

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

# **Optimalizace napět'ových a kinematických poměrů při tažení výtažku nepravidelného tvaru z tenkého plechu s využitím MKP**

Optimization of Stress and Kinematic Conditions at Drawing of Intricate  
Shape Stamping from Thin Sheet-metal with the Use of FEM

Student:

Bc. Barbora Frodlová

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Radek Čada, CSc.

Ostrava 2009

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Barbora Frodlová**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Optimalizace napěťových a kinematických poměrů při tažení výtažku nepravidelného tvaru z tenkého plechu s využitím MKP

Optimization of Stress and Kinematic Conditions at Drawing of Intricate Shape Stamping from Thin Sheet-metal with the Use of FEM

Zásady pro vypracování:

1. Popište stávající technologii výroby zadaného výtažku a experimentálně vyhodnoťte tvářitelnost používaného plechu.
2. Pro zadaný výtažek sestrojte tvar přístříhu více metodami, vzájemně je porovnejte.
3. Navrhněte alternativy materiálu vhodného pro zadaný výtažek a popište vlastnosti těchto materiálů.
4. Pro všechny alternativy tvaru přístříhu proveďte simulaci tažení výtažku s využitím metody konečných prvků a s použitím software vyhodnoťte napěťové a kinematické poměry ve výtažku, ztenčení plechu, výskyt zvlnění, případně porušení dílu apod.
5. Pomocí metody charakteristik a metody deformačních sítí stanovte napěťové a kinematické poměry ve výtažku, taženého z jednotlivých variant přístříhů a vzájemně je porovnejte.
6. Vyhodnoťte tvar přístříhu, který je z hlediska napěťových a kinematických poměrů při tažení optimální a navrhněte pro něj nástřihový plán.
7. Proveďte ekonomické zhodnocení výroby zadaného výtažku a zformulujte doporučení vedoucí k racionalizaci stávající technologie výroby výtažku.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha : Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 5966 *Dokumentace. Formální úprava vědeckých a technických zpráv*. Praha : Český normalizační institut, leden 1996. 31 s.

ČSN ISO 7144 *Dokumentace. Formální úprava disertací a podobných dokumentů*. Praha : Český normalizační institut, březen 1997. 21 s.

ČSN ISO 31-0 *Veličiny a jednotky. Část 0: Všeobecné zásady*. Praha : Český normalizační

institut, prosinec 1994. 24 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

PETRUŽELKA, J. *Ročníkový projekt. Jak psát bakalářskou práci* [online]. Ostrava : VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 21. 10. 2006 [cit. 2007-04-10]. Dostupný z [www](http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Jak%20psat.pdf): <URL: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Jak%20psat.pdf>>.

ČADA, R. *Tvářitelnost ocelových plechů : odborná knižní monografie*. Lektorovali: L. Pollák a P. Rumíšek. 1. vyd. Ostrava : REPRONIS, 2001. 346 s. ISBN 80-86122-77-8.

EVIN, E., HRIVŇÁK, A. a KMEC, J. Získavanie materiálových údajov pre numerickú simuláciu. In *Zborník prednášok 7. medzinárodnej konferencie TECHNOLOGIA 2001 : I. diel*. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2001. s. 281-284. ISBN 80-227-1567-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Radek Čada, CSc.**

Datum zadání: 29. září 2008

Datum odevzdání: 22. května 2009



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....

Barbora Frodlová  
Hrdinů 750  
783 91 UNIČOV

.....

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

FRODLOVÁ, B. *Optimalizace napěťových a kinematických poměrů při tažení výtažku nepravidelného tvaru z tenkého plechu s využitím MKP*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie – 345, 2009, 195 s. Diplomová práce, vedoucí Čada, R.

Diplomová práce se zabývá optimalizací napěťových a kinematických poměrů při tažení výtažku levého krytu ventilátoru s využitím MKP. V úvodní části je popsána stávající technologie výroby a experimentální vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu. K sestrojení optimálního tvaru a velikosti přístřihu pro zadaný výtažek bylo využito čtyř metod. Dále byly navrženy a experimentálně vyhodnoceny alternativy materiálu pro zadaný výtažek. Byl proveden rozbor průběhu simulace procesu tažení výtažku s využitím software DYNAFORM 5.2 se všemi přístřihy a pro všechny oceli. Byly provedeny zkoušky simulace tažení výtažku s brzdícím žebrem a změna kritického místa na optimálním přístřihu. Byly navrženy nástřihové plány pro optimální přístřih. Na základě všech výsledků byla zformulována doporučení vedoucí k racionalizaci stávající technologie výroby výtažku.

## ANNOTATION OF THESIS

FRODLOVÁ, B. *Optimization of Stress and Kinematic Conditions at Drawing of Intricate Shape Stamping from Thin Sheet-metal with the Use of FEM*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology – 345, 2009, 195 p. Thesis, head Čada, R.

Thesis concerns the optimization of stress and kinematic conditions at drawing shape stamping of the left cover of the ventilator with the use of FEM. The introduction describes the existing production technology and experimental evaluation of the formability of the used sheet-metal. For the construction of the optimal shape and size of blank for drawing of the left cover of the ventilator four methods were used. Some alternatives of material for shape stamping were projected and experimentally evaluations were done. The analysis of the simulation of the drawing process of the shape stamping was realized by the software DYNAFORM 5.2 for all blanks and all steels. Some experiments for drawing shape stamping with draw bead and change of critical area on optimal blank were done. Some blank nesting for the optimal blank was designed. On the basis of all outcomes were introduced recommendations conducting to the rationalization of the existing production technology of the stamping.

# OBSAH

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>11</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>19</b>
<b>1 Rozbor stávající technologie výroby výtažku levého krytu ventilátoru .....</b>	<b>21</b>
<b>2 Experimentální vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu z oceli DC04 .....</b>	<b>24</b>
2.1 Základní zkoušky tvářitelnosti plechů .....	24
2.1.1 Stanovení chemického složení .....	24
2.1.2 Stanovení jakosti a stavu povrchu plechu .....	25
2.1.3 Stanovení mechanických vlastností tahovou zkouškou .....	26
2.2 Napodobující zkoušky .....	28
2.2.1 Zkouška hloubením dle Erichsena .....	28
2.3 Nekonenční kritéria hodnocení tvářitelnosti plechů .....	30
2.3.1 Plošná anizotropie mechanických vlastností plechů .....	30
2.3.2 Plastická anizotropie .....	33
2.3.3 Exponent deformačního zpevnění .....	35
2.3.4 Index tvářitelnosti .....	38
<b>3 Tvar a velikost přístřihu .....</b>	<b>39</b>
3.1 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu dle ČSN 22 7303 .....	39
3.1.1 Výpočet tvaru a velikosti přístřihu dle ČSN 22 7303 .....	40
3.2 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu metodou řezů .....	46
3.2.1 Výpočet a konstrukce přístřihu metodou řezů .....	47
3.3 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu metodou využívající trajektorií maximálních smykových napětí (TMSN) .....	49
3.3.1 Metoda rýsování TMSN .....	49
3.3.2 Konstrukce tvaru a velikosti přístřihu metodou TMSN .....	50
3.4 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu s využitím BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 .....	51
3.4.1 Konstrukce přístřihu s využitím BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 .....	51
3.5 Porovnání přístřihů výtažku levého krytu ventilátoru .....	53

<b>4</b>	<b>Alternativy materiálu vhodného pro levý kryt ventilátoru</b>	55
4.1	Pásová ocel St 4 dle DIN 1624	55
4.1.1	Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli předepsané normou DIN 1624	56
4.1.2	Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli uvedené v atestu	57
4.2	Pásová ocel IF-Stahl	57
4.2.1	Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli uvedené v atestu	58
4.3	Experimentální vyhodnocení tvářitelnosti pásových ocelí St 4 a IF-Stahl	59
4.3.1	Mechanické vlastnosti ocelí	59
4.3.2	Plošná anizotropie mechanických vlastností	61
4.3.3	Plastická anizotropie	62
4.3.4	Exponent deformačního zpevnění	63
4.3.5	Index tvářitelnosti a Liletův diagram	64
<b>5</b>	<b>Porovnání a zhodnocení experimentálně stanovených vlastností pásových ocelí DC04, St 4 a IF-Stahl</b>	65
5.1	Chemické složení	65
5.2	Mechanické vlastnosti	66
5.2.1	Mez kluzu v tahu	66
5.2.2	Mez pevnosti v tahu	67
5.2.3	Poměr meze kluzu v tahu k mezi pevnosti v tahu	68
5.2.4	Tažnost	68
5.3	Plošná anizotropie mechanických vlastností	69
5.4	Plastická anizotropie	69
5.5	Exponent deformačního zpevnění	70
5.6	Index tvářitelnosti	71
5.7	Ocel vhodná pro levý kryt ventilátoru	71
<b>6</b>	<b>Výpočet a simulace procesu tažení výtazku levého krytu ventilátoru s využitím software</b>	73
6.1	Tvorba nástrojů v programu DYNAFORM 5.2	74
6.2	Úprava přístřihů v programu DYNAFORM 5.2	76
6.3	Definování okrajových podmínek v programu DYNAFORM 5.2	77
6.3.1	Definování přístřihu a jeho materiálu	78
6.3.2	Definování nástrojů a jejich ustavení do výchozí pozice	80



6.4 Výpočet v Submit Dyna Jobs .....	83
6.5 Zpracování výsledků simulace procesu tažení v ETA/Post-Processor 1.0 .....	83
6.6 Simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z oceli DC04 .....	83
6.6.1 Simulace tažení levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu .....	84
6.6.2 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303 .....	85
6.6.3 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného metodou řezů .....	87
6.6.3.1 Korekce polohy přístřihu stanoveného metodou řezů .....	87
6.6.3.2 Výsledky simulace tažení levého krytu ventilátoru po korekci polohy přístřihu sestrojeného metodou řezů .....	88
6.6.4 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN .....	89
6.6.5 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 .....	91
6.7 Vyhodnocení výsledků simulace tažení výtazku levého krytu ventilátoru z oceli DC04.....	92
6.8 Simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z oceli St 4 .....	95
6.8.1 Simulace tažení levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu .....	95
6.8.2 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303 .....	97
6.8.3 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy .....	98
6.8.4 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN .....	100
6.8.5 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 .....	101
6.9 Vyhodnocení výsledků simulace tažení výtazku levého krytu ventilátoru z oceli St 4 .....	103
6.10 Simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z oceli IF-Stahl .....	105
6.10.1 Simulace tažení levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu .....	105
6.10.2 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303 .....	106

6.10.3	Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy .....	108
6.10.4	Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN .....	109
6.10.5	Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 .....	111
6.11	Vyhodnocení výsledků simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru z oceli IF-Stahl .....	112
<b>7</b>	<b>Stanovení napěťových a kinematických poměrů ve výtažku pomocí metody charakteristik a metody deformačních sítí .....</b>	<b>115</b>
7.1	Metoda charakteristik .....	115
7.1.1	Vlastnosti charakteristik a matematické odvození napěťových poměrů při tažení .....	116
7.1.2	Vyšetření a vyhodnocení napěťových poměrů při tažení výtažku .....	118
7.1.3	Matematické odvození diferenciálních rovnic charakteristik v rovině hodografu rychlostí .....	121
7.1.4	Vyšetření a vyhodnocení kinematických poměrů při tažení výtažku .....	123
7.1.5	Kinematické poměry okraje příruby při tažení výtažku z jednotlivých přístříhů s použitím software DYNAFORM 5.2 .....	125
7.2	Metoda deformačních sítí .....	129
7.2.1	Experimentální stanovení napětí a deformací .....	131
7.2.2	Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném ze stávajícího přístříhu .....	132
7.2.3	Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném z přístříhu stanoveného metodou dle ČSN 22 7303 .....	133
7.2.4	Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném z přístříhu stanoveného metodou řezů .....	134
7.2.5	Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném z přístříhu stanoveného metodou využívající TMSN .....	135
7.2.6	Porovnání přístříhů z hlediska rozložení napětí a deformací .....	136
7.3	Metoda deformačních sítí provedená v softwaru DYNAFORM 5.2 .....	137
7.3.1	Porovnání metody deformačních sítí provedené experimentem a pomocí softwaru DYNAFORM 5.2 .....	142

<b>8</b>	<b>Brzdící žebra při tažení výtažků nepravidelného tvaru</b>	146
8.1	Posouzení vhodnosti užití brzdícího žebra při tažení levého krytu ventilátoru	146
8.2	Tvary, rozměry a umístění brzdících žebor	148
8.3	Simulace procesu tažení výtažku z přístřihu stanoveného metodou využívající TMSN za pomoci brzdícího žebra	151
8.4	Výsledky simulace tažení levého krytu ventilátoru s brzdícím žebrem	154
8.4.1	Vliv změny geometrie žebra na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru	155
8.4.2	Vliv změny délky žebra na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru	157
8.4.3	Vliv změny vzdálenosti žebra od vnitřního okraje přidržovače na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru	159
8.5	Zhodnocení výsledků simulace tažení výtažku s brzdícím žebrem	160
<b>9</b>	<b>Vliv změny tvaru přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru</b>	161
9.1	Změna tvaru přístřihu sestrojeného s využitím TMSN v místě vybrání zkonstruováním nového většího vybrání	161
9.2	Změna tvaru přístřihu sestrojeného s využitím TMSN v místě vybrání zkonstruováním tečny k poloměrům v místě vybrání	164
9.3	Zhodnocení provedených experimentů s upraveným tvarem přístřihu sestrojeného s využitím TMSN	166
<b>10</b>	<b>Nástřihový plán pro přístřih sestrojený metodou využívající TMSN</b>	167
10.1	Nástřihový plán pro možnost výroby vystřihem tvaru pomocí stříhadla	168
10.2	Nástřihový plán pro možnost výroby výstřžku hydroabrazivním paprskem	173
10.3	Zhodnocení možností výroby přístřihu	177
<b>11</b>	<b>Ekonomické zhodnocení a racionalizace stávající technologie výroby výtažku levého krytu ventilátoru</b>	179
<b>12</b>	<b>Závěr</b>	183
<b>13</b>	<b>Použitá literatura</b>	191
<b>14</b>	<b>Seznam příloh</b>	193

## Seznam použitých značek a symbolů

$A$	tažnost	[%]
$A$	největší rozměr výstřižku	[mm]
$A_{(x)}$	tažnost ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$A_{(0)}$	tažnost ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$A_{(90)}$	tažnost ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$A_{80}$	tažnost při počáteční měřené délce zkušební tyče 80 mm	[%]
$a$	jmenovitá tloušťka plechu	[mm]
$\bar{a}$	změřená střední tloušťka plechu	[mm]
$a_{rd}$	vzdálenost středů zaoblení $r_d$ odpovídající straně $a$ konečného tvaru výtažku	[mm]
$a_0$	počáteční tloušťka zkoušené části zkušební tyče	[mm]
$b$	šířka zkušebního vzorku	[mm]
$b_k$	konečná šířka zkoušené části zkušební tyče	[mm]
$b_0$	průměrná počáteční šířka zkoušené části zkušební tyče	[mm]
$b_1$	počáteční šířka užší části zkušební tyče	[mm]
$b_2$	počáteční šířka širší části zkušební tyče	[mm]
$c$	konstanta větší než nula	[-]
$C_x$	součinitel pevnosti ve směru $x$ vůči směru válcování plechu	[MPa]
$d_r$	průměr zaoblení bočních stěn výtažku	[mm]
$E$	můstek (mezera mezi výstřižky)	[mm]
$\bar{e}$	jednotkový vektor	[-]
$F$	okamžité zatížení zkušební tyče	[N]
$F$	boční odpad	[mm]
$F_p$	síla přidržovače	[N]
$\bar{g}$	jednotkový vektor	[-]
$h$	hloubka výtažku	[mm]
$h_d$	hloubka výtažku bez zaoblení u dna	[mm]
$h_s$	rozvinutá výška v podélných stěnách výtažku	[mm]
$h_{sa}$	zmenšení rozvinuté výšky delší strany	[mm]
$\Delta h$	průměrná výška cípů	[mm]
$IE$	hloubka prohloubení při zkoušce metodou podle Erichsena za podmínek (průměr tažníku 20 mm, průměr tažnice 27 mm)	[mm]
$\overline{IE}$	střední velikost prohloubení dle Erichsena	[mm]

$K$	označení elementu deformační sítě	[mm]
$k$	materiálová konstanta	[MPa]
$k_1$	přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení dna výtažku	[-]
$k_2$	přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení poloměru mezi dnem a svislou stěnou výtažku	[-]
$k_3$	přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení svislé stěny výtažku	[-]
$k_4$	přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení poloměru na tažné hraně výtažku	[-]
$k_5$	přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení příruby výtažku	[-]
$L$	délka zkušební tyče	[mm]
$L_i$	okamžitá měřená délka zkušební tyče po zatížení zkušební tyče $F_i$	[mm]
$L_k$	konečná délka zkoušené části zkušební tyče	[mm]
$L_0$	počáteční měřená délka zkušební tyče	[mm]
$L_0'$	průměr kružnicového elementu deformační sítě	[mm]
$L_1$	počáteční měřená délka užší části zkušební tyče	[mm]
$L_1'$	okamžitá měřená délka užší části zkušební tyče po okamžitém zatížení $F$	[mm]
$L_1''$	délka hlavní osy elipsy	[mm]
$L_2$	počáteční měřená délka širší části zkušební tyče	[mm]
$L_2'$	okamžitá měřená délka širší části zkušební tyče po okamžitém zatížení $F$	[mm]
$L_2''$	délka vedlejší osy elipsy	[mm]
$\Delta L$	okamžité trvalé prodloužení zkoušené části zkušební tyče po okamžitém zatížení	[mm]
$l$	vzdálenost mezi pólem a počátečním bodem logaritmické spirály	[mm]
$l_c$	celková délka povrchové křivky výtažku v příslušném řezu	[mm]
$l_d$	délka povrchové křivky dna výtažku	[mm]
$l_p$	délka povrchové křivky příruby výtažku	[mm]
$l_r$	délka povrchové křivky poloměru mezi dnem a svislou stěnou výtažku	[mm]
$l_s$	délka povrchové křivky svislé stěny výtažku	[mm]
$l_t$	délka povrchové křivky poloměru na tažné hraně výtažku	[mm]
$\max A_{80}$	maximální směrová hodnota tažnosti	[%]

$\max P$	maximální součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti	[%]
$\max PA$	maximální součinitel plošné anizotropie tažnosti	[%]
$\max PR_m$	maximální součinitel plošné anizotropie meze pevnosti	[%]
$\max PR_p$	maximální součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu	[%]
$\max P(R_p/R_m)$	maximální součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti	[%]
$\max R_m$	maximální směrová hodnota meze pevnosti	[MPa]
$\max R_{p\ 0,2}$	maximální směrová hodnota smluvní meze kluzu	[MPa]
$\max R_{p\ 0,2}/R_m$	maximální směrová hodnota poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti	[-]
$\min A_{80}$	minimální směrová hodnota tažnosti	[%]
$\min R_m$	minimální směrová hodnota meze pevnosti	[MPa]
$\min R_{p\ 0,2}$	minimální směrová hodnota smluvní meze kluzu	[MPa]
$\min R_{p\ 0,2}/R_m$	minimální směrová hodnota poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti	[-]
$n$	exponent deformačního zpevnění	[-]
$n$	počet kusů přístřihů sestrojených s využitím TMSN nastříhaných z jedné tabule plechu o rozměrech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm	[ks]
$n_m$	průměrný exponent deformačního zpevnění	[-]
$n_{Opt}$	počet kusů přístřihů sestrojených s využitím TMSN nastříhaných z jedné tabule plechu o rozměrech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm	[ks]
$n_{St}$	počet kusů stávajících přístřihů nastříhaných z jedné tabule plechu o rozměrech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm	[ks]
$n_x$	směrový exponent deformačního zpevnění	[-]
$n_{xi}$	směrový exponent deformačního zpevnění, stanovený z i-tého měření	[-]
$n_0$	exponent deformačního zpevnění ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu	[-]
$n_{45}$	exponent deformačního zpevnění ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu	[-]
$n_{90}$	exponent deformačního zpevnění ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[-]
$\Delta n$	stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění	[-]
$O_v$	využitelný odpad z tabule plechu	[mm <sup>2</sup> ]
$P$	součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti	[%]
$PA_{(x)}$	součinitel plošné anizotropie tažnosti ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]

