrázku 90 viditelné, že sestava značně odpružuje ve vyznačených místech na plechovém dílu 5E7.827.107. Míra odpružení zde přibližně dosahuje hodnoty okolo 2,5 mm. Oproti tomu krajní oblast střechy v místě spojení dílu 5E7.827.105 a 5E7.827.159 dosahuje lokálního maxima okolo 1,4 mm.

Výsledky získané ze simulace lemování hlavně umožňují zobrazení finální sestavy 5. dveří a identifikaci případné problematické geometrie jednotlivých dílů. Umožňují tak předběžně eliminovat geometrické prvky, které by mohly způsobovat vznik případných vad.

Tato simulace lemování je však spíše ukázkového charakteru a slouží zejména pro vizualizaci procesu spojování sestavy 5. dveří. Bližší popis a rozbor problematiky numerických simulací lemování, v rámci virtuálního procesu lisování a lemování tenkých plechů, tak představuje předmět další výzkumné činnosti.

5 Závěr

Technologie lisování a lemování tenkých plechových komponent pro účely automobilového průmyslu představuje velice komplexní problematiku, jejíž pochopení vyžaduje rozsáhlé znalosti v oblasti teorie tváření a zejména znalost fundamentálních tvářecích a deformačních procesů. Z tohoto důvodu tedy v rámci teoretické části (kapitola druhá) stručně přibližuji základní teorii a metodiku příslušných tvářecích procesů. V rámci této kapitoly rovněž provádím popsání teorie plasticity a principu měření tvářitelnosti materiálu. Znalost uvedených principů deformace, plasticity či tvářitelnosti je pro porozumění zadané problematice prakticky nezbytná, neboť tyto principy představují dílčí kritéria, dle kterých software simulaci daného dílu vyhodnocuje.

V kapitole třetí nejprve stručně nastiňuji koncepční postup výroby výlisku v prostředí automobilového průmyslu, poté zde popisuji cyklus plechu od polotovaru po finální výlisek. Následuje krátký popis konstrukce lisovacího náradí a na závěr kapitoly uvádím shrnutí běžně používaných materiálů, kterými jsou takzvané hlubokotažné oceli. Pro tyto materiály blíže specifikuji chemické složení a základní mechanické vlastnosti, které jsou z hlediska lisovatelnosti žádoucí.

Cílem této práce je vyzkoušet simulaci lemování sestavy 5. dveří se všemi strukturními komponentami, neboť se jedná o neprozkoumanou oblast aplikace numerických simulací lemování. Pro realizaci této simulace je tedy nezbytně nutné zabývat se vstupními plechovými díly, jenž náleží sestavě 5. dveří ŠKODA OCTAVIA IV. generace. Tato sestava se skládá z velkého množství strukturních a pohledových dílů, které jsou v rámci čtvrté kapitoly nejprve rozčleněny na domácí a externě poptávané díly. Pro takzvané domácí, tedy díly, jenž jsou vyráběny ve ŠKODA AUTO a.s., jsem následně provedl simulaci výrobního procesu, a to ve dvou variantách, které se liší z hlediska definice koeficientu tření. V rámci experimentu tedy rovněž zkoumám vliv nastavení koeficientu tření na průběh jednotlivých tvářecích operací se zaměřením na hluboké tažení, kde má hodnota tření nejvyšší vliv. Pro zvolené díly jsem v průběhu každé operace provedl analýzu kvality, která u nich primárně cílí na tvářitelnost, ztenčení a případnou náchylnost na vznik povrchového zvlnění. Vyrobené finální díly, které vyhovují standardům kvality, jsem v rámci kapitoly rovněž zhodnotil z hlediska míry odpružení (springback) a následně srovnal s reálným výliskem dle měrových a auditových protokolů. Na závěr této kapitoly jsem dle získaných výstupů provedl simulaci lemování.