$PA_{(45)}$	součinitel plošné anizotropie tažnosti ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PA_{(90)}$	součinitel plošné anizotropie tažnosti ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PR_{m(x)}$	součinitel plošné anizotropie meze pevnosti ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PR_{m(45)}$	součinitel plošné anizotropie meze pevnosti ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PR_{m(90)}$	součinitel plošné anizotropie meze pevnosti ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PR_{p(x)}$	součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PR_{p(45)}$	součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$PR_{p(90)}$	součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$P(R_p/R_m)$	součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti	[%]
$P(R_p/R_m)_{(45)}$	součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$P(R_p/R_m)_{(90)}$	součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[%]
$p$	počet ks tabulí plechu z oceli DC04 o rozměrech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm ČSN 42 6312.32 potřebných na roční výrobu výtažku	[ks]
$p_o$	spotřeba kusů tabulí plechu pro roční výrobu výtažků z optimálního přístřihu bez započtené zmetkovitosti výroby	[ks]
$p_s$	spotřeba kusů tabulí plechu pro roční výrobu výtažků ze stávajícího přístřihu bez započtené zmetkovitosti výroby	[ks]
$p_p$	měrný tlak přidržovače	[MPa]
$p_{Pr}$	předpokládaná roční spotřeba počtu ks tabulí plechu z oceli DC04 o rozměrech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm ČSN 42 6312.32 potřebná k výrobě 2500 ks výtažků z optimálního přístřihu	[ks]
$p_{St}$	stávající roční spotřeba počtu ks tabulí plechu z oceli DC04 o rozměrech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm ČSN 42 6312.32 potřebná k výrobě 2500 ks výtažků ze stávajícího přístřihu	[ks]
$Q$	počet kusů výtažků levého krytu ventilátoru vyrobených za rok	[ks]
$R_a$	střední aritmetický odchylka od střední čáry profilu	[ $\mu$ m]
$R_m$	pevnost v tahu	[MPa]
$R_{m(x)}$	pevnost v tahu ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu	[MPa]
$R_{m(0)}$	pevnost v tahu ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu	[MPa]

$R_{p\ 0,2}$	smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace 0,2 % $L_0$ pod zatížením	[MPa]
$R_{p\ (x)}$	smluvní mez kluzu ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu	[MPa]
$R_{p\ (0)}$	smluvní mez kluzu ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu	[MPa]
$R_0$	redukovaný poloměr přístřihu	[mm]
$r$	součinitel normálové anizotropie	[-]
$r_d$	poloměr zaoblení mezi dnem a boční stěnou výtažku	[mm]
$r_m$	průměrný součinitel normálové anizotropie	[-]
$r_x$	směrový součinitel normálové anizotropie	[-]
$r_{x\ min}$	minimální hodnota směrového součinitele normálové anizotropie z hodnot $r_0$ , $r_{45}$ a $r_{90}$	[-]
$r_0$	poloměr přístřihu v místě zaoblených bočních stěn	[mm]
$r_0$	součinitel normálové anizotropie ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu	[-]
$r_{45}$	součinitel normálové anizotropie ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu	[-]
$r_{90}$	součinitel normálové anizotropie ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu	[-]
$\Delta r$	stupeň plošné anizotropie součinitele normálové anizotropie	[-]
$S_i$	plocha přístřihů	[mm <sup>2</sup> ]
$S_p$	účinná plocha přidržovače	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{Pol}$	plocha polotovaru (plech $0,9 \times 1000 - 2000$ mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21)	[mm <sup>2</sup> ]
$S_v$	celková plocha rozmístěných výstřihů	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{v1}$	plocha přístřihu sestrojeného s využitím TMSN	[mm <sup>2</sup> ]
$s$	tloušťka plechu po tažení	[mm]
$s_k$	konečná tloušťka zkoušené části zkušební tyče	[mm]
$s_0$	počáteční tloušťka plechu	[mm]
$v_x$	rychlost deformace ve směru osy x	[m · s <sup>-1</sup> ]
$v_y$	rychlost deformace ve směru osy y	[m · s <sup>-1</sup> ]
$v_{\alpha'}$	průmět vektoru $\bar{v}$ do směru $\alpha'$	[-]
$v_{\beta'}$	průmět vektoru $\bar{v}$ do směru $\beta'$	[-]
$\bar{v}$	vektor rychlosti	[-]
$x$	úhel zvoleného směru v rovině plechu vůči směru válcování	[°]
$x$	koeficient zvětšení poloměru $r_0$	[-]
$y$	koeficient zmenšení výšky $h_{sa}$	[-]



$z_s$	stávající zmetkovitost při výrobě levého krytu ventilátoru	[%]
$z_p$	předpokládaná zmetkovitost při výrobě levého krytu ventilátoru při použití přístřihu sestrojeného s využitím TMSN	[%]
$\alpha$	úhel, pod kterým trajektorie maximálních smykových napětí protíná obrys přístřihu	[°]
$\varepsilon_1$	hlavní poměrná délková deformace	[%]
$\varepsilon_2$	vedlejší poměrná délková deformace	[%]
$\gamma$	úhel mezi spojnicí pólu s počátečním bodem logaritmické spirály a průvodičem bodu logaritmické spirály	[°]
$\lambda$	parametr	[-]
$\rho$	délka průvodiče bodu logaritmické spirály	[mm]
$\eta$	koeficient využití zásoby plasticity	[%]
$\eta$	koeficient využití materiálu	[%]
$\eta_0$	koeficient využití materiálu tabule plechu $0,9 \times 1000 - 2000$ mm pro nástřihový plán přístřihu sestrojeného s využitím TMSN	[%]
$\eta_s$	koeficient využití materiálu tabule plechu $0,9 \times 1000 - 2000$ mm pro nástřihový plán stávajícího přístřihu	[%]
$\sigma$	okamžité skutečné napětí po okamžitém zatížení $F$	[MPa]
$\sigma_i$	intenzita skutečných napětí	[MPa]
$\sigma_k$	napětí na mezi kluzu	[MPa]
$\sigma_r$	radiální napětí	[MPa]
$\sigma_s$	střední napětí	[MPa]
$\sigma_t$	tangenciální napětí	[MPa]
$\sigma_x$	normálové napětí ve směru osy x	[MPa]
$\sigma_y$	normálové napětí ve směru osy y	[MPa]
$\sigma_1$	hlavní napětí ve směru 1	[MPa]
$\sigma_2$	hlavní napětí ve směru 2	[MPa]
$\sigma_3$	hlavní napětí ve směru 3	[MPa]
$\tau$	smykové napětí	[MPa]
$\tau_{max}$	maximální smykové napětí	[MPa]
$\tau_{xy}$	smykové napětí v rovině xy	[MPa]
$\varphi$	úhel mezi směrem hlavního smykového napětí a osou x	[°]
$\varphi_b$	logaritmická deformace ve směru šířky	[-]
$\varphi_i$	intenzita logaritmické deformace	[-]
$\varphi_s$	logaritmická deformace ve směru tloušťky	[-]

$\varphi_1$	hlavní logaritmická deformace ve směru 1	[–]
$\varphi_2$	hlavní logaritmická deformace ve směru 2	[–]
$\varphi_3$	hlavní logaritmická deformace ve směru 3	[–]
$(\varphi_1)_{\text{krit}}$	kritická intenzita logaritmické deformace	[–]
$(\varphi_1)_{\text{krit}}$	kritická hlavní logaritmická deformace ve směru 1	[–]
$(\varphi_2)_{\text{krit}}$	kritická hlavní logaritmická deformace ve směru 2	[–]
$(\varphi_3)_{\text{krit}}$	kritická hlavní logaritmická deformace ve směru 3	[–]

## Úvod

Strojírenství patří mezi důležitá odvětví průmyslu našeho i celosvětového hospodářství. Rozvoj průmyslové výroby a požadavky zákazníků kladou velký důraz na jakost a kvalitu výrobků a nutí tak výrobce ke zdokonalování a vytváření nových technologií výroby. Je výhodné tyto technologie před zavedením do výroby řádně prověřit, a proto se ve všech odvětvích strojírenské výroby dnes ve velké míře využívá počítačů a simulačního softwaru.

Součásti vyrobené tvářením plechů jsou všestranně používány pro své vynikající vlastnosti zejména v automobilovém průmyslu. Ten hojně využívá pro své výrobky výlisky z tenkých plechů, které se vyznačují nízkou hmotností, tuhostí, dobrou kvalitou povrchu a také nízkými výrobními náklady, zvláště pak ve velkosériové výrobě. TATRA, a. s. je automobilový závod, který je dobrým zástupcem v odvětví automobilového průmyslu. Jedním z používaných výlisků do automobilů značky TATRA je levý kryt ventilátoru.

TATRA, a. s., Kopřivnice je společnost se sídlem v Kopřivnici a se svou více než stopadesátiletou historií patří mezi nejstarší automobilky světa. Založil ji Ignác Šustala (1822 ÷ 1891), který v roce 1850 zahájil výrobu bryček a později kočárů originálního konstrukčního řešení. K zásadním mezníkům v historii TATRY patří rok 1897, kdy byl vyroben první osobní automobil ve střední Evropě a letopočet 1898, kdy byl vyroben první nákladní automobil. Od těch dob se společnost vypracovala až k dnešním úspěchům, ke kterým je určitě možno připsat použití jediného vzduchem chlazeného motoru na světě EURO 5 v roce 2008. Celý holding TATRA, což je mateřská firma spolu se třemi dceřinými společnostmi, má nyní kolem 3800 zaměstnanců. V roce 2008 TATRA vyexpedovala 1666 nákladních vozidel. Původní plán pro rok 2008 představoval prodej kolem 2350 vozidel, avšak na nižším prodeji se ve druhé polovině roku 2008 podepsala nastupující světová finanční krize. Vozidla značky TATRA jsou charakteristické především svou ojedinělou koncepcí podvozku, vysokou výdrží u průchodu nejtěžšími terény i spolehlivostí, která je předurčuje pro nasazení v nejtvrděších terénních a klimatických podmínkách.

Diplomová se zabývá optimalizací napěťových a kinematických poměrů při tažení tvarového výtažku levého krytu ventilátoru nákladního vozu TATRA 815. Tento výtažek je součástí vzduchotechnického systému nákladního vozu. Dceřiná společnost

TATRY, a. s., Kopřivnice – Tawesco, s. r. o. se specializuje na výrobu plechových výlisků. Druhá dceřiná společnost TATRY, a. s., Kopřivnice – Taforge, a. s. má ve svém výrobním programu taktéž výrobu výlisků za studena i za tepla.

Diplomová práce řeší stanovení optimálního tvaru přístříhu levého krytu ventilátoru více metodami – metodou dle ČSN 22 7303, metodou řezů, metodou využívající trajektorií maximálních smykových napětí a metodou využívající k sestrojení přístříhu BSE modul v programu DYNAFORM 5.2. V práci jsou také navrženy další dvě alternativy materiálu vhodného pro tento výtazek a provedena simulace tažení plechu ze všech popsaných materiálů pomocí programu DYNAFORM 5.2 pro všechny alternativy přístříhu. Výsledky jsou následně porovnány a vyhodnoceny pomocí několika analýz. Pomocí metody charakteristik a metody deformačních sítí jsou stanoveny napěťové a kinematické poměry ve výtazku taženém z jednotlivých variant přístříhů, a ty jsou vzájemně porovnány. Diplomová práce dále nabízí rozbor tažení výtazku s brzdícím žebrem. Pro optimální tvar přístříhu jsou navrženy nástřihové plány se stanovenou hospodárností pro každý z nich. V závěru je stručný ekonomický rozbor a uvedeno doporučení vedoucí k racionalizaci stávající technologie výroby výtazku.

## 1 Rozbor stávající technologie výroby výtažku levého krytu ventilátoru

Zadaným výtažkem pro diplomovou práci je levý kryt ventilátoru pro nákladní vůz TATRA 815. Tažené součásti pro tento nákladní automobil jsou vyráběny v dceřiné společnosti TATRY, a. s., Kopřivnice – Tawesco, s. r. o. Tato společnost obsahuje kromě lisovny i další pracoviště jako je konstrukce lisovacích nástrojů, technologie, konstrukce svařovacích přípravků a další. Oddělení konstrukce lisovacích nástrojů a technologie se společně zabývají určováním tvaru a velikosti přístřihu. Dále řeší technologické postupy, konstrukci nástrojů pro tažení a otázku zavedení součástí do výroby.

K výrobě levého krytu ventilátoru (obr. 1.1) se používá ocel DC04 (11 305.21). Tento materiál je odebírán od několika dodavatelů. Volba dodavatele závisí na ekonomické situaci a výhodnosti dodávky. Nejčastěji je však materiál odebírán z VSŽ, a. s., Košice. Výběr materiálu i dodavatele řeší technolog. Využívá k tomu podnikovou databázi, kde se po zadání vstupních informací (materiál, rozměr přístřihu atd.) zobrazí výběr dodavatelů s dalšími potřebnými informacemi jako například rozměry tabulí, v jakých je materiál dodáván, výrobce materiálu, hmotnost, využití tabule a jiné parametry.



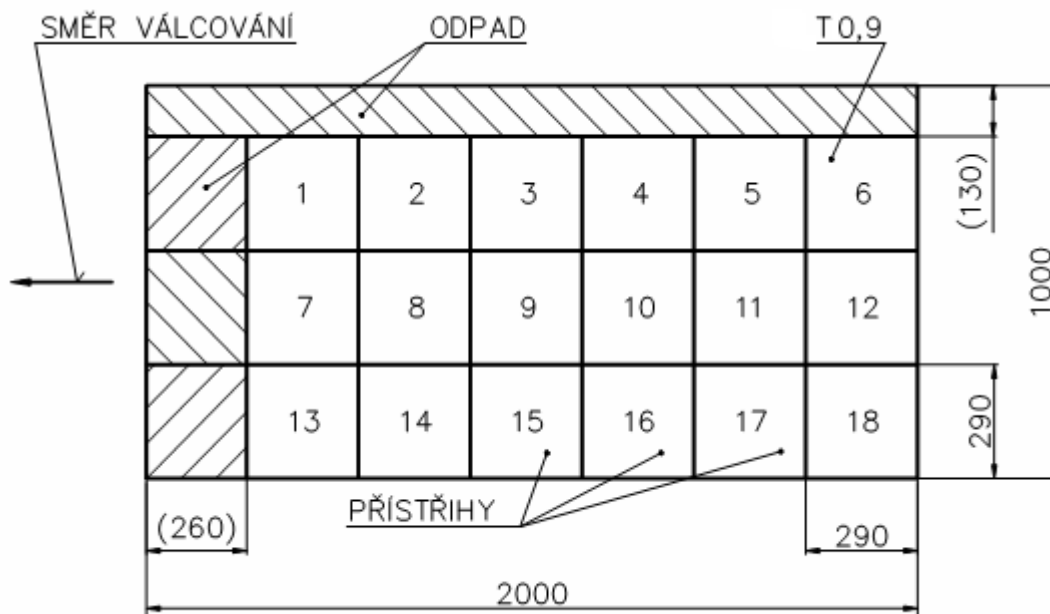
Obr. 1.1 Levý kryt ventilátoru

Výchozí materiál pro levý kryt ventilátoru, ocel 11 305.21, je vhodný k tvářecím procesům, neboť se jedná o materiál uklidněný, nestárnoucí a s velmi dobrými vlastnostmi pro hluboké tažení. Při jeho zpracování je nutné zohlednit anizotropii mechanických vlastností. Kompletní rozbor tvářitelnosti materiálu je uveden v kapitole 2. Plechy z oceli

11 305.21 se běžně dodávají rekrystalizačně žíhané s následujícím lehkým převálcováním za studena (označení .21 za číselnou značkou oceli).

Lisování výlisku se provádí na klikovém lisu PKZZ I 315 německé firmy ERFURT (příloha A1.1). Ročně se vyrobí cca 2000 ÷ 2500 kusů, přesný počet závisí na počtu objednaných automobilů.

Základním výchozím polotovarem je tenký plech dodávaný v tabulích o rozměrech (0,9 × 1000 – 2000) mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21. Postup výroby přístřihu je takový, že se tabule plechu dělí na menší tabulky, které pak slouží jako přístřih pro levý kryt ventilátoru. Protože se vyrábí v malém objemu a nejedná se tedy o neustálou velkosériovou výrobu, provádí se dělení tabulí plechu (obr. 1.2) ručně na ručních tabulových nůžkách NTE 2000/2,5-B nebo NTC 2000/4. Výsledný přístřih má rozměry (0,9 × 290 – 290) mm. Poté následují operace dle technologického postupu výroby (viz příloha A1.2).



Obr. 1.2 Schéma dělení tabule plechu pro stávající přístřih

Přístřihy jsou zpravidla ve tvaru čtverce uvedených rozměrů nebo obdélníka. Konečný rozměr tohoto přístřihu určí technolog po dohodě s lisovnou a konstrukcí. Přístřihy, které vyžadují složitější tvar, se v dceřiné společnosti Tawesco, s. r. o. označují MPN – přístřihová vzornice.

Pro všechny tvarové výlisky platí, že přiblížení se ideálnímu tvaru přístříhu zkvalitní a zefektivní výrobu tvarově složitých výrobků. Proto jsou dnes využívány softwary pracující na bázi metody konečných prvků, které prokážou vhodnost přístříhu ještě před uvedením do výroby a také je možno s jejich pomocí vygenerovat vhodný přístříh pro daný výrobek.

Důležitá je také orientace přístříhu na tabuli plechu. Je výhodné maximálně využít možnosti plechu jak z hlediska mechanických vlastností, tak z hlediska anizotropie. Tím lze předejít vzniku zmetků ve výrobě.

Při výrobě výtažku levého krytu ventilátoru dochází ke dvěma zásadním vadám – zvlnění plechu a výskyt praskliny v kritickém místě výtažku. Ke zvlnění plechu na povrchu krytu ventilátoru dochází u všech vylišovaných kusů. Tato vada neovlivňuje samotnou funkci ventilátoru, pouze z hlediska vzhledu snižuje kvalitu výtažku. U části produkce však dochází k výraznějšímu zvlnění plechu, které z tvarových a rozměrových důvodů brání správné funkci ventilátoru. Pak se tato vada projevuje dřením lopatek ventilátoru o zvlněný kryt.

Obě uvedené vady krytu ventilátoru znemožňují jeho správnou funkci a ve výrobě představují zmetkovitost, která dosahuje hodnoty (cca 10 %).

## 2 Experimentální vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu z oceli DC04

K zajištění spolehlivé výroby výtažku dle stanovené jakosti je nutné znát kromě požadovaných vlastností hotového výtažku i vhodnost plechu k hlubokému tažení. Ke stanovení způsobilosti materiálů k tváření byla vypracována řada zkoušek. Existující zkoušky tvářitelnosti plechů lze rozdělit do dvou základních skupin na zkoušky základní a zkoušky napodobující. Dále také mohou být pro úplné popsání materiálu stanovena nekonvenční kritéria tvářitelnosti plechu.

### 2.1 Základní zkoušky tvářitelnosti plechů

Mezi základní zkoušky, které jsou normalizovány, patří tahová zkouška, zkoušky tvrdosti, mikrostruktury a mikročistoty, jakosti a stavu povrchu, chemický rozbor, rentgenografická difrakce a další. Nejrozšířenější základní zkouškou je zkouška tahem.

#### 2.1.1 Stanovení chemického složení

Z plechové tabule (viz tab. 2.1) z oceli 11 305.21 byly ustříženy obdélníkové tabulky o hmotnosti 200 g. K nastříhání se použilo ručních pákových nůžek v laboratoři katedry mechanické technologie fakulty strojní VŠB-TU Ostrava.

Tab. 2.1 Tabule plechu použitá pro experimentální vyhodnocení tvářitelnosti

Polotovar	Materiál	Číslo tavby	Číslo svitku
P 0,9 × 1000 – 2000 ČSN 42 6312.32	11 305.21	48 458	48 45813/5

Odběr vzorků pro chemickou analýzu byl proveden ve výzkumném ústavu hutnictví železa v Dobré v souladu s ČSN 42 1210. Rozbor chemického složení plechu byl proveden ve VÚHŽ v Dobré podle ČSN 42 0510 až ČSN 42 0526.

Ocel 11 305.21 dle ČSN 41 1305 je vhodná pro velmi hluboké tažení a je speciálně uklidněná kyslíková [1].



Směrné chemické složení plechu vyráběného z oceli 11 305.21 [1] je uvedeno v tabulce 2.2. Výsledky rozboru chemického složení plechu jsou uvedeny v tabulce 2.3. Bylo zjištěno, že chemické složení oceli zjištěné rozbohem vyhovuje směrnému chemickému složení udávaného normou ČSN 41 1305. Jediným nevyhovujícím prvkem je Al.

Tab. 2.2 Směrné chemické složení oceli 11 305.21 dle ČSN 41 1305

C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	Al [hm. %]	N
max. 0,07	max. 0,40	max. 0,03	max. 0,025	max. 0,025	min. 0,025	musí být vázaný

Tab. 2.3 Výsledky rozboru chemického složení plechu z oceli 11 305.21

C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	As [hm. %]
0,061	0,270	0,010	0,018	0,019	0,038	0,039	0,020

Pb [hm. %]	Cu [hm. %]	Al nevázaný [hm. %]	Al celkem [hm. %]	O [hm. %]
0,061	0,270	0,010	0,018	0,019

### 2.1.2 Stanovení jakosti a stavu povrchu plechu

Jakost povrchu plechu se vyjadřuje první doplňkovou číslicí za číslem rozměrové normy [1].

Plech z oceli 11 305.21 musí splňovat jakost povrchu dle ČSN 42 6312.32. Povrch plechové tabule byl posouzen podle ČSN 42 0127. Charakter chyb (např. pórů, jizev, prohloubenin atd.) byl zkontrolován pomocí lupy při desetinásobném zvětšení.

Doplňková číslice 3 za číslem normy ukazuje, že pórovitost, jizvy, prohloubeniny, vyvýšeniny a poškrábání se dovolují ojediněle, přičemž jejich hloubka nesmí v žádném místě přesáhnout 1/4 tolerance tloušťky plechu, počet chyb nesmí překročit 5 na 1 m délky a velikost jednotlivé chyby nesmí překročit maximální velikost 3 mm<sup>2</sup>. Náběhové zbarvení je povoleno do vzdálenosti 30 mm od okraje. Zbarvení od válcovací emulze ani deformační čáry povoleny nejsou [1].

Jakost povrchu obou stran plechu splňuje požadavky ČSN 42 0127 pro danou jakost povrchu.

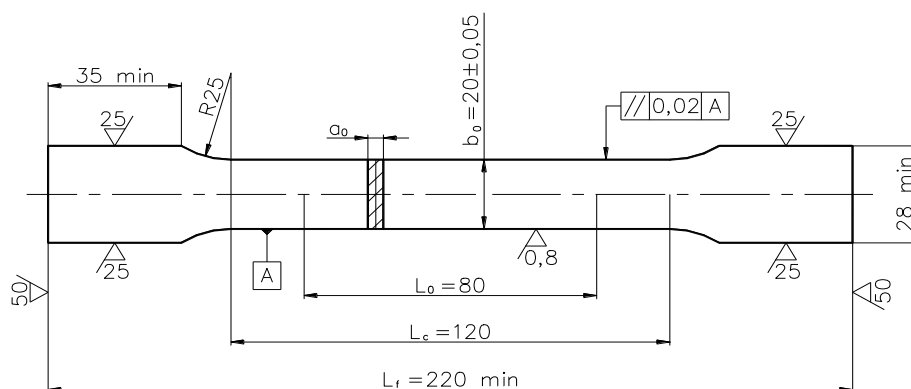
Stav povrchu plechu se vyjadřuje druhou doplňkovou číslicí za číslem rozměrové normy. Stav povrchu je charakterizován hodnotou  $R_a$ , tj. střední aritmetická odchylka od střední čáry profilu [1].

Stav povrchu plechu byl posouzen pomocí zkušebních vzorků. Na každém vzorku byla po obou stranách změřena drsnost povrchu. Změřená aritmetická úchylka profilu  $R_a$  se pohybovala v rozmezí 0,80  $\mu\text{m}$  až 1,00  $\mu\text{m}$ , tzn. stav povrchu je matný po celé ploše od jemně zdrsňených válců.

Povrch plechu tedy splňuje požadavky ČSN 42 0127, kde pro druhou doplňkovou číslicí ČSN 42 6312.32 je stanoven přípustný rozsah  $R_a$  nad 0,63  $\mu\text{m}$  do 2,00  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.3 Stanovení mechanických vlastností tahovou zkouškou

Zkouška tahem byla provedena v souladu s ČSN EN 10002-1. Z plechové tabule byly v TATRA, a. s., Kopřivnice na ručních tabulových nůžkách NTE 2000/2,5-B nastříhány zkušební vzorky – plechové tabulky o rozměrech 300 mm  $\times$  400 mm orientovaných ve směrech 0°, 45° a 90° vůči směru válcování. Odběr zkušebních vzorků byl proveden dle ČSN EN ISO 377. Tato norma stanovuje umístění a přípravu zkušebních vzorků pro mechanické zkoušení. Takto připravené vzorky následně sloužily jako polotovary pro výrobu zkušebních těles – plochých zkušebních tyčí. Rozměry plochých zkušebních tyčí byly v souladu s ČSN EN 10002-1 (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Plochá zkušební tyč pro zkoušku tahem

Vyhodnocení mechanických vlastností, tj. smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ , pevnosti v tahu  $R_m$  a tažnosti  $A_{80}$  bylo provedeno zkouškou jednoosým tahem dle ČSN EN 10002-1 v laboratoři katedry mechanické technologie fakulty strojní VŠB-TU Ostrava na zkušebním trhacím stroji s ručním řízením ZD 40.

Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  byla zjištěna z tahového diagramu grafickou metodou dle ČSN EN 10002-1. Pro výpočet tažnosti  $A_{80}$  se po přetržení zkušební tyče posuvným měřítkem změřila její konečná délka  $L_k$ . Směrové hodnoty mechanických vlastností plechu byly vypočítány jako aritmetický průměr ze tří naměřených hodnot.

Směrné hodnoty mechanických vlastností daného ocelového plechu jsou uvedeny v tab. 2.4. Zjištěné směrové a střední hodnoty mechanických vlastností plechu jsou uvedeny v tab. 2.5.

Tab. 2.4 Směrné hodnoty mechanických vlastností plechu z oceli 11 305.21

Označení oceli	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80(90)}$ [min. %]
11 305.21	max. 215	290 ÷ 360	36

Tab. 2.5 Zjištěné směrové a střední hodnoty mechanických vlastností plechu

Mechanické vlastnosti	Úhel vzhledem ke směru válcování			Střední hodnota
	0°	45°	90°	
$R_{p0,2}$ [MPa]	198,6	210,4	202,6	205,5
$R_m$ [MPa]	329,2	340,3	318,6	332,2
$R_{p0,2}/R_m$ [-]	0,603	0,618	0,635	0,619
$A_{80}$ [%]	33,20	29,30	29,40	30,30

Zkouška jednoosým tahem dle ČSN EN 10002-1 prokázala, že mechanické vlastnosti (smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , pevnost v tahu  $R_m$ ) zkušebních vzorků z oceli 11 305.21 spadají do oblastí směrných hodnot. ČSN 41 1305 pro ocel 11 305.21 (DC04) požaduje hodnotu tažnosti ve směru 90° vůči směru válcování plechu minimálně 36 %. Tomuto požadavku zkoušený plech nevyhověl (viz tab. 2.5).

## 2.2 Napodobující zkoušky

Ocelový plech je při tažení podroben rozmanitým stavům napjatosti a deformací, proto není možné vyjádřit tvářitelnost plechu jedním univerzálním ukazatelem. Je však možné ji posuzovat ve dvou krajních polohách komplexního procesu plastické deformace, tj. při vypínání a při vlastním hlubokém tažení. K tomuto účelu byla vyvinuta celá řada zkoušek, které napodobují buď některou konkrétní technologii nebo modelují stavy napjatosti, odpovídající některé ze zmíněných krajních poloh nebo jejich kombinaci.

Mezi napodobující zkoušky patří zkouška hloubením dle Erichsena, kalíškovací, Engelhardta – Grosse, hydraulická, klínová, Fukui, Siebela – Pompa atd. [1].

V České republice se jako napodobující zkouška pro hodnocení tvářitelnosti plechů používá Erichsenova zkouška hloubením dle ČSN 42 0406. Poměrně rozšířená je rovněž Engelhardtova kalíškovací zkouška.

Rozhodnutí o vhodnosti zkoušeného plechu pro hluboké tažení je závislé na tom, do jaké míry mechanické schéma deformace při dané napodobující zkoušce odpovídá mechanickému schématu deformace při hlubokém tažení konkrétního výtazku.

### 2.2.1 Zkouška hloubením dle Erichsena

Kritériem tvářitelnosti u zkoušky hloubením dle Erichsena je velikost dosaženého prohloubení  $IE$  [mm] v okamžiku vzniku průchozí praskliny. Tato zkouška je často používána, protože je jednoduchá, rychlá a nenáročná na přípravu vzorků. Hodnoty  $IE$  ovšem leží v poměrně úzkém intervalu pro různé jakosti plechu, jsou proto zatíženy větší chybou měření.

V TATRA, a. s., Kopřivnice bylo na ručních nůžkách NTE 2000/2,5-B z tabule plechu (tab. 2.1) nastříháno v souladu s ČSN EN ISO 377 pět čtvercových zkušebních těles o straně 100 mm. Průměrné tloušťky zkušebních těles byly stanoveny s přesností na 0,01 mm jako aritmetické průměry z pěti měření mikrometrickým šroubem 0-25/0,01 mm dle ČSN 25 1451.

Zkoušky hloubením byly provedeny v laboratoři katedry nauky o kovech fakulty metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-TU Ostrava na přístroji E – 1, který odpovídal požadavkům ČSN 42 0406. Při všech zkouškách se použil tažník s kulovým zakončením průměru 20 mm a tažnice s otvorem průměru 27 mm.

Před každou zkouškou byly obě strany zkušební tělesa potřeny plastickým mazivem, tj. mazacím tukem G 3, který obsahuje minimálně 5 hm. % lupínkového grafitu. U každého čtvercového zkušební tělesa se provedlo jedno prohloubení v jeho středu. Rychlost posuvu tažníku byla dodržena v rozmezí 5 mm/min až 20 mm/min, jak je stanoveno v ČSN 42 0406. Každá zkouška byla zakončena v okamžiku, kdy vznikla průchozí prasklina v prohloubení. Hloubky prohloubení se změřily pomocí posuvné a noniové stupnice přístroje s přesností na 0,05 mm.

Směrné hodnoty zkoušky hloubením podle Erichsena dle ČSN 41 1305 jsou uvedeny v tab. 2.6. Výsledky zkoušek hloubením plechu z oceli 11 305.21 tloušťky 0,9 mm dle Erichsena jsou uvedeny v tab. 2.7.

Tab. 2.6 Směrné hodnoty zkoušky hloubením dle Erichsena oceli 11 305.21

Jmenovitá tloušťka plechu $a$	Prohloubení $IE$
0,9 mm	10,4 mm

Tab. 2.7 Výsledky zkoušek hloubením dle Erichsena [mm]

Číslo měření	Číslo vzorku				
	1	2	3	4	5
1	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91
2	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91
3	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91
4	0,91	0,92	0,92	0,91	0,90
5	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90
Střední tloušťka plechu	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90
$IE$	10,9	10,8	10,9	10,9	10,7
Střední tloušťka tabule plechu:				$\bar{a} = ,91$ mm	
Střední hodnota vzniklého prohloubení:				$\bar{IE} = 10,8$ mm	

## 2.3 Nekonvenční kritéria hodnocení tvářitelnosti plechů

Tvářitelnost je schopnost tvářeného tělesa se plasticky deformovat za obecných podmínek tváření bez porušení celistvosti materiálu [3].

Pro tvářitelnost kovů je možné použít dvě definice:

- a) Tvářitelnost kovů je velikost deformace, kterou kov může snést bez částečného (prasklina) nebo úplného porušení celistvosti (lom) při dané teplotě a rychlosti deformace [2].
- b) Tvářitelnost kovů je stupeň deformace při jednotlivých procesech zpracování kovů tvářením, který nevyvolává na konečném výlisku nežádoucí jevy (vznik prasklin, lom, ale i jiné nežádoucí jevy z hlediska uživatele výlisků, např. nevyhovující povrch výlisku, zvlnění plechu, nedostatečné vyplnění dutiny nástroje) [2].

Mezi nekonvenční kritéria hodnocení tvářitelnosti plechů patří součinitelé plastické a plošné anizotropie a exponent deformačního zpevnění. Podle těchto kritérií je možno stanovit tvářitelnost plechu pro konkrétní tvary výtažků i lépe zařadit plechy z hlediska tvářitelnosti [1].

Volba optimální orientace polotovarů při nástřihu a v tvářecím nástroji je možná díky zahrnutí anizotropie mechanických vlastností plechu do kritérií hodnocení tvářitelnosti. Volba optimální orientace je zejména důležitá u nesymetrických a nerotačně symetrických tvarů výtažků.

Zavedením nekonvenčních kritérií hodnocení tvářitelnosti je umožněna racionálnější volba nástřihových plánů, tvarů výchozích polotovarů, využití plastických vlastností plechů a kladné ovlivnění konstrukce tvářecích nástrojů.

### 2.3.1 Plošná anizotropie mechanických vlastností plechu

Plošná anizotropie je směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností v rovině plechu vzhledem ke směru válcování. Vzniká jako důsledek strukturní

a krystalografické textury, které jsou spojeny s metalurgickými a výrobními podmínkami výroby plechů [1].

Pro posouzení vhodnosti daného plechu k hlubokému tažení je nutno vzít v úvahu plošnou anizotropii těchto mechanických vlastností: meze kluzu, pevnosti v tahu, tažnosti, případně kontrakce. Dále také součinitele plastické anizotropie, exponentu deformačního zpevnění a maximálního rovnoměrného prodloužení.

Ke zjištění plošné anizotropie jsou potřebné výsledky tahových zkoušek zkušebních tyčí, odebraných z plechu ve směru  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování. Pro zjištění anizotropie se používají ploché zkušební tyče s rozměry v souladu s ČSN EN 10002-1. Vyhodnocení součinitelů plošné anizotropie se provádí podle ČSN 42 0437.

Plošná anizotropie mechanických vlastností se vyjadřuje pomocí součinitelů plošné anizotropie podle následujících vztahů [1]:

$$PR_{p(x)} = \frac{R_{p(x)} - R_{p(0)}}{R_{p(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

$$PR_{m(x)} = \frac{R_{m(x)} - R_{m(0)}}{R_{m(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.2)$$

$$P(R_p/R_m)_{(x)} = \frac{(R_p/R_m)_{(x)} - (R_p/R_m)_{(0)}}{(R_p/R_m)_{(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

$$PA_{(x)} = \frac{A_{(x)} - A_{(0)}}{A_{(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

kde je  $P$  – součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti,

$x$  – úhel zvoleného směru v rovině plechu vůči směru válcování  $[\circ]$ ,

$0$  – úhel orientace odpovídající směru válcování  $[\circ]$ .

Pro úplnost popisu průběhu anizotropie plechu je vhodné pro jednotlivé mechanické hodnoty vypočítat maximální součinitele plošné anizotropie podle vztahů [1]:

$$\max PR_p = \frac{\max R_{p0,2} - \min R_{p0,2}}{\min R_{p0,2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

$$\max PR_m = \frac{\max R_m - \min R_m}{\min R_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

$$\max P(R_p / R_m) = \frac{\max R_{p0,2} / R_m - \min R_{p0,2} / R_m}{\min R_{p0,2} / R_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

$$\max PA = \frac{\max A_{80} - \min A_{80}}{\min A_{80}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.8)$$

kde  $\max P$  je maximální součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti,  $\max R_{p0,2}$ ,  $\max R_m$ ,  $\max R_{p0,2}/R_m$ ,  $\max A_{80}$  je maximální směrová hodnota smluvní meze kluzu, pevnosti v tahu, poměru smluvní meze kluzu k pevnosti v tahu a tažnosti,  $\min R_{p0,2}$ ,  $\min R_m$ ,  $\min R_{p0,2}/R_m$ ,  $\min A_{80}$  je minimální směrová hodnota smluvní meze kluzu, pevnosti v tahu, poměru smluvní meze kluzu k pevnosti v tahu a tažnosti.

Ze zjištěných směrových a středních hodnot mechanických vlastností (tab. 2.5) plechu z oceli 11 305.21 byly podle rovnic (2.1) až (2.4) vypočítány hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechu. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.8.

Tab. 2.8 Hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechu

Koeficient	Směr		
	0°	45°	90°
$PR_{p \rightarrow} [\%]$	0,00	5,94	2,01
$PR_{m \rightarrow} [\%]$	0,00	3,37	-3,16
$P(R_p / R_m)_{\rightarrow} [\%]$	0,00	2,49	5,31
$PA_{\rightarrow} [\%]$	0,00	-11,75	-11,45

Pro úplnost popisu průběhu anizotropie plechu byly vypočítány hodnoty maximálních součinitelů plošné anizotropie dosazením maximální a minimální hodnoty ze středních směrových hodnot do rovnic (2.5) až (2.8). Hodnoty maximálních součinitelů jsou uvedeny v tab. 2.9.



Tab. 2.9 Hodnoty maximálních součinitelů plošné anizotropie plechu

Maximální součinitel plošné anizotropie	Ocel 11 305.21
max $PR_p$ [%]	5,94
max $PR_m$ [%]	6,74
max $P(R_p / R_m)$ [%]	5,31
max $PA$ [%]	13,31

### 2.3.2 Plastická anizotropie

Normálová anizotropie plechů vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu oproti mechanickým vlastnostem ve směru kolmém na rovinu plechu, tj. ve směru tloušťky. Normálová anizotropie plastické deformace se v daném směru  $x$  ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) vůči směru válcování plechu vyjadřuje bezrozměrným číslem – součinitelem plastické anizotropie  $r_x$ , který je dán vztahem [1]:

$$r_x = \frac{\varphi_b}{\varphi_a} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{a_0}{a_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{L_k \cdot b_k}{L_0 \cdot b_0}} \quad [-] \quad (2.9)$$

kde je  $\varphi_b, \varphi_s$  – logaritmické deformace ve směru šířky a tloušťky [-],

$L_0, b_0, a_0$  – počáteční délka, šířka a tloušťka zkoušené části zkušební tyče [mm],

$L_k, b_k, a_k$  – konečná délka, šířka a tloušťka zkoušené části zkušební tyče [mm].

Součinitel plastické deformace vyjadřuje odolnost plechu proti ztenčování jeho tloušťky v průběhu hlubokého tažení. Čím je hodnota součinitele vyšší, tím je plech odolnější proti ztenčování a tím více je vhodný k hlubokému tažení.

Jako kritérium tváritelnosti plechu se používá hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie podle vztahu [1]:

$$\bar{r} = \frac{1}{4} \cdot (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.10)$$

kde  $r_0, r_{45}, r_{90}$  jsou součinitelé plastické anizotropie ve směrech  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  vůči směru válcování plechu.

Cípvitost výtažků se hodnotí podle stupně plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie  $\Delta r$  dle ČSN ISO 10113:

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.11)$$

Je-li  $\Delta r > 0$ , cípy se tvoří ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, tj. ve směrech maximálních hodnot součinitelů  $r_x$ . Je-li  $\Delta r < 0$ , cípy se tvoří ve směrech  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$  vůči směru válcování. Je-li  $\Delta r = 0$ , cípy se netvoří.

Čím je hodnota  $\bar{r}$  vyšší a čím je nižší hodnota  $\Delta r$  (nejlépe nulová), tím je plech odolnější proti ztenčování, a tedy vhodnější k hlubokému tažení.

Směrné hodnoty váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$  pro hodnocení tvářitelnosti plechů nejsou doposud stanoveny normou. Zatím je možné použít návrh zatřídění plechů podle Shawkiho [1]:

- |                            |                              |
|----------------------------|------------------------------|
| a) nízká tvářitelnost      | $\bar{r} < 1,25$ ,           |
| b) dobrá tvářitelnost      | $\bar{r} = 1,25$ až $1,60$ , |
| c) vynikající tvářitelnost | $\bar{r} > 1,60$ .           |

Pro stanovení součinitelů plastické anizotropie plechu z oceli 11 305.21 byla provedena zkouška jednoosým tahem dle ČSN EN 10002-1 na zkušebním trhacím stroji INSTRON 1116. Jako zkušební tyče byly použity části plechových tabulek, které zbyly po odstřížení zkušebních tyčí pro stanovení mechanických vlastností. Z plechové tabulky byly zhotoveny čtyři zkušební tyče. Na každé tyči byla počáteční délka  $L_0 = 80$  mm vyznačena ryskami s přesností 1 %. Počáteční šířka tyče  $b_0$  byla změřena na třech místech zkušební tyče s přesností 0,01 mm. Směrodatná počáteční šířka pak byla vypočtena jako aritmetický průměr z těchto tří měření.