Při vyhodnocení experimentu jsem dospěl k závěru, že v případě nastavení tlakově závislého koeficientu tření $\mu = 0,12$ (Varianta 2) dochází k příznivějšímu vypínání materiálu, tudíž výlisky vykazují menší míru ztenčování a nižší náchylnost ke tvorbě trhlin než v případě koeficientu $\mu = 0,15$ (Varianta 1), což se více přibližuje realitě. Z tohoto důvodu jsem tedy pro srovnání s reálnými výlisky vybral výstupní díly simulace dle varianty číslo 2. Toto srovnání ukazuje obdobné chování z hlediska odpružení v případě dílů 5E7.827.105 a 5E7.827.107. Naopak v případě dílu 5E7.827.159 je odpružení diametrálně odlišné, což je s největší pravděpodobností způsobeno chybou ve způsobu ustavení výlisku v simulaci při měření odpružení. Srovnání s auditovými protokoly ukazuje, že v případě dílů 5E7.827.107 a 5E7.827.105 simulace správně předpovídá vznik propadů geometrie. V případě dílu 5E7.827.159 naopak simulace správně předpovídá vznik zvlnění povrchu v průběhu operace hlubokého tažení (OP20). Vyhodnocení lemování ukazuje, že i přes nepřesné odpružení dílu 5E7.827.159 lze provést spojení simulovaných plechových dílů a strukturních komponent. Simulace lemování pak zobrazuje případná místa vzniku potenciálních závad a umožňuje měření odpružení celé soustavy. Za zmínku však stojí, že strukturní komponenty jsou do simulace nahrány v rigidním (tuhém) stavu, neboť pro účely experimentu nebyly dostupné výstupy jejich výrobních simulací. Podrobnější popis problematiky integrace numerických simulací do virtuálního procesu lisování a lemování však vyžaduje dlouhodobou a intenzivní výzkumnou činnost, která však v mém případě byla narušena karanténou spojenou s šířením nemoci COVID-19.

Citovaná literatura

- [1] **Groover, Mikell P.** *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (3rd Edition)*. Chichester : John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN 0-471-74485-9.
- [2] **LENDL, Petr.** KSP TUL. *Technologie II - tváření kovů*. [Online] Technická univerzita Liberec. [Citace: 5. Únor 2020.] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm.
- [3] **Davis, R. Joseph a Semiatin, S.L.** *ASM Metals Handbook - Vol. 14 Forming and Forging*. Metals Park, Ohio : ASM International, 1989. ISBN 0-87170-007-7.
- [4] **Semiatin, S.L.** *ASM Handbook - Volume 14B - Metalworking, Sheet Metal Forming*. Metals Park, Ohio : ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [5] **Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum.** *Akademie tváření: Stříhání*. [Online] 17. 5 2010. [Citace: 25. 3 2020.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>.
- [6] **Nejčtenější strojírenský časopis -MM spektrum.** *Akademie tváření: Ohýbání*. [Online] 7. 8 2010. [Citace: 25. 3 2020.] [https://www.mmspektrum.com/content/100716_Akademie_tvaření_ohýbání\(1\).pdf](https://www.mmspektrum.com/content/100716_Akademie_tvaření_ohýbání(1).pdf).
- [7] **The International Academy for Production Engineering.** *CIRP encyclopedia of production engineering*. New York : Springer Berlin Heidelberg, 2019. 978-3662531198.
- [8] **Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum.** *Akademie tváření: Hluboké tažení*. [Online] 22. 11 2011. [Citace: 26. 3 2020.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni.html>.
- [9] **Ramezani, Maziar a Ripin Mohd, Zaidi.** *Rubber-pad forming processes*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Limited, 2012. 978-0-85709-549-7.
- [10] **William Hosford, Robert Caddell.** *Metal Forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-511-35453-3.
- [11] **Wang, Zhongren.** *Engineering plasticity: theory and applications in metal forming*. Hoboken, NJ, USA : JohnWiley & Sons, Inc., 2018. ISBN 1119237300.
- [12] **Taylan ALTAN, Gracious NGAILE, Gangshu SHEN.** *Cold and hot forging: fundamentals and applications*. Materials Park : ASM International, 2004. ISBN 0-87170-805-1.
- [13] **Zhang, Ling, Lin, Jianping a Kang, Liugen.** Formability Evaluation of Sheet Metals Based on Global Strain Distribution. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016, Sv. 25, stránky 2296–2306.
- [14] **Kalpakjian, Serope a Steven, Schmidt.** *Manufacturing engineering and technology*. New York : Prentice Hall, 2010. 0136081681.
- [15] **Taylan ALTAN, Erman TEKKAYA.** *Sheet Metal Forming Fundamentals*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2012. 978-1-61 503-842-8.
- [16] **Bunge, H.J., Banabic, D. a Pöhlandt, Klaus.** *Formability of metallic materials*. Berlin : Springer, 2011. 978-3-642-08750-9.
- [17] **ČSN EN ISO 12004-2.** *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení křivek mezní tvářitelnosti - Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři*. 2009.