Po zatěžování a následném odlehčení byla v ose zkoušené tyče změřena konečná délka  $L_k$  s přesností 0,01 mm. Směrodatná konečná šířka zkoušené tyče  $b_k$  byla vypočítána jako aritmetický průměr ze tří měření na tyči.

Hodnoty součinitelů plastické anizotropie byly vypočítány jako aritmetické průměry ze všech měření. Hodnoty součinitelů plastické anizotropie ve směrech 0°, 45° a 90° vůči směru válcování plechu, hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$  a stupně plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie  $\Delta r$  byly vypočítány dle vztahů (2.9) až (2.11). Zjištěné hodnoty všech těchto součinitelů pro zkoušený plech z oceli 11 305.21 jsou uvedeny v tab. 2.10.

Tab. 2.10 Vypočítané hodnoty součinitelů plastické anizotropie, hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie, stupeň plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie

$r_0$ [-]	$r_{45}$ [-]	$r_{90}$ [-]	$\bar{r}$ [-]	$\Delta r$ [-]
1,95	1,40	2,30	1,76	0,725

### 2.3.3 Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění vyjadřuje intenzitu zpevňování plechu při plastické deformaci jednoosým tahem. Číselně je roven exponentu v rovnici (2.12), matematicky vyjadřuje parabolicky aproximovanou závislost intenzity skutečných napětí na intenzitě skutečných deformací. Exponent zpevnění je materiálová konstanta, pro hlubokotažné plechy je vždy menší než 1.

Závislost mezi intenzitou skutečných napětí  $\sigma_i$  a intenzitou skutečných deformací  $\varphi_i$  v oblasti plastických deformací u nízkouhlíkové oceli lze definovat exponenciální závislostí:

$$\sigma_i = C_x \cdot \varphi_i^{n_x} \quad [\text{MPa}] \quad (2.12)$$

kde je  $n_x$  – exponent deformačního zpevnění ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu,  
 $C_x$  – součinitel pevnosti ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu [MPa].

Hodnota exponentu deformačního zpevnění ocelového plechu závisí především na velikosti zrna, na chemickém složení, tj. na obsahu příměsových prvků, na stupni hladicího válcování a na stárnutí [1]. Všechny příměsové prvky (např. Cu, Si, Mo, Mn) snižují exponent deformačního zpevnění.

Metoda měření dle ČSN ISO 10275 používá zkušební tyče neodstupňované. Jako kritérium tvářitelnosti plechu se používá průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  podle vztahu:

$$n_m = \frac{1}{4} \cdot n_0 + 2 \cdot n_{45} + n_{90} \quad [-] \quad (2.13)$$

kde  $n_0$ ,  $n_{45}$ ,  $n_{90}$  jsou exponenty deformačního zpevnění ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu.

Stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$  se vypočítá podle vztahu:

$$\Delta n = \frac{1}{2} \cdot n_0 - 2 \cdot n_{45} + n_{90} \quad [-] \quad (2.14)$$

Exponent deformačního zpevnění ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu pro jeden bod měřeného intervalu se u metody měření pro odstředivou zkušební tyč vypočítá ze vztahu [1]:

$$n_{xi} = \frac{\ln \frac{b_2 \cdot L_1'}{b_1 \cdot L_2'}}{\ln \frac{L_1}{L_2}} \quad [-] \quad (2.15)$$

kde je  $L_1, L_2$  – počáteční měřená délka užší (širší) části zkušební tyče [mm],

$L_1', L_2'$  – okamžitá měřená délka užší (širší) části zkušební tyče po okamžitém zatížení [mm],

$b_1, b_2$  – počáteční šířka užší (širší) části zkušební tyče [mm].

Exponent deformačního zpevnění ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu se vypočítá jako průměrná hodnota pro celý interval měření závislosti „okamžité zatížení  $F$  – okamžité prodloužení  $\Delta L$ “, rozděleného na  $k$  úseků, podle vztahu [1]:

$$n_x = \frac{\sum_{i=1}^k n_{xi}}{k} \quad [-] \quad (2.16)$$

Exponent deformačního zpevnění, jako kritérium tvářitelnosti plechu, je rozhodující pro případy hlubokého tažení, kde převládají tahová napětí. Čím vyšší je hodnota exponentu deformačního zpevnění, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení.

Směrodatné hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  pro hodnocení tvářitelnosti plechů nejsou dosud stanoveny normou. Zatím lze použít návrh zařídění plechů podle dle L. Polláka:

- a) nízká tvářitelnost  $n_m < 0,215$ ,
- b) dobrá tvářitelnost  $n_m = 0,215$  až  $0,250$ ,
- c) vynikající tvářitelnost  $n_m > 0,250$ .

Pro stanovení exponentů deformačního zpevnění plechu byla provedena zkouška na zkušebním trhacím stroji INSTRON 1116. Jako zkušební tyče byly využity části plechových tabulek, které zbyly po odstřížení zkušebních tyčí pro stanovení mechanických vlastností. Na každé tyči byla ryskami s přesností 1 % vyznačena počáteční délka  $L_0 = 80$  mm. Počáteční šířka tyče  $b_0$  byla na třech místech zkušební tyče změřena s přesností 0,01 mm. Směrodatná počáteční šířka tyče pak byla vypočítána jako aritmetický průměr z těchto tří měření. U zkušebních tyčí se provedla zkouška jednoosým tahem podle ČSN EN 10002-1, kde zatěžování trvalo tak dlouho, dokud nedošlo k přetržení tyče.

Hodnoty exponentů deformačního zpevnění ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  a stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$  byly vypočítány dle vztahů (2.13) až (2.15). Vypočítané hodnoty všech exponentů pro zkoušený plech 11 305.21 jsou uvedeny v tab. 2.11.

Tab. 2.11 Hodnoty exponentů deformačního zpevnění  $n_0$ ,  $n_{45}$ ,  $n_{90}$ , průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$ , stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$

$n_0$ [-]	$n_{45}$ [-]	$n_{90}$ [-]	$n_m$ [-]	$\Delta n$ [-]
0,220	0,210	0,210	0,213	0,005

### 2.3.4 Index tvářitelnosti

Při tažení výtažků nepravidelných tvarů uplatňují společný vliv na tvářitelnost plechu jak vážený průměr součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$ , tak i exponent deformačního zpevnění  $n_m$ . Vliv hodnoty  $\bar{r}$  se uplatňuje především u nezpevněného materiálu, tj. v počáteční fázi plastické deformace, zatímco vliv exponentu  $n_m$  se uplatní až při určitém stupni deformace. U výtažků s nehomogenním stavem napjatosti se vhodnou volbou plechu podle těchto hodnot docílí stejnoměrnější rozložení napětí při tažení. Plastické deformace z míst s velkým počátečním napětím se přemístí do míst s menším počátečním napětím.

Pro klasifikaci plechů lze proto jako kritérium tvářitelnost využít index tvářitelnosti  $I$ . Čím je hodnota indexu tvářitelnosti vyšší, tím je plech vhodnější k hlubokému tažení.

Index tvářitelnosti pro ocel DC04 byl vypočítán jako:

$$I = r_{x \min} \cdot n_m \cdot 1000 = 1,40 \cdot 0,213 \cdot 1000 = 298,2$$

kde  $r_{x \min}$  je minimální hodnota součinitele plastické anizotropie z hodnot  $r_0, r_{45}, r_{90}$ .

Dle diagramu hodnocení vhodnosti plechů k hlubokému tažení podle  $r_{x \min}$  a exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  podle Lileta [2] byl plech z oceli DC04 zařazen do skupiny II – ocelové plechy vhodné pro tažné operace, u kterých je dominující tlak.

### 3 Tvar a velikost přístříhu

Tvar a velikost přístříhu je nutné stanovit tak, aby se předcházelo zmetkovitosti, zlepšily se podmínky tečení kovu při procesu tažení a zvýšila se přesnost malých výtažků. Problematika optimalizace tvaru a velikosti přístříhu se také zabývá požadavkem minimalizace velikosti přístříhu z důvodu úspory materiálu.

Optimální tvar a velikost přístříhu pro tvarové výtažky lze stanovit následujícími metodami:

- a) dle ČSN,
- b) metodou řezů,
- c) metodou využívající trajektorií maximálních smykových napětí (TMSN),
- d) metodou využívající BSE modul v programu DYNAFORM 5.2.

#### 3.1 Stanovení tvaru a velikosti přístříhu dle ČSN 22 7303

Pro stanovení tvaru a velikosti přístříhu se postupuje dle norem ČSN 22 7301 a ČSN 22 7303. Výpočet přístříhu rotačních symetrických výtažků stanovuje norma ČSN 22 7301. Při určování průměru přístříhu se předpokládá, že tloušťka stěn při tažení se nemění, takže plocha přístříhu se rovná ploše výtažku. Vzhledem k anizotropii mechanických vlastností plechu je nutné rozměry přístříhu zvětšit o  $(5 \div 7) \%$ . Pro tažení složitých tvarových výtažků neválcových ploch (kužel, paraboloid, polokoule atd.) se velikost přístříhu počítá podle Guldinova pravidla graficko – analyticky nebo graficky.

Norma ČSN 22 7303 určuje směrnice pro výpočet přístříhu dutých výtažků obdélníkového nebo čtvercového tvaru. Opět vychází z předpokladu, že tloušťka stěn výtažku se během tažení nemění, takže plocha přístříhu se rovná ploše výtažku. Musí se ovšem zohlednit anizotropie mechanických vlastností plechu. Z tohoto důvodu je pro zajištění zadaných rozměrů výtažku nutné zvětšit výšku výtažku o technologický přídavek na ostřížení. Ten se volí podle velikosti výtažku a ostřihovacího zařízení v rozmezí 2 mm ÷ 20 mm.

### 3.1.1 Výpočet tvaru a velikosti přístřihu dle ČSN 22 7303

Výpočet přístřihu dutých čtyřhranných výtažků stanovuje norma ČSN 22 7303. Tvar a velikost přístřihu pro duté čtyřhranné výtažky je na obr. 3.1.

Obrys tažné hrany byl zmenšený o poloviční tloušťku plechu. Pro výpočet byl rozdělen na osm částí A, B, C, D, E, F, G, H. Pro každou část obrysu byl výpočet proveden zvlášť.

#### Vztahy potřebné pro výpočet jednotlivých úseků:

Poloměr přístřihu v rohu výtažku (je-li  $\frac{d_r}{2} > r_d$ ):

$$r_0 = \sqrt{0,25 \cdot d_r^2 + d_r \cdot (h_d + 0,57 \cdot r_d) - 0,14 \cdot r_d^2} \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

kde je  $r_0$  – poloměr přístřihu v místě zaoblených bočních stěn [mm],

$d_r$  – průměr zaoblení bočních stěn výtažku [mm],

$h_d$  – výška rovinné části boční stěny výtažku [mm],

$r_d$  – poloměr zaoblení mezi dnem a boční stěnou výtažku [mm].

Rozvinutá výška v podélných stěnách výtažku:

$$h_s = 0,57 \cdot r_d + h_d + 0,5 \cdot d_r \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

Vypočtené hodnoty se upravují na redukovaný poloměr přístřihu  $R_0$ :

$$R_0 = x \cdot r_0 \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

kde je  $x$  – koeficient zvětšení poloměru  $r_0$ .

Koeficient  $x$  se stanoví dle vzorce:

$$x = 0,074 \cdot \left( \frac{r_0}{d_r} \right) + 0,982 \quad [-] \quad (3.4)$$

Zmenšení rozvinuté výšky delší strany:

$$h_{sa} = y \cdot \frac{r_0^2}{a_{rd}} \quad [\text{mm}] \quad (3.5)$$

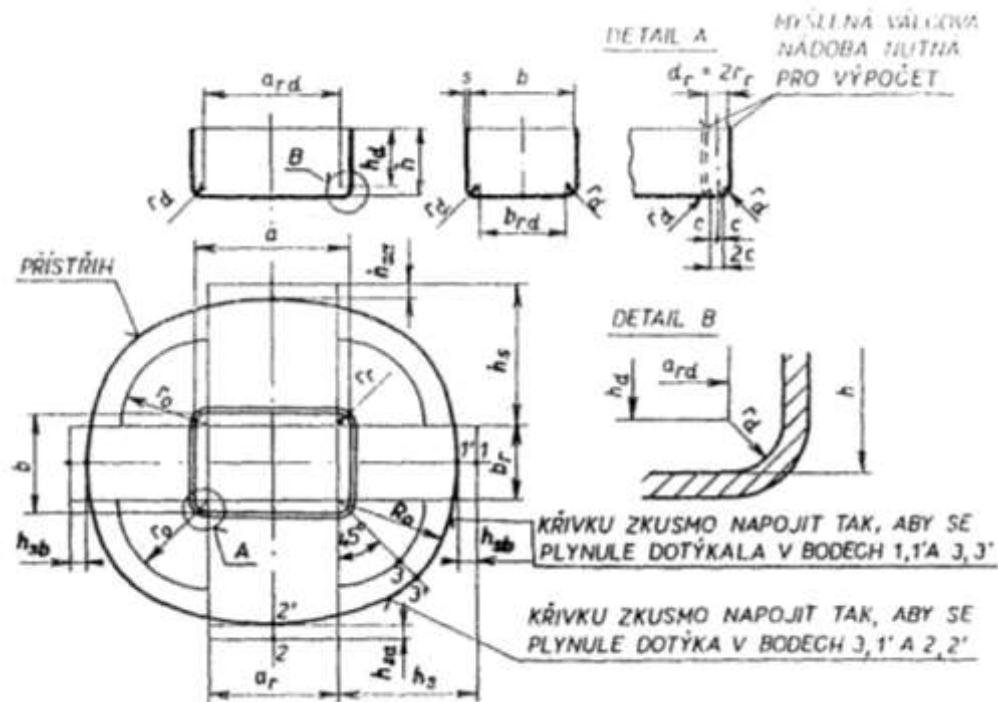


kde je  $y$  – koeficient zmenšení výšky  $h_{sa}$  [-],

$a_{rd}$  – vzdálenost středů zaoblení  $r_d$  odpovídající straně  $a$  konečného tvaru výtažku [mm].

Vztah pro výpočet koeficientu  $y$ :

$$y = \frac{\pi}{4} \cdot (x^2 - 1) \quad [-] \quad (3.6)$$



Obr. 3.1 Tvar a velikost přístřihu pro duté čtyřhranné výtažky

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseku A** ( $d_{rA} = 199,1$  mm;  $h_{dA} = 28,55$  mm;  $r_{dA} = 6$  mm):

Poloměr přístřihu v části A:

$$r_A = \sqrt{0,25 \cdot d_{rA}^2 + d_{rA} \cdot (h_{dA} + 0,57 \cdot r_{dA}) - 0,14 \cdot r_{dA}^2}$$

$$r_A = \sqrt{0,25 \cdot 199,1^2 + 199,1 \cdot (28,55 + 0,57 \cdot 6) - 0,14 \cdot 6^2} = 127,56 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_A$ :

$$x_A = 0,074 \cdot \left(\frac{r_A}{d_{rA}}\right)^2 + 0,982$$

$$x_A = 0,074 \cdot \left( \frac{127,56}{199,1} \right)^2 + 0,982 = 1,012375135$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části A:

$$R_{A'} = x_A \cdot r_A = 129,14 \doteq 129 \text{ mm}$$

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseku B** ( $d_{rB} = 129,1 \text{ mm}$ ;  $h_{dB} = 28,55 \text{ mm}$ ;  $r_{dB} = 6 \text{ mm}$ ):

Poloměr přístřihu v části B:

$$r_B = \sqrt{0,25 \cdot d_{rB}^2 + d_{rB} \cdot (h_{dB} + 0,57 \cdot r_{dB}) - 0,14 \cdot r_{dB}^2}$$

$$r_B = \sqrt{0,25 \cdot 129,1^2 + 129,1 \cdot (28,55 + 0,57 \cdot 6) - 0,14 \cdot 6^2} = 91,04 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_B$ :

$$x_B = 0,074 \cdot \left( \frac{r_B}{d_{rB}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_B = 0,074 \cdot \left( \frac{91,04}{129,1} \right)^2 + 0,982 = 1,018799654$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části B:

$$R_{B'} = x_B \cdot r_B = 92,75 \doteq 93 \text{ mm}$$

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseku C** ( $d_{rC} = 157,3 \text{ mm}$ ;  $h_{dC} = 27,55 \text{ mm}$ ;  $r_{dC} = 7 \text{ mm}$ ):

Poloměr přístřihu v části C:

$$r_C = \sqrt{0,25 \cdot d_{rC}^2 + d_{rC} \cdot (h_{dC} + 0,57 \cdot r_{dC}) - 0,14 \cdot r_{dC}^2}$$

$$r_C = \sqrt{0,25 \cdot 157,3^2 + 157,3 \cdot (27,55 + 0,57 \cdot 7) - 0,14 \cdot 7^2} = 105,55 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_C$ :

$$x_C = 0,074 \cdot \left( \frac{r_C}{d_{rC}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_C = 0,074 \cdot \left( \frac{105,55}{157,3} \right)^2 + 0,982 = 1,015318907$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části C:

$$R_C = x_C \cdot r_C = 107,17 \doteq 107 \text{ mm}$$

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseku D** ( $d_{rD} = 185,5 \text{ mm}$ ;  $h_{dD} = 14,55 \text{ mm}$ ;  $r_{dD} = 20 \text{ mm}$ ):

Poloměr přístřihu v části D:

$$r_D = \sqrt{0,25 \cdot d_{rD}^2 + d_{rD} \cdot (h_{dD} + 0,57 \cdot r_{dD}) - 0,14 \cdot r_{dD}^2}$$

$$r_D = \sqrt{0,25 \cdot 185,5^2 + 185,5 \cdot (14,55 + 0,57 \cdot 20) - 0,14 \cdot 20^2} = 115,59 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_D$ :

$$x_D = 0,074 \cdot \left( \frac{r_D}{d_{rD}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_D = 0,074 \cdot \left( \frac{115,59}{185,5} \right)^2 + 0,982 = 1,010733228$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části D:

$$R_D = x_D \cdot r_D = 116,83 \doteq 117 \text{ mm}$$

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseku E** ( $d_{rE} = 213,7 \text{ mm}$ ;  $h_{dE} = 0 \text{ mm}$ ;  $r_{dE} = 34,55 \text{ mm}$ ):

Poloměr přístřihu v části E:

$$r_E = \sqrt{0,25 \cdot d_{rE}^2 + d_{rE} \cdot (h_{dE} + 0,57 \cdot r_{dE}) - 0,14 \cdot r_{dE}^2}$$

$$r_E = \sqrt{0,25 \cdot 213,7^2 + 213,7 \cdot (0 + 0,57 \cdot 34,55) - 0,14 \cdot 34,55^2} = 124,33 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_E$ :

$$x_E = 0,074 \cdot \left( \frac{r_E}{d_{rE}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_E = 0,074 \cdot \left( \frac{124,33}{213,7} \right)^2 + 0,982 = 1,007048086$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části E:

$$R_{E'} = x_E \cdot r_E = 125,21 \doteq 125 \text{ mm}$$

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseku G** ( $d_{rG} = 69,1 \text{ mm}$ ;  $h_{dG} = 0 \text{ mm}$ ;

$$r_{dG} = 34,55 \text{ mm}):$$

Poloměr přístřihu v části G:

$$r_G = \sqrt{0,25 \cdot d_{rG}^2 + d_{rG} \cdot (h_{dG} + 0,57 \cdot r_{dG}) - 0,14 \cdot r_{dG}^2}$$

$$r_G = \sqrt{0,25 \cdot 69,1^2 + 69,1 \cdot (0 + 0,57 \cdot 34,55) - 0,14 \cdot 34,55^2} = 48,86 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_G$ :

$$x_G = 0,074 \cdot \left( \frac{r_G}{d_{rG}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_G = 0,074 \cdot \left( \frac{48,86}{69,1} \right)^2 + 0,982 = 1,018998367$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části G:

$$R_{G'} = x_G \cdot r_G = 49,79 \doteq 50 \text{ mm}$$

**Parametry pro výpočet rozměru přístřihu úseků F a H** ( $d_{rF,H} = 69,1 \text{ mm}$ ;

$$h_{dF,H} = 0 \text{ mm}; r_{dF,H} = 34,55 \text{ mm}):$$

Rozměr přístřihu v podélné části H:

$$h_{F,H} = 0,57 \cdot r_{dF,H} + h_{dF,H} + 0,5 \cdot d_{rF,H}$$

$$h_{F,H} = 0,57 \cdot 34,55 + 0 + 0,5 \cdot 69,1 = 54,24 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_{F,H}$ :

$$x_{F,H} = 0,074 \cdot \left( \frac{r_G}{d_{rF,H}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_{F,H} = 0,074 \cdot \left( \frac{48,86}{69,1} \right)^2 + 0,982 = 1,018998367$$

Koeficient  $y_{F,H}$ :

$$y_{F,H} = \frac{\pi}{4} \cdot (x_{F,H}^2 - 1)$$

$$y_{F,H} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,018998367^2 - 1) = 0,030126044$$

Redukovaný rozměr přístřihu v části F ( $a_F = 100$  mm):

$$h_{F'} = h_{F,H} - y_{F,H} \cdot \frac{r_G^2}{a_F}$$

$$h_{F'} = 54,24 - 0,030126044 \cdot \frac{48,86^2}{100} = 53,52 \doteq 54 \text{ mm}$$

Redukovaný rozměr přístřihu v části H ( $a_H = 30$  mm):

$$h_{H'} = h_{F,H} - y_{F,H} \cdot \frac{r_G^2}{a_H}$$

$$h_{H'} = 54,24 - 0,030126044 \cdot \frac{48,86^2}{30} = 51,84 \doteq 52 \text{ mm}$$

U všech vypočítaných rozměrů přístřihu je nutné zohlednit anizotropii mechanických vlastností materiálu. Z tohoto důvodu jsou výše uvedené stanovené rozměry přístřihu zvětšeny o 5 %. Pro zajištění rozměrů výtažku je připočten technologický přídavek na ostřížení tvaru o velikosti 5 mm. K úsekům A, B, C, D, E, F je připočten přídavek na přírubu 14 mm.