- [18] **Zwick Roell**. *Earing Test on Metallic Materials (ISO 11531), Aluminum and Aluminum Alloys (DIN EN 1669)*. [Online] [Citace: 26. 6 2020.] <https://www.zwickroell.com/en/materials-testing/sheet-metal-testing/earring-test/earring-test-iso-11531-en-1669>.
- [19] **ZwickRoell**. *Forming Limit Curve (FLC) to ISO 12004*. [Online] [Citace: 26. 6 2020.] <https://www.zwickroell.com/en/materials-testing/sheet-metal-testing/cupping-test/forming-limit-curves-flc-iso-12004>.
- [20] **PEARCE, Roger**. *Sheet Metal Forming*. Bristol : Springer Science and Business Media, 1991. 9780750301015.
- [21] **J., DAVIS**. *Tensile testing*. Materials Park, OH : ASM International, 2004.
- [22] **ISO 6892-1**. *Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature*. Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization, 2016.
- [23] **PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK**. *Tvařitelnost kovových materiálů 3. upravená verze 1/2007*. Ostrava : Ostrava VŠB - Technická univerzita , 2007.
- [24] **ČSN ISO 10113**. *Kovové materiály - Plechy a Pásky - Stanovení součinitele plastické anizotropie*. 2009.
- [25] **MARCINIAK, Z., J.L DUNCAN a S.J HU**. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 9780750653008.
- [26] **VALBERG, Henry S**. *Applied metal forming: using FEM analysis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 978-0521518239.
- [27] **FURRER, D. U**. *Fundamentals of modeling for metals processing*. Metals Park : ASM International, 2009. 978-1-61503-001-9.
- [28] **Thyssenkrupp**. Thyssenkrupp Steel. *Mild Steel (Deep-drawing steel and steel for enameling processes)*. [Online] 7 2018. [Citace: 23. 6 2020.] https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/produktinformationen/dd_dx_dc/thyssenkrupp_dd-dc-dx_product_information_steel_en.pdf.
- [29] **RANA, Radhakanta**. *Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications*. Duxhead, United Kingdom : Woodhead Publishing, 2017. 978-0-08-100638-2.
- [30] **ArcelorMittal Automotive**. *Drawing steels*. [Online] [Citace: 8. 6 2020.] https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/drawing_steels/drawing.
- [31] **ČSN EN 10152**. *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena - Technické dodací podmínky*. 2017.
- [32] **ČSN EN ISO 10346**. *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena - Technické dodací podmínky*. 2016.
- [33] **ArcelorMittal Automotive**. *Dual phase steels*. [Online] [Citace: 10. 6 2020.] https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first_gen_AHSS/DP.
- [34] **SteelNumber: European Steel and Alloy Grades/Numbers Database**. *HCT 500X*. [Online] [Citace: 10. 6 2020.] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=584.