Konečné rozměry přístřihu dle metody ČSN 22 7303:

$$R_A = R_{A'} \cdot 1,05 + 14 + 5 = 154,45 \doteq 154 \text{ mm}$$

$$R_B = R_{B'} \cdot 1,05 + 14 + 5 = 116,65 \doteq 117 \text{ mm}$$

$$R_C = R_{C'} \cdot 1,05 + 14 + 5 = 131,35 \doteq 131 \text{ mm}$$

$$R_D = R_{D'} \cdot 1,05 + 14 + 5 = 141,85 \doteq 142 \text{ mm}$$

$$R_E = R_{E'} \cdot 1,05 + 14 + 5 = 150,25 \doteq 150 \text{ mm}$$

$$h_F = h_{F'} \cdot 1,05 + 14 + 5 = 75,70 \doteq 76 \text{ mm}$$

$$R_G = R_{G'} \cdot 1,05 + 5 = 57,50 \doteq 58 \text{ mm}$$

$$h_H = h_{H'} \cdot 1,05 + 5 = 59,60 \doteq 60 \text{ mm}$$

Konstrukce tvaru a velikosti přístřihu pro výtažek levého krytu ventilátoru, provedená podle ČSN 22 7303, je v příloze A2.3 (výkres KMT-01-02). Výrobní výkres přístřihu výtažku levého krytu ventilátoru stanoveného podle ČSN 22 7303 (KMT-01-03) je v příloze A2.4.

### 3.2 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu metodou řezů

Tato metoda se používá pro zjištění tvaru a velikosti přístřihu výtažků libovolného tvaru. Je vhodná převážně pro velkorozměrné výtažky a pro výtažky s členitou čelní plochou (plocha tažníku), kde se předpokládá, že některé plochy bude nutné táhnout se ztenčením stěny.

Princip metody spočívá v rozvinování povrchových křivek v jednotlivých řezech, vedených konečným tvarem výtažku. Délka povrchových křivek se upravuje s ohledem na předpokládané prodloužení vlivem tažení. Maximální prodloužení se předpokládá 25 % a odpovídající velikost koeficientu pro přepočet je tedy 0,75. V praxi se pro výpočty doporučuje hodnota v rozmezí 0,75 ÷ 0,9 [4]. Vzhledem k anizotropii mechanických vlastností plechu se pro zajištění rozměrů výtažku zvětšují rozměry vypočítaného přístřihu o technologický přídavek na ostřížení. Ten se volí v intervalu 2 mm ÷ 20 mm podle velikosti výtažku a podle ostříhovacího zařízení. Jestliže se konstruuje přístřih pro výtažek s přírubou, připočítává se k rozměrům výtažku i její šířka.

Metoda řezů je velmi pracná, je nutné vyhodnotit velké množství řezů, délka povrchové křivky se zjišťuje obtížně a zpravidla je třeba mít k dispozici definitivní tvar tažníku pro poslední tah. Problémem je i vhodná volba polohy řezů a vhodná volba koeficientů pro přepočet jednotlivých rozvinutých délek povrchových křivek. Z těchto důvodů nelze stanovit optimální tvar a velikost přístřihu touto metodou.

### 3.2.1 Výpočet a konstrukce přístříhu metodou řezů

Pro výpočet a stanovení tvaru a velikosti přístříhu pomocí metody řezů je důležité vhodně zvolit polohu jednotlivých řezů. Navržení řezů a jejich umístění na výtažku levého krytu ventilátoru je znázorněno na konstrukčním výkresu přístříhu stanoveném metodou řezů (příloha A2.5). Jedná se o složitý výtažek, u kterého nelze stanovit rozměry pro výpočet rozvinutých povrchových křivek ve zvolených řezech ze samotného výkresu konečného výtažku. Z tohoto důvodu byly vstupní parametry, které nejsou na výrobním výkresu výtažku zakótovány, stanoveny měřením na samotném výtažku levého krytu ventilátoru. Tyto naměřené a vypočítané rozměry v jednotlivých řezech jsou uvedeny v tab. 3.1.

Povrch výtažku je složen z různých úseků. Každý úsek má jiný druh napjatosti a tedy i jiné prodloužení vlivem tažení. Tyto rozdíly korigují koeficienty  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  a  $k_5$ , které jsou navrženy pro každý úsek zvlášť podle předpokládaného prodloužení při tažení. Hodnoty korekčních součinitelů jsou uvedeny v tab. 3.1. Celková délka povrchových křivek  $l_c$  (tab. 3.1) v jednotlivých řezech se stanoví dle vztahu:

$$l_c = l_d \cdot k_1 + l_r \cdot k_2 + l_s \cdot k_3 + l_t \cdot k_4 + l_p \cdot k_5 \quad [\text{mm}] \quad (3.7)$$

kde je  $l_d$  – délka povrchové křivky dna výtažku [mm],

$l_r$  – délka poloměru mezi dnem a svislou stěnou výtažku [mm],

$l_s$  – délka povrchové křivky svislé stěny výtažku [mm],

$l_t$  – délka poloměru na tažné hraně výtažku [mm],

$l_p$  – délka povrchové křivky příruby výtažku [mm].

Tab. 3.1 Naměřené a vypočítané hodnoty úseků povrchových křivek v řezech 1 ÷ 22

Číslo řezu	Naměřené a vypočítané délky úseků [mm]					
	$l_d$ ( $k_1 = 0,99$ )	$l_r$ ( $k_2 = 0,85$ )	$l_s$ ( $k_3 = 0,87$ )	$l_t$ ( $k_4 = 0,84$ )	$l_p$ ( $k_5 = 0,98$ )	$l_c$
1	58,60	8,718	24,0	3,848	2,0	91,5
2	58,60	8,718	24,0	3,848	2,0	91,5
3	58,60	8,718	24,0	3,848	2,0	91,5
4	58,60	8,718	24,0	3,848	2,0	91,5
5	72,85	8,718	24,0	3,848	2,0	105,6
6	71,50	10,289	24,0	3,848	2,0	105,6
7	71,36	10,289	24,5	3,848	2,0	105,9
8	71,36	10,289	24,5	3,848	2,0	105,9
9	71,06	10,289	24,5	3,848	2,0	105,6
10	69,54	11,860	24,0	3,848	2,0	105,0
11	81,67	16,572	21,0	3,848	2,0	118,4
12	78,54	21,284	18,0	3,848	2,0	116,7
13	76,26	27,567	14,0	3,848	2,0	116,3
14	75,72	30,709	12,0	3,848	2,0	116,7
15	74,61	30,709	12,0	3,848	2,0	115,6
16	73,50	30,709	12,0	3,848	2,0	114,5
17	88,45	30,709	12,0	3,848	2,0	129,3
18	85,56	35,421	10,0	3,848	2,0	128,7
19	75,56	46,417	5,0	3,848	2,0	123,8
20	73,28	51,557	0,0	3,656	2,0	121,4
21	-	51,577	0,0	3,656	2,0	46,9
22	-	54,271	0,0	0,000	0,0	46,1

Z vypočítaných celkových délek povrchových křivek byl zkonstruován obrys přístřihu včetně příruby. K přístřihu byl po celém obrysu připočten přídavek na ostřížení tvaru 5 mm a v místech příruby s patkami byl připočten i rozměr patky. Konstrukce přístřihu výtazku metodou řezů je na výkrese KMT-01-04 (příloha A2.5). Tvar přístřihu konstruovaný pomocí metody řezů je na výrobním výkrese KMT-01-05 (příloha A2.6).



### 3.3 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu metodou využívající trajektorii maximálních smykových napětí (TMSN)

Předešlými metodami lze stanovit přibližný tvar a velikost přístřihu, nedocílí se jimi však přístřihu optimálního, zejména u tažení dutých výtažků nepravidelného tvaru.

Metoda TMSN využívá vzájemné shodnosti kluzových čar, které se objevují na tělese při plastických deformacích s charakteristikami parciálních diferenciálních rovnic. Tyto charakteristiky se nazývají trajektorie maximálních smykových napětí (TMSN). Jde o křivky, jejichž směr v každém bodě odpovídá směru maximálních smykových napětí  $\tau_{\max}$ .

Síť TMSN, která se sestrojuje kolem obrysu oblasti kontaktu tažníku s přístřihem na počátku tažení, je tvořena dvěma osnovami. TMSN jsou spojitě, ortogonální a protínají směry hlavních napětí pod úhlem  $45^\circ$ . Podstatou je, že do sítě TMSN se zakresluje obrysová křivka přístřihu při dodržování podmínky, aby protínala síť TMSN pod úhlem  $\pm 45^\circ$  a aby se plocha takto stanoveného přístřihu shodovala s plochou konečného výtažku.

Tvar přístřihu sestrojeného touto metodou zabezpečuje při tažení optimální kinematické poměry, které spočívají v tom, že trajektorie pohybu částic materiálu jsou kolmé k obrysu kontaktu tažníku s přístřihem na počátku tažení. Na obrysu jsou smyková napětí rovna nule a nedochází k tangenciálnímu přemístění materiálu do stěn výtažku, které by způsobovalo tangenciální stlačení stěn a při malé tloušťce materiálu ztrátu stability plastické deformace, projevující se vznikem zvlnění a vrás.

#### 3.3.1 Metoda rýsování TMSN

Způsob rýsování logaritmických spirál spočívá ve využívání rovnice logaritmické spirály v polárních souřadnicích.

$$\rho = l \cdot e^{c\varphi} \quad [\text{mm}] \quad (3.8)$$

kde je  $\rho$  – délka průvodiče bodu logaritmické spirály [mm],

$l$  – vzdálenost mezi pólem a počátečním bodem logaritmické spirály [mm],

$e$  – základ přirozených logaritmů,

$c$  – konstanta větší než nula,

$\gamma$  – úhel v radiánech mezi spojnicí pólu s počátečním bodem logaritmické spirály a průvodičem bodu logaritmické spirály.

Při konstrukci logaritmické spirály se vychází z daného pólu, z daného počátečního bodu a z daného tvaru logaritmické spirály, který je charakterizován konstantou  $c$ . Z pólu se rýsuje polopřímka, procházející počátečním bodem logaritmické spirály, která odpovídá nulovému směru pro měření úhlu. Od sestrojené polopřímky se z pólů rýsuje vějíř dalších polopřímek, ekvidistant k první polopřímce, ve směru odvíjení logaritmické spirály. Podle rovnice logaritmické spirály v polárních souřadnicích se postupně počítají a vynášejí délky průvodičů bodů logaritmické spirály na jednotlivých polopřímkách. Vynesené body logaritmické spirály se propojují tak, aby vznikla plynulá křivka.

Rýsování logaritmických spirál je náročné, pracné, zdouhavé a málo přesné. Výsledek konstrukce přístříhu je závislý na přesnosti měření úhlů u vějíře polopřímek, na přesnosti vynesení délek průvodičů jednotlivých bodů logaritmické spirály, na počtu těchto bodů a na následné plynulosti propojení vnesených bodů. Uvedené nedostatky v rýsování je možno odstranit kreslením např. v programu AutoCAD, kde lze docílit jak přesného odměření úhlů a vzdáleností, tak i plynulého propojení bodů.

### **3.3.2 Konstrukce tvaru a velikosti přístříhu metodou TMSN**

Konstrukce optimálního tvaru a velikosti přístříhu pro výtažek levého krytu ventilátoru je v příloze A2.7 (výkres KMT-01-06). U výtažku levého krytu ventilátoru obrys oblasti kontaktu tažníku s přístřihem na počátku tažení odpovídá obrysu tažné hrany tažnice, zmenšenému o poloviční tloušťku plechu. Oblast kontaktu tažníku s přístřihem se v průběhu procesu tažení vlivem tření mezi tažníkem a plechem přemísťuje rychlostí rovnou pohybu tažníku. Nad částmi obrysu tažné hrany tažnice byla sestrojena pole sítě TMSN s využitím programu AutoCAD 2006. Na vnitřním obrysu sítě TMSN jsou smyková napětí rovna nule, proto je TMSN protínají pod úhlem  $\pm 45^\circ$ , aby nevznikla při tažení na obrysu přístříhu smyková napětí, která způsobují vznik vln.

Výrobní výkres přístříhu levého krytu ventilátoru sestrojeného s využitím TMSN je v příloze A2.8 (výkres KMT-01-07).

### **3.4 Stanovení tvaru a velikosti přístříhu s využitím BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2**

Metoda konečných prvků (MKP) vzešla z potřeby řešení komplexních úloh statické mechaniky ve stavebním a leteckém inženýrství. Dnes se tato metoda stala jedním z hlavních výpočetních prostředků ve strojírenství.

Program DYNAFORM 5.2 je simulační nástroj na bázi MKP. Program zahrnuje např. simulaci tažení, simulaci s použitím přídržovače, výpočet přesného tvaru přístříhu a nástřihového plánu. Výhodou modelování je možnost nastavení mimořádně přesného simulačního nástroje. Problémy, které můžou provázet tváření daného výrobku, se pomocí programu odhalí ještě před tím, než se vyrobí drahé tvářecí nástroje. Tím se sníží náklady na čas, práci i materiál.

Simulační postup se skládá z několika bodů. V první řadě jde o načítání geometrie, dále o vytvoření sítí z dostupných křivek a povrchů, na které navazuje vytvoření souhlasných součástí – tažník. Rozvinutím vložené součásti se docílí vytvoření přístříhu, u kterého se následně vygeneruje rovnoměrná síť. Stanoví se vlastnosti taženého materiálu a pozice nástrojů (tažník, tažnice, přídržovač). Po nastavení všech parametrů se spustí samotný výpočet a následná simulace procesu tažení.

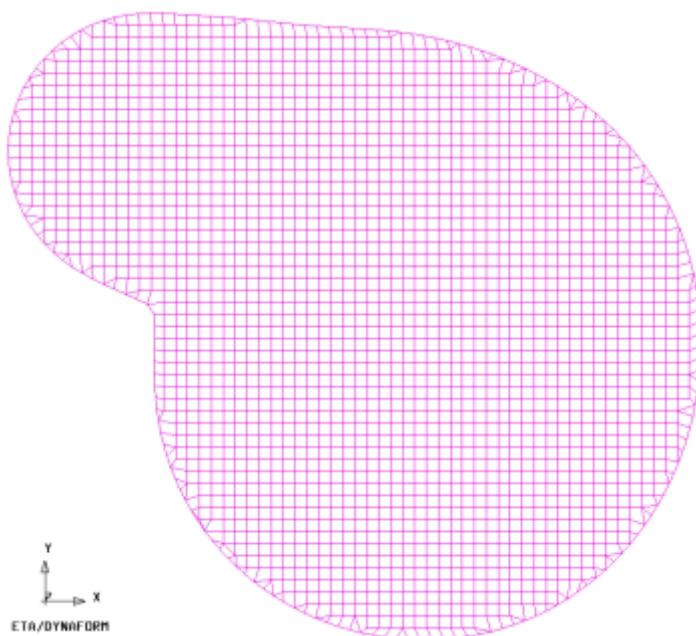
#### **3.4.1 Konstrukce přístříhu s využitím BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2**

Konstrukce přístříhu metodou využívající BSE modul byla provedena v programu DYNAFORM 5.2. Pro vygenerování přístříhu je nutné znát model konečného výtažku s přídávky na ostřížení (5 mm) a na přírubu (14 mm), který se do programu importuje. Je také možné importovat model výtažku bez přídávky na ostřížení a na přírubu a ty následně po vygenerování přístříhu připočítat. Pro vygenerování přístříhu byl použit model tažníku. Podle něj se v příkazu „BSE Preparation“ v nabídce „Blank Size Estimate“ vytvořila hraniční čára („Boundary Line“), která bude tvořit obrys přístříhu. V nabídce „Blank Size Estimate“ je také nutno zvolit materiál, z kterého bude vyroben budoucí přístřih a tloušťku plechu.

Zadané hodnoty: materiál DC04 (11 305.21),  
tloušťka plechu 0,9 mm.

Aby bylo možné s vytvořeným obrysem přístříhu dále pracovat, musí se vytvořit mřížka elementů. V příkazu „Tools“ byla vybrána nabídka „Blank Generator“, kde se vybere již vytvořená hraniční čára a dále se zvolí velikost mřížky elementů („RADII“). Na zvolené velikosti elementů závisí přesnost konečného výpočtu a tedy přesnost výsledků řešení. Proto se volí spíše větší počet menších elementů. Ovšem při zadávání velkého počtu elementů se musí počítat s tím, že čím víc elementů je na přístříhu, tím bude konečný výpočet trvat déle. Pro jemnější a kvalitnější síť byla zvolena hodnota „radii“ = 2. S takto připraveným přístřihem (obr. 3.2) je možno provádět simulaci procesu tažení.

Informativní výkres přístříhu levého krytu ventilátoru, stanoveného metodou s využitím BSE modulu, je v příloze A2.9 (výkres KMT-01-08). Rozměry přístříhu jsou pouze informativní, výkres totiž není kreslen v AutoCADu, byl sem importován ze softwaru Dynaform 5.2 a po importu nelze křivku obrysu přístříhu rozložit na jednotlivé části, které by bylo možné regulérně zakótovat. Nejedná se tedy o výrobní výkres přístříhu, příloha A2.9 pouze uvádí přibližné rozměry přístříhu.



Obr. 3.2 Model přístříhu vygenerovaného s využitím BSE modulu  
v programu DYNAFORM 5.2

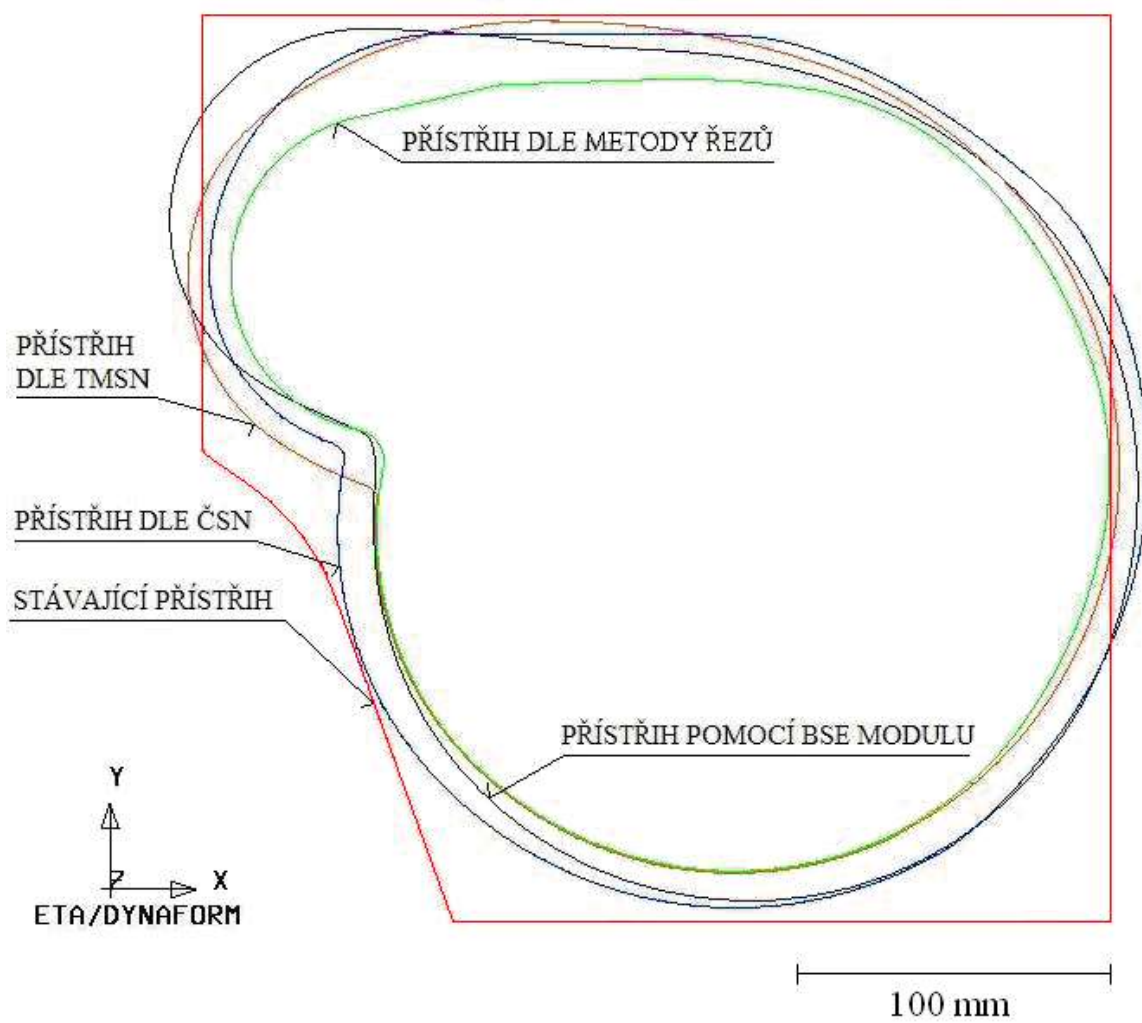
### 3.5 Porovnání přístřihů výtažku levého krytu ventilátoru

Grafické schematické porovnání stávajícího přístřihu s přístřihy stanovenými dle ČSN 22 73036, metodou řezů, metodou využívající TMSN a přístřihu sestrojeného s využitím BSE modulu je na obr. 3.3. Přístřihy rýsované v AutoCADu (přístřih dle ČSN, přístřih stanovený metodou řezů a přístřih stanovený metodou využívající TMSN) jsou porovnány na informativním výkrese v příloze A2.10 (KMT-01-09).

U stávajícího přístřihu je patrné, že jsou zde největší požadavky na materiál. Z ekonomického hlediska je tento přístřih nevýhodný. Po vytažení levého krytu ventilátoru zde zůstane velké množství materiálu vhodného pro odstřížení. Tento odstřížený zbytek nelze znovu použít pro jiné účely, protože vlivem procesu tažení plech změni své původní vlastnosti, místy může dojít ke zvlnění.

Přístřih stanovený dle ČSN 22 7303 má svoji plochu o 16,2 % menší než stávající přístřih, přístřih stanovený metodou řezů je o 30,5 % menší, přístřih vytvořený metodou využívající TMSN je o 22,5 % menší a přístřih stanovený s využitím BSE modulu v programu Dynaform je o 20,1 % menší než stávající přístřih. Z ekonomického hlediska se přístřih stanovený metodou řezů jeví jako nejlepší řešení pro tažení levého krytu ventilátoru, protože je zde největší úspora materiálu.

Stávající přístřih je pro výtažek nevhodný, protože navržené vybrání brání vtahování materiálu do kritického místa výtažku s poloměrem 12 mm. Proto zde při tažení dochází ke vzniku praskliny. Přístřihy stanovené dle ČSN, metodou řezů, TMSN a s využitím BSE modulu jsou pro výtažek vhodnějším řešením, jejich použití může vést ke snížení zmetkovitosti při výrobě levého krytu ventilátoru. Všechny přístřihy budou v dalších kapitolách podrobeny mnoha zkouškám, z nichž bude vyhodnoceno, který přístřih je pro výtažek levého krytu ventilátoru optimálním řešením.



Obr. 3.3 Schéma porovnání přístřihů

## **4 Alternativy materiálu vhodného pro levý kryt ventilátoru**

Levý kryt ventilátoru je tvarově náročný výrobek. Materiál pro takový výrobek musí být výborně tvářitelný, musí prokázat vynikající výsledky jak u základních a napodobujících zkoušek tvářitelnosti plechu, tak i u nekonvenčních kritérií hodnocení tvářitelnosti plechu. Při volbě plechu pro takto složitý výlisek je proto třeba vzít v úvahu technická i ekonomická kritéria.

Z technického hlediska musí plech zajistit spolehlivý průběh výroby výtažku, ale i požadované vlastnosti hotového výtažku. K tomu je třeba znát způsobnost plechu k hlubokému tažení. Také je dobré zajistit vyrobění výtažku požadovaných vlastností při určité rezervě tvářitelnosti. Zde se bere ohled na pravděpodobný rozptyl mechanických vlastností použitého materiálu a pravděpodobné odchylky od předepsaného pracovního postupu. Může se jednat o odchylky deformační rychlosti, kvality povrchu nástroje a způsobu mazání. Z ekonomického hlediska je výhodné navrhnout pro daný výrobek co nejlevnější plech, který zároveň uspokojí všechna technická hlediska.

K výrobě zadaného výtažku se používá ocel DC04 (11 305.21). Bylo již zjištěno (viz kap. 2), že tato ocel je vhodná pro tažení levého krytu ventilátoru, plechy z této oceli splňují požadavky na hlubokotažnost. Alternativa materiálu pro tento tvarově složitý výrobek musí být nejméně tak vyhovující jako stávající materiál.

Pro výrobu levého krytu ventilátoru byly zvoleny tyto další dva materiály:

- pásová ocel St 4 dle DIN 1624,
- pásová ocel IF-Stahl.

### **4.1 Pásová ocel St 4 dle DIN 1624**

Ocel St 4 podle DIN 1624 (Pásky z nízkouhlíkových nelegovaných ocelí válcovaných zastudena) představuje zvlášť hlubokotažnou jakost oceli. Pásky plechu jsou rekrystalizačně žilňány s následujícím lehkým doválcováním. Pás se pak dodává buď s mírně zaoblenými hranami nebo i s odstřiženými hranami.

Norma DIN 17 010 určuje technické dodací podmínky pro tuto ocel, mezní odchylky rozměrů jsou určeny DIN 1544. Pás může být dodán ve čtyřech jakostech a stavech povrchu, které se podle DIN 1624 označují GD (tmavě vyžíhaný), GBK (lesklý vyžíhaný), RP (bez trhlin a pórů) a RPG (leskle hlazený). Ocel St 4 je zaručeně svařitelná.

Pro rozbor chemického složení a mechanických vlastností byl v Autopalu Nový Jičín, spol. s r. o. vybrán svitek pásové oceli St 4 o rozměrech (0,9 × 280) mm. Svitek byl dodán německou firmou C. D. Wälzholz s rozměry a mezními úchytkami rozměrů dle DIN 1544 (tolerance tloušťky pásu ± 0,05 mm, tolerance šířky pásu + 0,8 – 0,0 mm). Identifikační označení dodávky – CDW komisionní číslo: 10871400/41001, CDW podniková zakázka: 40868691.

Ocel byla dodána v provedení LG dle DIN 1624 (lehce převálcována), s jakostí povrchu RP dle DIN 1624 (bez trhlin a pórů). U tohoto povrchu jsou přípustné jizvy, prohloubeniny, škrábance a póry jen v nepatrném rozsahu. Ocel byla dodána s okraji GK (odstřižené hrany).

#### **4.1.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli předepsané normou DIN 1624**

Předepsané chemické složení pro ocel St 4 dle DIN 1624 je uvedeno v tab. 4.1. Mechanické vlastnosti dle DIN 1624, které se u uklidněné oceli St 4 zaručují po dobu šesti měsíců od data odeslání plechů od výrobce ke spotřebiteli, jsou uvedeny v tab. 4.2.

Tab. 4.1 Předepsané chemické složení oceli St 4 dle DIN 1624

Označení oceli dle DIN	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]
St 4	max. 0,10	0,20 ÷ 0,45	0,03 ÷ 0,10	max. 0,030	max. 0,035

Tab. 4.2 Požadované mechanické vlastnosti oceli St 4 dle DIN 1624

Označení oceli dle DIN	Mez pevnosti $R_m$ napříč [MPa]	Tažnost $A_{80}$ napříč [%]	Prohloubení dle Erichsena $IE$ [mm] pro tl. plechu 0,9 mm
St 4	294 ÷ 392	min. 36	min. 10,6



Při zkoušce ohybem dle DIN 1605 bez trnu se musí v místě ohybu u plechu z oceli St 4 podle DIN 1624 docílit při ohybu napříč i podél směru válcování plechu úhel ohybu 180 ° bez vzniku prasklin v nejvíce namáhaných místech.

#### 4.1.2 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli uvedené v atestu

Svítek pásové oceli St 4 byl firmou C. D. Wälzholz zaslán s atestem o zkouškách č. 9794 podle DIN 50 049. Atest obsahoval údaje o chemickém složení (viz tab. 4.3), šírce a tloušťce pásu a mechanických vlastnostech (tab. 4.4).

Tab. 4.3 Chemické složení oceli St 4 uvedené v atestu č. 9794

Označení oceli	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	Al [hm. %]
St 4	0,060	0,320	0,010	0,018	0,008	0,032

Tab. 4.4 Rozměry a mechanické vlastnosti oceli St 4 uvedené v atestu č. 9794

Šířka pásu [mm]	Tloušťka pásu [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ napříč [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ napříč [MPa]	Tažnost $A_{80}$ napříč [%]
280,10	0,890	205	320	40,0

Při porovnání výsledků chemického složení zaneseného v atestu (tab. 4.3) a směrného chemického složení (tab. 4.1) je patrné, že dodaná pásová ocel St 4 má minimálně třikrát nižší obsah Si než je požadováno normou DIN 1624. Ostatním požadavkům na chemické složení pásová ocel vyhověla. Mechanické vlastnosti dle DIN 1624 (tab. 4.2) pásová ocel splňuje.

## 4.2 Pásová ocel IF-Stahl

Oceli bez intersticiálně uložených atomů (IF oceli) jsou takové, v nichž se C váže na Ti a vznikají karbidy titanu. Dosahuje se nejen vyšší tažnosti, ale výrobky vyrobené z těchto ocelí nepodléhají stárnutí. Potřeba IF ocelí roste, uplatňují se nejen jako za tepla a za studena válcované pásy bez další povrchové úpravy, ale též slouží jako pozinkované

pásky, vysokopevnostní oceli, zvukově izolační oceli apod. IF technologie se objevuje i u feritických ocelí. Jako základ pro další vývoj se ale také ukazuje, že je žádoucí, aby v ocelích byl na konci tváření stále ještě zbytkový C v roztoku, tím se dosahuje většího lesku galvanizovaných povlaků, objevuje se křehkost indukovaná hlubokým tažením a oceli jsou použitelné pro zpevnění vypalováním laku.

Pro rozbor chemického složení a mechanických vlastností byl v Autopalu Nový Jičín, spol. s r. o. vybrán svitek pásové oceli IF-Stahl (interstitial-free) o rozměrech (0,9 × 280) mm. Svitek byl dodán německou firmou C. D. Wälzholz s rozměry a mezními úchytkami rozměrů dle DIN 1544 (tolerance tloušťky pásu ± 0,05 mm, tolerance šířky pásu + 0,8 – 0,0 mm). Identifikační označení dodávky – CDW komisní číslo: 13351500/41001, CDW podniková zakázka: 44175091.

Ocel byla dodána v provedení LG dle DIN 1624 (lehce převálcována), se zdrsňelým stavem povrchu. Ocel byla dodána s okraji GK (odstřižené hrany).

#### **4.2.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli uvedené v atestu**

Se svitkem pásové oceli IF-Stahl byl firmou C. D. Wälzholz zaslán atest o zkouškách č. 33022 podle DIN 50 049. Atest obsahoval údaje o chemickém složení (viz tab. 4.5), sířce a tloušťce pásu a mechanických vlastnostech (tab. 4.6).

Tab. 4.5 Chemické složení oceli IF-Stahl uvedené v atestu č. 33022

Označení oceli	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	Al [hm. %]
IF-Stahl	0,004	0,190	0,090	0,012	0,009	0,042

Tab. 4.6 Rozměry a mechanické vlastnosti oceli IF-Stahl uvedené atestu č. 33022

Šířka pásu [mm]	Tloušťka pásu [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ napříč [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ napříč [MPa]	Tažnost $A_{80}$ napříč [%]
280,20	0,910	182	321	39,0

### 4.3 Experimentální vyhodnocení tvářitelnosti pásových ocelí St 4 a IF-Stahl

Zkouška tahem byla provedena v souladu s ČSN EN 10002-1. Z pásů vybraných plechů byly v Autopalu Nový Jičín, spol. s r. o. nastříhány zkušební vzorky – plechové tabulky orientované ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování. Odběr zkušebních vzorků byl proveden dle ČSN EN ISO 377. Tato norma stanovuje zásady odběru a zpracování zkušebních ocelových vzorků pro mechanické zkoušení. Takto připravené vzorky následně sloužily jako polotovary pro výrobu zkušebních těles – plochých zkušebních tyčí. Rozměry plochých zkušebních tyčí byly v souladu s ČSN EN 10002-1. Každá zkušební tyč byla označena číselným kódem. Počáteční měřená délka zkušební tyče  $L_0 = 80$  mm byla vyznačena ryskami s přesností 1 %. U každé zkušební tyče byla na třech místech změřena třmenovým mikrometrickým šroubem počáteční tloušťka tyče  $a_0$  a počáteční šířka tyče  $b_0$ .

Vyhodnocení mechanických vlastností (smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , pevnost v tahu  $R_m$ , tažnost  $A_{80}$ , kontrakce  $Z$ , maximální rovnoměrná deformace  $\varepsilon_r$  a konstanta pevnosti  $C$ ) bylo provedeno zkouškou jednoosým tahem dle ČSN EN 10002-1 v laboratoři Technického ústavu stavebního v Ostravě na zkušebním trhacím stroji INSTRON 1196 (typ 2511-320, výrobce Velká Británie).

#### 4.3.1 Mechanické vlastnosti ocelí

Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  byla zjištěna z tahového diagramu grafickou metodou dle ČSN EN 10002-1. Pro výpočet tažnosti  $A_{80}$  se po přetržení zkušební tyče posuvným měřítkem změřila její konečná délka  $L_k$ . Směrové hodnoty mechanických vlastností plechu byly vypočítány jako aritmetický průměr ze tří naměřených hodnot. Zjištěné hodnoty mechanických vlastností pásové oceli St 4 jsou uvedeny v tab. 4.7. Zjištěné hodnoty mechanických vlastností pásové oceli IF-Stahl jsou uvedeny v tab. 4.8.

Tab. 4.7 Zjištěné hodnoty mechanických vlastností pásové oceli St 4

Mechanické vlastnosti	Úhel vzhledem ke směru válcování			Střední hodnota
	0°	45°	90°	
$R_{p0,2}$ [MPa]	204,0	205,6	204,7	205,0
$R_m$ [MPa]	346,7	355,8	349,0	351,8
$R_{p0,2}/R_m$ [-]	0,588	0,578	0,587	0,583
$A_{80}$ [%]	36,6	39,3	36,9	38,0
$Z$ [%]	82,7	83,4	83,1	83,2
$\varepsilon_r$ [-]	0,267	0,283	0,268	0,275
$C$ [MPa]	528,9	543,5	529,2	536,3

Tab. 4.8 Zjištěné hodnoty mechanických vlastností pásové oceli IF-Stahl

Mechanické vlastnosti	Úhel vzhledem ke směru válcování			Střední hodnota
	0°	45°	90°	
$R_{p0,2}$ [MPa]	170,4	182,1	176,7	177,8
$R_m$ [MPa]	324,5	322,9	319,2	322,4
$R_{p0,2}/R_m$ [-]	0,525	0,564	0,553	0,552
$A_{80}$ [%]	41,3	40,0	39,3	40,2
$Z$ [%]	84,1	83,8	83,7	83,9
$\varepsilon_r$ [-]	0,312	0,303	0,286	0,301
$C$ [MPa]	512,6	497,7	493,0	500,3

Zkouška jednoosým tahem dle ČSN EN 10002-1 prokázala, že zjištěné mechanické vlastnosti zkušebních vzorků z oceli St 4 (tab. 4.7) spadají do oblastí směrných hodnot pro tuto ocel (tab. 4.2). Od hodnot mechanických vlastností udávaných v atestu (tab. 4.4) se zjištěné hodnoty mírně liší. Zjištěná hodnota meze pevnosti  $R_m$  je u oceli St 4 vyšší, než udává atest, ale naopak hodnota tažnosti  $A_{80}$  je v atestu vyšší, než bylo zjištěno zkouškou jednoosým tahem. Zjištěné hodnoty mechanických vlastností oceli IF-Stahl (tab. 4.8) se rovněž od hodnot mechanických vlastností z atestu mírně liší (tab. 4.6). U oceli IF-Stahl je zjištěná hodnota meze kluzu  $R_{p0,2}$  nižší, než udává atest, naopak zjištěná hodnota tažnosti  $A_{80}$  je vyšší než hodnota udaná v atestu.

### 4.3.2 Plošná anizotropie mechanických vlastností

Ze zjištěných směrových a středních hodnot mechanických vlastností (tab. 4.7 a tab. 4.8) ocelí St 4 a IF-Stahl byly podle rovnic (2.1) až (2.4) vypočítány hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechu. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.9. Pro úplnost popisu průběhu anizotropie plechu byly vypočítány hodnoty maximálních součinitelů plošné anizotropie dosažením maximální a minimální hodnoty ze středních směrových hodnot do rovnic (2.5) až (2.8). Hodnoty maximálních součinitelů jsou uvedeny v tab. 4.10.

Tab. 4.9 Hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechu

Součinitel plošné anizotropie	St 4	IF-Stahl
$PR_{p\ 45} \text{ [%]}$	0,78	6,87
$PR_{p\ 90} \text{ [%]}$	0,34	3,70
$PR_{m\ 45} \text{ [%]}$	2,62	-0,49
$PR_{m\ 90} \text{ [%]}$	0,66	-1,63
$P(R_p / R_m)_{45} \text{ [%]}$	-1,70	7,43
$P(R_p / R_m)_{90} \text{ [%]}$	-0,17	5,33
$PA_{45} \text{ [%]}$	7,38	-3,15
$PA_{90} \text{ [%]}$	0,82	-4,84

Tab. 4.10 Hodnoty maximálních součinitelů plošné anizotropie pásových ocelí

Maximální součinitel plošné anizotropie	St 4	IF-Stahl
$\max PR_p \text{ [%]}$	0,78	6,87
$\max PR_m \text{ [%]}$	2,62	1,66
$\max P(R_p / R_m) \text{ [%]}$	1,73	7,43
$\max PA_{80} \text{ [%]}$	7,38	5,09

Největší hodnotu plošné anizotropie vykazuje u pásové oceli St 4 tažnost  $A_{80}$ , a to jak u hodnot v různých směrech válcování, tak i u maximálních součinitelů plošné anizotropie. Pásová ocel IF-Stahl vykazuje u většiny součinitelů větší hodnoty než ocel St 4. Největší hodnotu jak u součinitelů v různých směrech válcování, tak u maximálních součinitelů plošné anizotropie, udává poměr meze kluzu a meze pevnosti  $R_m/R_{p0,2}$ .