Seznam Obrázků

Obrázek 1 - Změna mechanických vlastností v důsledku deformačního zpevnění [2]	12
Obrázek 2 - Pásmo tvářecích teplot pro nízkouhlíkové oceli [2].....	13
Obrázek 3 - Podélné válcování [1].....	14
Obrázek 4 - Schéma střížné operace s rovnoběžnými noži [4]	15
Obrázek 5 - Princip stříhání otvoru [4]	16
Obrázek 6 - Povrchové defekty v důsledku nesprávně zvolené střížné vůle [4]	16
Obrázek 7 - Schématické znázornění ohýbání [4]	17
Obrázek 8 - Princip realizace odpružení (springback)	17
Obrázek 9 - Schéma operace hlubokého tažení kalíšku [4],	18
Obrázek 10 - Složky napětí působící na základní infinitezimální element [10]	20
Obrázek 11 - Stavy napjatosti [11]	21
Obrázek 12 - Těleso deformované v průběhu objemového kování [12]	22
Obrázek 13 - Vyobrazení mezní plochy kluzu dle Trescy a von Misesa [12]	23
Obrázek 14 - Diagram mezních přetvoření (Forming limit diagram - FLD) [14]	24
Obrázek 15 - Schématické znázornění zkoušky dle Nakajimy, [17]	25
Obrázek 16 - Zkušební vzorky pro určení křivky mezních přetvoření [19].....	25
Obrázek 17 - Schématické znázornění zkoušky dle Marciniaka, [17]	26
Obrázek 18 - a) Schématické znázornění zkoušky Fukui, b) Porušený zkušební vzorek [10].....	26
Obrázek 19 - Schématické znázornění hydraulické zkoušky vyboulením [10].....	27
Obrázek 20 - Náchylnost ke tvorbě cípů - Earing test [18].....	27
Obrázek 21 - Tvar plochého zkušební vzorku dle standardu ISO 6892-1 [22]	28
Obrázek 22 - Příklad smluvního diagram [1]	29
Obrázek 23 - Smluvní diagram oceli s výraznou mezí kluzu [22]	30
Obrázek 24 - Schématické znázornění jednoduchého lisovacího procesu [25]	32
Obrázek 25 - Příklad konstrukce lisovacího nářadí pro operaci hlubokého tažení	33
Obrázek 26 - Sestava 5. dveří SK382 - domácí díly.....	36
Obrázek 27 - Sestava 5. dveří SK382 – díly 5E7.827.105, 5E7.827.107 + strukturální komponenty	36
Obrázek 28 - Sestava 5. dveří SK382 - díl 5E7.827.159 + strukturální komponenty.....	37
Obrázek 29 - Diagram mezních přetvoření (FLD) v prostředí Autoform	38
Obrázek 30 - Simulace skutečného měření odpružení (springbacku).....	39
Obrázek 31 - Horní díl vnější 5E7.827.105	41
Obrázek 32 - Díl 5E7.827.105 - Sled výrobních operací	42
Obrázek 33 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP40.....	43
Obrázek 34 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP50.....	43
Obrázek 35 - Díl 5E7.827.105 - Využití vyplňovacího klínu v O60	44
Obrázek 36 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP60.....	44
Obrázek 37 - Díl 5E7.827.105 - Metodický postup - OP70.....	44
Obrázek 38 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Tvářitelnost.....	45
Obrázek 39 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení	46
Obrázek 40 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Tvářitelnost - Varianta 2	47
Obrázek 41 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 2	48
Obrázek 42 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP30 - Tvářitelnost, Ztenčení - Varianta 2	49
Obrázek 43 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP40 - Tvářitelnost - Varianta 2	49
Obrázek 44 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP40 - Ztenčení - Varianta 2	50
Obrázek 45 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP50 - Tvářitelnost, Ztenčení, Zvlnění - Varianta 2.....	51
Obrázek 46 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP60 - Tvářitelnost, Ztenčení, Zvlnění - Varianta 2.....	52