### 4.3.3 Plastická anizotropie

Pro stanovení součinitelů plastické anizotropie vybraných ocelí byly využity výsledky z tahových zkoušek dle ČSN EN 10002-1. Počáteční šířka tyče  $b_0$  byla změřena na třech místech zkušební tyče s přesností 0,01 mm. Směrodatná počáteční šířka pak byla vypočtena jako aritmetický průměr z těchto tří měření.

Po zatěžování a následném odlehčení byla v ose zkoušené tyče změřena konečná délka  $L_k$  s přesností 0,01 mm. Směrodatná konečná šířka zkoušené tyče  $b_k$  byla vypočítána jako aritmetický průměr ze tří měření na tyči.

Hodnoty součinitelů plastické anizotropie byly vypočítány jako aritmetické průměry ze všech měření. Hodnoty součinitelů plastické anizotropie ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$  a stupně plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie  $\Delta r$  byly vypočítány dle vztahů (2.9) až (2.11). Zjištěné hodnoty všech těchto součinitelů pro oceli St 4 a IF-Stahl jsou uvedeny v tab. 4.11.

Tab. 4.11 Vypočítané hodnoty součinitelů plastické anizotropie, hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie, stupeň plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie

Pásová ocel	$r_0$ [-]	$r_{45}$ [-]	$r_{90}$ [-]	$\bar{r}$ [-]	$\Delta r$ [-]
St 4	1,32	1,49	1,86	1,54	0,10
IF-Stahl	1,88	2,36	2,95	2,39	0,05

Hodnoty plastické anizotropie pásové oceli IF-Stahl jsou u všech součinitelů vyšší, než je tomu u pásové oceli St 4. Rozhodující hodnotou pro zjištění vhodnosti plechu k hlubokému tažení je hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$ , která je u oceli IF-Stahl vyšší o 0,85.

### 4.3.4 Exponent deformačního zpevnění

Pro stanovení exponentů deformačního zpevnění plechu byly použity výsledky tahových zkoušek daných ocelí. Na každé tyči byla ryskami s přesností 1 % vyznačena počáteční délka  $L_0 = 80$  mm. Počáteční šířka tyče  $b_0$  byla na třech místech zkušební tyče změřena s přesností 0,01 mm. Směrodatná počáteční šířka tyče pak byla vypočítána jako aritmetický průměr z těchto tří měření. U zkušebních tyčí se provedla zkouška jednoosým tahem podle ČSN EN 10002-1, kde zatěžování trvalo tak dlouho, dokud nedošlo k přetržení tyče.

Metoda měření dle ČSN ISO 10275 používá zkušební tyče neodstupňované. Jako kritérium tváritelnosti plechu se používá průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$ .

Hodnoty exponentů deformačního zpevnění ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  a stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$  byly vypočítány dle vztahů (2.13) až (2.15). Vypočítané hodnoty všech exponentů pro zkoušené oceli jsou uvedeny v tab. 4.12.

Tab. 4.12 Hodnoty exponentů deformačního zpevnění  $n_0$ ,  $n_{45}$ ,  $n_{90}$ , průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$ , stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$

Pásová ocel	$n_0$ [-]	$n_{45}$ [-]	$n_{90}$ [-]	$n_m$ [-]	$\Delta n$ [-]
St 4	0,157	0,159	0,157	0,158	-0,002
IF-Stahl	0,184	0,167	0,171	0,172	0,011

Hodnoty exponentů deformačního zpevnění pásových ocelí se liší jen málo, ocel IF-Stahl vykazuje hodnoty vyšší než ocel St 4. Z hlediska posouzení vhodnosti plechu k hlubokému tažení jsou tyto hodnoty exponentů deformačních zpevnění nízké.

### 4.3.5 Index tvářitelnosti a Liletův diagram

Pro klasifikaci plechů lze jako kritérium tvářitelnost využít index tvářitelnosti  $I$ . Čím je hodnota indexu tvářitelnosti vyšší, tím je plech vhodnější k hlubokému tažení. Dle vzorce  $I = r_{x\min} \cdot n_m \cdot 1000$ , kde  $r_{x\min}$  je minimální hodnota součinitele plastické anizotropie z hodnot  $r_0, r_{45}, r_{90}$ , byl vypočítán index tvářitelnosti pro oceli St 4 a IF-Stahl. Bylo použito vypočítaných hodnot plastické anizotropie a exponentu deformačního zpevnění. Vypočítané hodnoty indexu tvářitelnosti jsou v tab. 4.13.

Tab. 4.13 Index tvářitelnosti pásových ocelí

Pásová ocel	$r_{x\min}$ [-]	$n_m$ [-]	$I$ [-]
St 4	1,32	0,158	208,56
IF-Stahl	1,88	0,172	323,36

Dle diagramu hodnocení vhodnosti plechů k hlubokému tažení podle  $r_{x\min}$  a exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  podle Lileta [2] byla ocel St 4 i ocel IF-Stahl zařazena do skupiny II – ocelové plechy vhodné pro tažné operace, u kterých je dominující tlak.



## 5 Porovnání a zhodnocení experimentálně stanovených vlastností pásových ocelí DC04, St 4 a IF-Stahl

Ocel DC04 (11 305.21) a její vlastnosti byly podrobně zkoumány v kapitole 2, vlastnosti ocelí St 4 a IF-Stahl jsou podrobně uvedeny v kapitole 4. Tato kapitola má za úkol porovnat vlastnosti všech ocelí, posoudit je z hlediska tvářitelnosti a určit tu nejvhodnější ocel pro hluboké tažení nepravidelného výtažku.

### 5.1 Chemické složení

Požadovaná chemická složení ocelí a zjištěná chemická složení všech zkoumaných ocelí jsou shrnuta a vzájemně porovnána v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Srovnání chemického složení požadovaného normou a zjištěného chemického složení dle zkoušek a dle hodnot udávaných atestu

Prvek	Požadavky norem		Zjištěné chemické složení		
	ČSN 41 1305 na DC04	DIN 1624 na St 4	DC04	St 4	IF-Stahl
C [hm. %]	max. 0,07	max. 0,10	0,061	0,060	0,004
Mn [hm. %]	max. 0,40	0,20 ÷ 0,45	0,270	0,320	0,190
Si [hm. %]	max. 0,03	0,03 ÷ 0,10	0,010	0,010	0,090
P [hm. %]	max. 0,025	max. 0,030	0,018	0,018	0,012
S [hm. %]	max. 0,025	max. 0,035	0,019	0,008	0,009
Al [hm. %]	min. 0,025	-	0,018	0,032	0,042
N	musí být vázaný	-	-	-	-

Z uvedeného srovnání (tab. 5.1) vyplývá, že oceli až na malé výjimky splňují požadavky na chemické složení dané normou.

U oceli DC04 je obsah Al nižší, než je požadované minimum normou ČSN 41 1305. Ocel St 4 obsahuje pouze 0,010 % Si, což neodpovídá požadovanému rozmezí v normě - obsah Si je třikrát nižší než je minimální hranice požadovaného rozmezí normou DIN 1624.

Ocel IF-Stahl má výrazně vyšší obsah Si než ostatní oceli, což ale nelze považovat za výhodu, protože křemík zpevňuje materiál a zhoršuje mechanické vlastnosti oceli. Vyšší obsah křemíku tedy způsobuje nižší tvářitelnost oceli. Na druhou stranu tato ocel obsahuje velmi malé množství uhlíku, což má na tvářitelnost kladný vliv. Všechny zkoumané oceli jsou nízkouhlíkové, ale obsah C je u oceli IF-Stahl dokonce 15x menší než u ostatních dvou ocelí, takže lze předpokládat, že tato pásová ocel bude mít velmi dobrou tvářitelnost.

Prvky S a P lze v hlubokotažných ocelích považovat za škodlivé. U všech ocelí vyhovují požadavkům stanovených normou a od sebe se liší pouze nepatrně.

## 5.2 Mechanické vlastnosti

### 5.2.1 Mez kluzu v tahu

Požadované hodnoty meze kluzu v tahu a hodnoty zjištěné jsou pro všechny zkoumané oceli shrnuty v tab. 5.2. Z porovnání s požadavky kladenými na ocel DC04 normou ČSN 41 1305 (kap. 2.1.3, tab. 2.4), na ocel St 4 normou DIN 1624 (kap. 4.1.1, tab. 4.2) a atestem (kap. 4.1.2, tab. 4.4) a na ocel IF-Stahl atestem (kap. 4.2.1, tab. 4.6) vyplývá, že všechny pásové oceli těmto požadavkům vyhovují.

Tab. 5.2 Hodnoty meze kluzu v tahu

Pásová ocel	Požadavky na $R_{p0,2}$ napříč [MPa]		$R_{p0,2}$ napříč [MPa]	Střední hodnota $R_{p0,2}$ [MPa]
DC04	ČSN 41 1305	max. 215	202,6	205,5
St 4	atest č. 9794	205	204,7	205,0
IF-Stahl	atest č. 33022	182	176,7	177,8

Všechny zkoumané oceli nevykázaly výraznou mez kluzu, což svědčí o správně provedeném převálcování ocelí při jejich výrobě. Proto byly stanoveny smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ . U každé zkoumané oceli se její hodnota meze kluzu napříč a střední hodnota meze kluzu liší jen málo. Všechny oceli splnily požadavky na ně kladené.

Norma ČSN 41 1305 ukládá oceli DC04 maximální hodnotu meze kluzu v tahu napříč 215 MPa, což ocel s rezervou splňuje.

Hodnota meze kluzu pro ocel St 4 není v DIN 1624 stanovena. V atestu č. 9794 podle DIN 50 049, zaslaným spolu s pásovou ocelí firmou C. D. Wälzholz, je uvedena mez kluzu v tahu 205 MPa. Z porovnání hodnoty z atestu a zjištěné hodnoty meze kluzu je zřejmé, že se liší jen nepatrně.

V atestu č. 33022 podle DIN 50 049, zaslaným spolu s pásovou ocelí firmou C. D. Wälzholz, je pro ocel IF-Stahl uvedena mez kluzu v tahu 182 MPa. V porovnání s hodnotami zjištěnými se liší minimálně.

Nejlépe tvářitelné jsou oceli s nejnižšími středními hodnotami meze kluzu, což dle tab. 5.2 ukazuje na ocel IF-Stahl, poté na St 4 a DC04, u kterých se střední hodnota meze kluzu navzájem liší jen o 0,5 MPa.

### 5.2.2 Mez pevnosti v tahu

Požadované hodnoty a experimentálně stanovené hodnoty meze pevnosti v tahu u všech zkoumaných pásových ocelí jsou uvedeny v tab. 5.3. Z porovnání vyplývá, že všechny pásové oceli vyhovují na ně kladeným požadavkům.

Tab. 5.3 Hodnoty meze pevnosti v tahu

Pásová ocel	Požadavky na $R_m$ [MPa]		$R_m$ napříč [MPa]	Střední hodnota $R_m$ [MPa]
DC04	ČSN 41 1305	290 ÷ 360	318,6	332,2
St 4	DIN 1624	294 ÷ 392	349,0	351,8
	atest č. 9794	320		
IF-Stahl	atest č. 33022	321	319,2	322,4

Ocel DC04 vyhověla hodnotám požadovaným v normě ČSN 41 1305. Také zjištěná mez pevnosti v tahu pásové oceli St 4 vyhověla normě DIN 1624. Hodnota zjištěná se od hodnoty uvedené v atestu liší o méně než o devět procent. Hodnota z atestu u pásové oceli IF-Stahl se od hodnoty meze pevnosti v tahu zjištěné experimentálně liší o méně než jedno procento.

### 5.2.3 Poměr meze kluzu v tahu k mezi pevnosti v tahu

Střední hodnota poměru meze kluzu v tahu k mezi pevnosti v tahu vyjadřuje zjednodušeně zásobu plasticity jednotlivých materiálů při tváření za studena. Čím vyšší je hodnota tohoto poměru, tím větší celkovou deformaci snese daná ocel při tváření. Jednotlivé střední hodnoty poměru pro zkoumané oceli jsou uvedeny v tab. 5.4.

Je vhodné, aby byl poměr v rozmezí  $0,6 < R_{p0,2}/R_m < 0,8$ . Jestliže je hodnota poměru v tomto rozmezí, mají ocelové plechy dobrou tvářitelnost. Velmi dobrou tvářitelnost mají plechy při hodnotě nižší než 0,60 a nízkou při hodnotě vyšší než 0,80.

Tab. 5.4 Střední hodnoty poměru meze kluzu v tahu k mezi pevnosti v tahu

Pásová ocel	Střední hodnota $R_{p0,2}/R_m$ [-]	Tvářitelnost
DC04	0,619	dobrá
St 4	0,583	velmi dobrá
IF-Stahl	0,552	velmi dobrá

### 5.2.4 Tažnost

Požadované hodnoty a experimentálně stanovené hodnoty tažnosti u všech zkoumaných ocelí jsou uvedeny v tab. 5.5. Čím je hodnota tažnosti vyšší, tím více je materiál plastický a tvářitelný.

Tab. 5.5 Hodnoty tažnosti

Pásová ocel	Požadavky na $A_{80}$ [%]		$A_{80}$ napříč [%]	Střední hodnota $A_{80}$ [%]
DC04	ČSN 41 1305	min. 36	29,40	30,30
St 4	DIN 1624	min. 36	36,9	38,0
	atest č. 9794	40,0		
IF-Stahl	atest č. 33022	39,0	39,3	40,2

Z výsledků shrnutých v tab. 5.5 je zřejmé, že ocel DC04 nevyhověla tažnosti stanovené v normě ČSN 41 1305. Experimentálně zjištěná tažnost je minimálně o 16 % nižší než tato norma udává.

Ocel St 4 vyhověla požadavku na ni kladeným normou DIN 1624, kde je minimální tažnost udána jako u ČSN 41 1305, a to 36 %. Ocel IF-Stahl také vyhověla požadavku na tažnost udávanou v atestu.

### **5.3 Plošná anizotropie mechanických vlastností**

Zjištěné hodnoty součinitelů plošné anizotropie meze v kluzu v tahu, meze pevnosti v tahu a tažnosti jsou pro ocel DC04 uvedeny v tab. 2.8 a pro oceli St 4 a IF-Stahl jsou uvedeny v tab. 4.9. Aby bylo možno oceli dostatečně posoudit z hlediska tvářitelnosti, byly stanoveny maximální hodnoty součinitelů plošné anizotropie, které jsou pro ocel DC04 uvedeny v tab. 2.9 a pro oceli St 4 a IF-Stahl v tab. 4.10.

Z tabulek je zřejmé, že hodnoty součinitelů plošné anizotropie se u jednotlivých ocelí velmi liší. Liší se také hodnoty součinitelů u jednotlivých mechanických vlastností ocelí. Největší hodnotu plošné anizotropie ale u všech ocelí vykazuje tažnost  $A_{80}$ . Nejmenší hodnota plošné anizotropie se u jednotlivých ocelí liší, u oceli DC04 je to plošná anizotropie meze kluzu a poměru meze kluzu v tahu k mezi pevnosti v tahu. U pásové oceli St 4 je nejmenší hodnotou součinitel plošné anizotropie meze kluzu v tahu a u oceli IF-Stahl součinitel plošné anizotropie meze pevnosti v tahu.

Vliv plošné anizotropie lze považovat za záporný, neboť při hlubokém tažení způsobuje vznik cípů na vnějším okraji výtažků nebo na přírubě. Plošná anizotropie také zvětšuje rozměrové odchylky výtažků vzhledem k požadovanému tvaru. Proto jsou k hlubokému tažení z hlediska tvářitelnosti nejvhodnější takové oceli, které vykazují nejnižší hodnoty součinitelů plošné anizotropie.

Nejnižší hodnoty koeficientů plošné anizotropie vykazují pásové oceli St 4 a IF-Stahl, méně příznivé hodnoty vykazuje pásová ocel DC04.

### **5.4 Plastická anizotropie**

Zjištěné hodnoty součinitelů plastické anizotropie (hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie a stupeň plošné anizotropie součinitele plastické

anizotropie) a zatřídění do skupin tvářitelnosti je pro všechny zkoumané oceli uvedeno v tab. 5.6.

Jako kritérium tvářitelnosti plechu se používá hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$ . Čím je tato hodnota vyšší, tím je plech odolnější proti ztenčování a tedy vhodnější k hlubokému tažení. K posouzení tvářitelnosti plechu a jeho zatřídění do skupin tvářitelnosti lze použít Shawkiho zatřídění (kap. 2.3.2).

Dle součinitele  $\Delta r$  se hodnotí cípovitost výtažků. Čím je tato hodnota nižší, tím je plech vhodnější k hlubokému tažení. U všech zkoumaných pásových ocelí je hodnota  $\Delta r > 0$ , cípy se tedy při hlubokém tažení budou tvořit ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu (tab. 5.6).

Tab. 5.6 Hodnoty součinitelů plastické anizotropie

Pásová ocel	$\bar{r}$ [-]	Tvářitelnost	$\Delta r$ [-]	Směr tvorby cípů
DC04	1,76	vynikající	0,725	$0^\circ$ a $90^\circ$
St 4	1,54	dobrá	0,10	$0^\circ$ a $90^\circ$
IF-Stahl	2,39	vynikající	0,05	$0^\circ$ a $90^\circ$

## 5.5 Exponent deformačního zpevnění

Experimentálně stanovené hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  všech zkoumaných ocelí jsou uvedeny v tab. 5.7.

Hodnota  $n_m$  se používá jako kritérium tvářitelnosti plechu. Čím je tato hodnota vyšší, tím je plech vhodnější pro případy hlubokého tažení. Každá zkoumaná pásová ocel byla na základě hodnoty  $n_m$  zařazena do jedné ze skupin tvářitelnosti dle L. Polláka (kap. 2.3.3).

Tab. 5.7 Hodnoty součinitelů plastické anizotropie

Pásová ocel	$n_m$ [-]	Tvářitelnost
DC04	0,213	nízká
St 4	0,158	nízká
IF-Stahl	0,172	nízká

Hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  jsou velmi nízké, tomu také odpovídá zařazení ocelí do skupiny nízké tvářitelnosti. Hodnoty  $n_m$  byly vypočítány metodou dle ČSN ISO 10275, která je méně přesná než metoda užívající maximální rovnoměrné prodloužení. Je možné, že výpočet exponentu deformačního zpevnění metodou užívající maximální rovnoměrné prodloužení by podal přesnější výsledky a pro posuzování hlubokotažných plechů by byl vhodnější.

## 5.6 Index tvářitelnosti a Liletův diagram

Pro klasifikaci všech pásových ocelí byl jako kritérium tvářitelnost využit index tvářitelnosti  $I$ . Čím je hodnota indexu tvářitelnosti vyšší, tím je plech vhodnější k hlubokému tažení. Vypočítané hodnoty indexu tvářitelnosti pro jednotlivé oceli jsou shrnuty v tab. 5.8.

Tab. 5.8 Index tvářitelnosti pásových ocelí

Pásová ocel	$I$ [-]
DC04	298,20
St 4	208,56
IF-Stahl	323,36

Dle tohoto kritéria tvářitelnosti je pásová ocel IF-Stahl nejvhodnější pro hluboké tažení, vykazuje největší hodnotu indexu tvářitelnosti  $I$ . Dle diagramu hodnocení vhodnosti plechů k hlubokému tažení podle  $r_{x\min}$  a exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  podle Lileta [2] byly všechny zkoumané oceli (DC04, St 4, IF-Stahl) zařazeny do skupiny II – ocelové plechy vhodné pro tažné operace, u kterých je dominující tlak.

## 5.7 Ocel vhodná pro levý kryt ventilátoru

Tvarový výtažek levého krytu ventilátoru je vyráběn z oceli DC04 (11 305.21). Tato ocel je pro hluboké tažení složitých výrobků vhodná, vykazovala v mnoha kritériích příznivou tvářitelnost (viz kap. 2, kap. 5). Z porovnání vlastností pásových ocelí je zřejmé, že i další dvě navržené oceli (St 4, IF-Stahl) jsou pro hluboké tažení složitých výrobků vhodné.