Obrázek 47 - Díl 5E7.827.105 - Vyhodnocení OP70 - Ztenčení, Zvlnění - Varianta 2	53
Obrázek 48 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vtahy v OP20	53
Obrázek 49 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Odpružení	54
Obrázek 50 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Auditové závady	55
Obrázek 51 - Díl 5E7.827.105 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vznikající propady	55
Obrázek 52 - Spodní díl vnější 5E7.827.107	56
Obrázek 53 - Díl 5E7.827.107 - Sled výrobních operací	57
Obrázek 54 - Díl 5E7.827.107 - Metodický postup - OP50	58
Obrázek 55 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 1, 2.....	59
Obrázek 56 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 1 a 2.....	60
Obrázek 57 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP30 – Ztenčení - Varianta 1 a 2	61
Obrázek 58 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP50 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2	62
Obrázek 59 - Díl 5E7.827.107 - Vyhodnocení OP50 - Zvlnění - Varianta 1 a 2	62
Obrázek 60 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vtahy v OP20	63
Obrázek 61 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Odpružení	63
Obrázek 62 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Auditové závady	64
Obrázek 63 - Díl 5E7.827.107 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vznikající propady	64
Obrázek 64 - Díl vnitřní 5E7.827.159.....	65
Obrázek 65 - Díl 5E7.827.159 - Sled výrobních operací	66
Obrázek 66 - Díl 5E7.827.159 - Zobrazení zářezů pro středící kolíky na přístřihu plechu.....	66
Obrázek 67 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP30.....	67
Obrázek 68 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP40.....	67
Obrázek 69 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP50.....	68
Obrázek 70 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP60.....	68
Obrázek 71 - Díl 5E7.827.159 - Metodický postup - OP70.....	69
Obrázek 72 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP20 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2	69
Obrázek 73 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP20 - Ztenčení - Varianta 1 a 2.....	70
Obrázek 74 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP20 - Zvlnění - Varianta 1 a 2	70
Obrázek 75 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP30 - Ztenčení - Varianta 1 a 2.....	71
Obrázek 76 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP40 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2	71
Obrázek 77 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP40 - Ztenčení - Varianta 1 a 2.....	72
Obrázek 78 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP60 - Tvářitelnost - Varianta 1 a 2	72
Obrázek 79 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP60 - Ztenčení - Varianta 1 a 2.....	73
Obrázek 80 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP70 - Ztenčení - Varianta 1 a 2.....	73
Obrázek 81 - Díl 5E7.827.159 - Vyhodnocení OP70 - Zvlnění povrchu - Varianta 1 a 2.....	74
Obrázek 82 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vtahy v OP20	74
Obrázek 83 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vznik zvlnění povrchu na scanu výlisku v OP20	75
Obrázek 84 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Odpružení.....	75
Obrázek 85 - Díl 5E7.827.159 - Srovnání výsledků simulace a reálného výlisku - Vybrané auditové závady.....	76
Obrázek 86 - Sestava 5. dveří - Metodický postup lemování.....	77
Obrázek 87 - Výsledná sestava 5. dveří.....	78
Obrázek 88 - Sestava 5. dveří - Vyhodnocení tvářitelnosti	78
Obrázek 89 - Sestava 5. dveří - Vyhodnocení ztenčení	79
Obrázek 90 - Sestava 5. dveří - Vyhodnocení odpružení	79

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení hlubokotažných DC, DX ocelí [28], [30], [31], [32]	34
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti DC a DX ocelí [28], [30], [31], [32]	35
Tabulka 3 - Díl 5E7.827.105 – Základní parametry, chemické složení, mechanické vlastnosti, [31]	41
Tabulka 4 - Díl 5E7.827.107 – Základní parametry, chemické složení, mechanické vlastnosti, [32]	56
Tabulka 5 - Díl 5E7.827.159 – Základní parametry, chemické složení, mechanické vlastnosti, [32]	65