Z hlediska chemického složení je pro tváření nejvhodnější ocel IF-Stahl, má velmi nízký obsah uhlíku, což má na tvářitelnost kladný vliv. Více se ale chemická složení ocelí výrazně neliší (tab. 5.1). Mechanické vlastnosti zkoumaných ocelí se od sebe také výrazně neliší, ovšem jsou zde malé rozdíly (tab. 5.2). Z hlediska meze kluzu v tahu je k hlubokému tažení nejvhodnější ocel IF-Stahl, vykazuje nejmenší střední hodnotu meze kluzu. Mez pevnosti v tahu je u oceli DC04 a IF-Stahl téměř stejná, ocel St 4 má tuto hodnotu vyšší (tab. 5.3). Z hlediska porovnání poměrů meze kluzu v tahu k mezi pevnosti v tahu má ocel DC04 dobrou tvářitelnost, ovšem oceli St 4 a IF-Stahl mají tvářitelnost vynikající (tab. 5.4). U hodnocení tažnosti bylo zjištěno, že pásová ocel 11 305.21 nevyhověla požadavkům normy ČSN 41 1305, její tažnost je nedostačující. Oceli St 4 a IF-Stahl vykazují vyšší hodnoty tažnosti, tudíž jsou pro hluboké tažení výtažků vhodnější (tab. 5.5).

Při posuzování tvářitelnosti z hlediska plošné anizotropie mechanických vlastností bylo zjištěno, že nejnižší, a tedy nejpříznivější hodnoty plošné anizotropie vykazují oceli St 4 a IF-Stahl (tab. 4.9, tab.4.10). Tyto pásové oceli jsou proto z tohoto hlediska vhodnější pro tažení hlubokých tvarových výtažků než stávající ocel DC04 (tab. 2.8, tab. 2.9). Hodnoty součinitelů plastické anizotropie se u jednotlivých ocelí liší. Dle kritéria tvářitelnosti – váženého průměru součinitele plastické anizotropie, byla zjištěna vynikající tvářitelnost ocelí DC04 a IF-Stahl. Ocel St 4 vykazuje dobrou tvářitelnost (tab. 5.6). Dle součinitele  $\Delta r$  bylo zjištěno, že cípy se u výtažků vyrobených ze všech zkoumaných ocelí budou tvořit ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování (tab. 5.6). Dle hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění byly všechny zkoumané oceli zařazeny do skupiny nízké tvářitelnosti (tab. 5.7). Nízké hodnoty exponentů však mohou být ovlivněny nevhodně zvolenou metodou výpočtu (metoda dle ČSN ISO 10275).

Z hlediska indexu tvářitelnosti je pro hluboké tažení nejvhodnější pásová ocel IF-Stahl, protože vykazuje největší hodnotu indexu tvářitelnosti (tab. 5.8). Dále v pořadí se pak nachází ocel DC04 a nejmenší hodnotu indexu tvářitelnosti vykazuje ocel St 4 (tab. 7.8). Všechny zkoumané oceli pak byly dle Liletova diagramu zařazeny do skupiny II – ocelové plechy vhodné pro tažné operace, u kterých je dominující tlak (5.6).

Po celkovém shrnutí lze konstatovat, že pásová ocel IF-Stahl má nejpříznivější vlastnosti z hlediska tvářitelnosti. Ovšem pásové oceli DC04 a St 4 jsou z hlediska tvářitelnosti taktéž vhodné pro hluboké tažení.



## **6 Výpočet a simulace procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru s využitím software**

Stále více se ve všech odvětvích strojírenské výroby využívá počítačů a simulačního softwaru. V oboru tváření existuje mnoho programů na bázi metody konečných prvků. Využití počítačů k simulaci tvářecího procesu nalezneme jak v objemovém tváření (SuperForge, QForm, SuperForm, aj.), tak i při tváření plechů (Dynaform, AutoForm). Nespornou výhodou simulace je fakt, že lze nastavit a ozkoušet různé parametry tvářecích nástrojů pro různé typy výrobků, aniž by se musel zhotovit drahý prototyp, který je pro firmu finančně, ale také časově náročný.

K simulaci procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru byl použit program DYNIFORM 5.2, vyvinutý v americké společnosti Engineering Technology Associates, Inc. (ETA). Možnosti tohoto programu jsou obdobné možnostem Pam-Stamp<sup>TM</sup> a AutoForm. Dynaform představuje simulaci hlubokého tažení plechů s možností nastavení a ověření návrhu tvářecích nástrojů. Obsahuje CAD translátory pro většinu CAD softwarů, mezi podporované programy patří např. CATIA V4, CATIA V5, SolidWorks, STEP, PRO/E, ParaSolid aj. Dynaform se skládá z několika modulů, které slouží pro tvorbu a úpravu importovaných modelů. Pro úpravu modelů před vlastním výpočtem lze použít modul „Preprocess“, který nabízí např. tvorbu ploch, generování elementů a jejich kontrolu (spojitost, orientace elementů atd.), pro návrh a tvorbu nástrojů je zde „DFE modul“, pro stanovení tvaru přístříhu a návrhu nástřihového plánu se použije „BSE modul“. Uložená data s příponou df vytvořená pomocí těchto modulů se poté zpracovávají v řešiči (Solver LS DYNA). Pro výslednou simulaci je používán ETA/Post-Processor, kde si uživatel zvolí, zda chce přehrát simulaci celého procesu tažení a podívat se na jednotlivé kroky simulace nebo si prohlédnout jen konečný tvar výtažku. ETA/Post-Processor dokáže výslednou simulaci uložit do souboru e3d. Tento soubor je pak možno přehrát v přehrávači Dynaformu ETA3DPlayer.

Simulace procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru byla provedena pomocí softwaru DYNIFORM 5.2 na katedře mechanické technologie 345, Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava na počítači s operačním systémem Windows XP.

## 6.1 Tvorba nástrojů v programu DYNAFORM 5.2

Pro simulaci v Dynaformu je třeba vytvořit model výtažku, který bude použit pro tvorbu nástrojů (tažník, tažnice, přídržovač). Také se musí stanovit a respektovat všechny okrajové podmínky jako tvar a rozměr přístřihu, pohyb a dráha nástrojů, síla přídržovače, rychlost tažníku, materiálové vlastnosti plechu a koeficient tření.

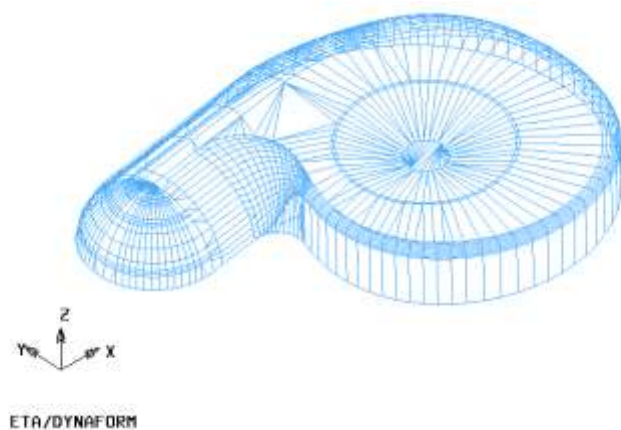
Nejdříve byl vytvořen model výtažku obsahující přírubu, poloměr zaoblení a vlastní tvar v CAD programu CATIA. Tento model byl uložen jako soubor iges a poté importován do programu Dynaform. Model obsahoval pouze čáry („lines“) a povrchy („surfaces“). Sít elementů („elements“), která je potřebná pro výpočet, se musela vytvořit v Dynaformu. Aby bylo možno na součásti pracovat, musí být zapnuta v režimu ON a „Current Part“ (aktuální součást).

Model vytvořený v CATIA měl stanovenou určitou tloušťku, ale Dynaform pro svůj výpočet potřebuje model, který tvoří plocha s nulovou tloušťkou. Proto byly přebytné čáry a povrchy tvořící tloušťku vymazány. U importovaného modelu se musely vytvořit elementy. Cest k vytvoření sítě elementů je více. Možností je v modulu „Preprocess“ vybrat záložku „Element“ a v té „Surface Mesh“. Objeví se nabídka tří různých způsobů meshování a tvaru elementů. Na výběr je „Tool Mesh“, „Part Mesh“ a „Triangle Mesh“. Pro namřížkování nástrojů byl vybrán styl „Tool Mesh, Connected“ (spojí přilehlé plochy, jestliže jsou mezery mezi nimi v toleranci). V nabídnutém okně se také volí velikost elementů (10). V nabídce parametrů budoucí sítě („Parameters“) se dále volí: „Max. Size“, „Min. Size“ (maximální a minimální velikost elementů), „Chordal Deviation“ (tětivová odchylka) – řídí počet elementů podél čáry/povrchu zakřivení, „Angle“ (hrana) – řídí hlavní čáru, „Gap Tol.“ (tolerance mezer) – řídí, zda jsou dvě přilehlé povrchy elementů spojeny. Poté už se jen vybere součást, která má být meshována a výběr se potvrdí. Velikost elementů nástrojů má vliv na konečný tvar výtažku, ne však na přesnost výsledků řešení.

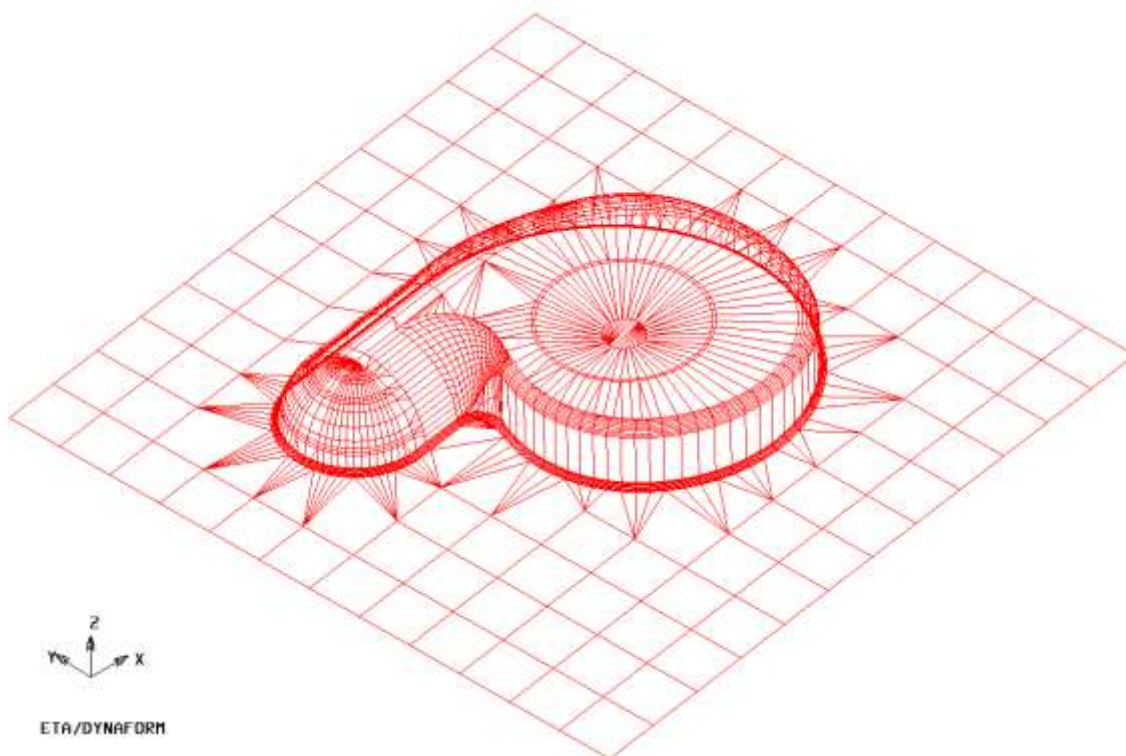
Upravený model byl pojmenován Die, protože bude při výpočtu představovat tažnici (obr. 6.2). Z modelu tažnice byla v modulu „Preprocess“ vytvořena kopie zmenšená o tloušťku materiálu 0,9 mm a o přídavek 10 %. Toto zmenšení kopie výtažku představuje volbu tažné mezery (dle přibližného výpočtu  $1,1 \cdot s$ , kde  $s$  je tloušťka taženého plechu).

Celkové zmenšení modelu tedy bylo o 0,99 mm. Kopie byla rozdělena na tažník a přídržovač a pojmenována Punch (tažník, obr. 6.1) a Binder (přídržovač, obr. 6.3).

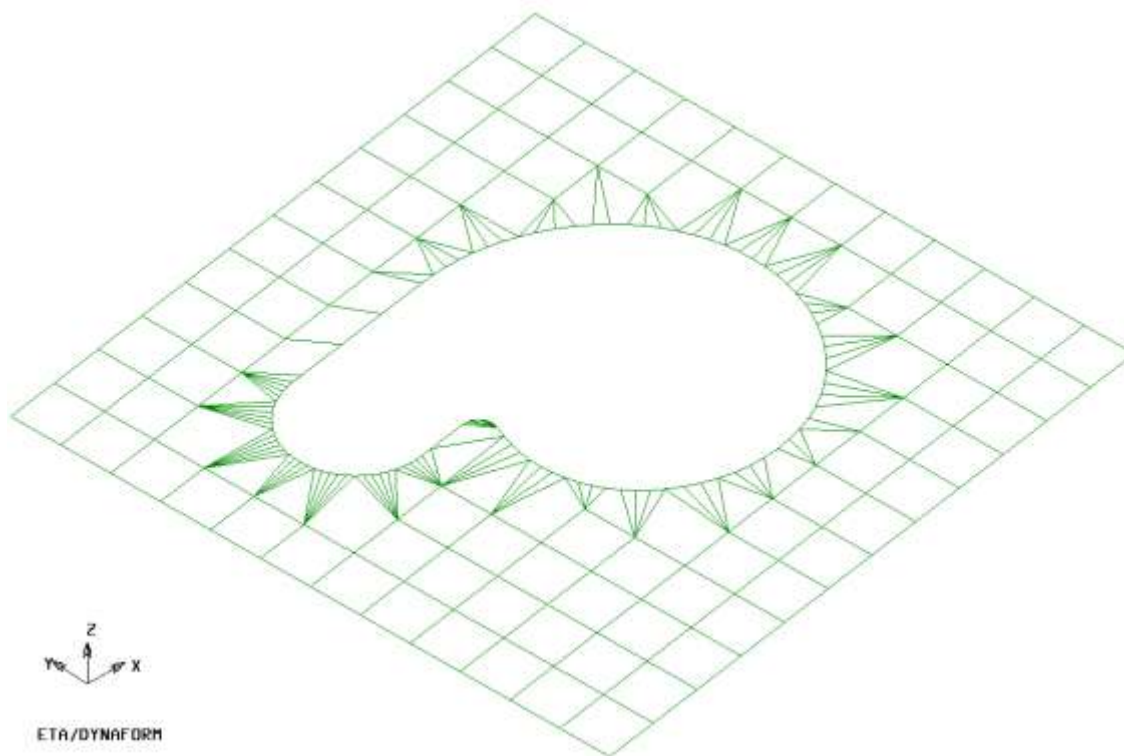
Na všech nástrojích byla provedena kontrola směru normál jednotlivých elementů („Auto Plate Normal“), které musí mít u všech elementů stejný směr, kontrola překrývajících se elementů („Overlap Element“) a kontrola spojitosti hraničních čar sítě („Display Model Boundary“). Všechny tyto možnosti kontroly se nacházející v nabídce „Model Check“ v modulu „Preprocess“. Vytvořené nástroje tažníku, přídržovače a tažnice byly uloženy do souboru df.



Obr. 6.1 Síť elementů tažníku pro tažení levého krytu ventilátoru



Obr. 6.2 Síť elementů tažnice pro tažení levého krytu ventilátoru



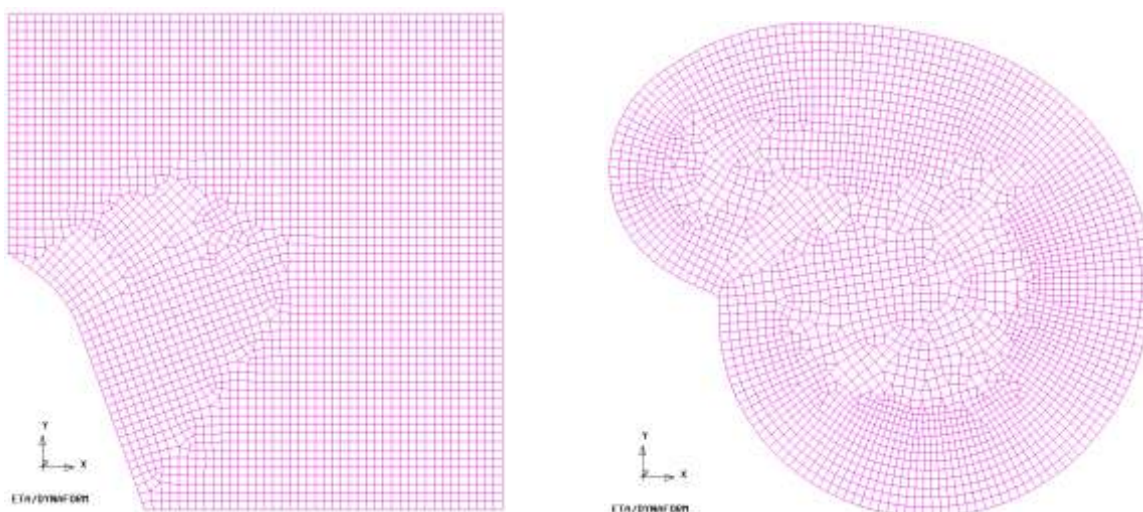
Obr. 6.3 Síť elementů přídržovače pro tažení levého krytu ventilátoru

## 6.2 Úprava přístřihů v programu DYNAFORM 5.2

Model přístřihu byl také vytvořen v CAD programu CATIA jako soubor iges a následně importován do Dynaformu. Protože byly všechny modely přístřihů i model výtažku, ze kterého se v Dynaformu vytvořily nástroje, modelovány ve stejném programu (CATIA), byl u všech zvolen stejný počátek souřadnic. Je to výhodné pro vkládání modelů do Dynaformu, přístřihy se nemusí složitě střídit a posouvat.

Každý model přístřihu byl vytvořen pouze z čar („lines“) a povrchů („surfaces“) a měl určitou tloušťku. Je potřeba počítat s přístřihem, který tvoří plocha s nulovou tloušťkou, proto byly přebytečné čáry a povrchy tvořící tloušťku vymazány. Síť elementů poté byla vytvořena v modulu „Preprocess“ v záložce „Element“. Velikost elementů byla zvolena 5. U přístřihů se tato velikost volí co nejmenší, protože má vliv na přesnost a kvalitu výpočtu. Výpočet v Dynaformu probíhá pouze z elementů, proto velikost ovlivní i dobu výpočtu. Nakonec byla na vytvořené mřížce elementů provedena kontrola směru normál jednotlivých elementů („Auto Plate Normal“), kontrola překrývajících se elementů

(„Overlap Element“) a spojitosti sítě („Display Model Boundary“). Všechny modely přístřihů byly po úpravě pojmenovány jako Blank.



Obr. 6.4 Síť elementů modelů přístřihů vytvořená použitím funkce „Part Mesh“ a nastavení velikosti elementů 5 (vlevo – model stávajícího přístřihu, vpravo – model přístřihu vytvořeného metodou využívající TMSN)

### 6.3 Definování okrajových podmínek v programu DYNAFORM 5.2

K simulaci procesu tažení je nutné mít vytvořeny nástroje a také se musí definovat všechny potřebné okrajové podmínky, bez kterých simulaci nelze provést. Mezi tyto podmínky patří např. materiál přístřihů, tvar a rozměr přístřihu, dráha nástrojů, síla přidržovače, rychlost tažníku a koeficient tření.

Po načtení souboru df s připravenými nástroji a přidání souboru iges s přístřihem se nejprve musely nastavit základní parametry, ve kterých bude výpočet probíhat. Ty se nastavují v nabídce „Analysis Setup“, kterou lze najít v modulu „Tools“.

Nastavené parametry v nabídce „Analysis Setup“:

Jednotky („Units“):	MM, TON, SEC, N
Typ tažení („Draw type“):	Double Action
Kontaktní plocha („Contact Interface“):	Form One Way S. to S. (povrch nástrojů)
Směr zdvihu („Stroke Direction“):	Z
Tažná mezera („Contact Gap“):	0,99 mm

Typ tažení „Double Action“ byl zvolen, protože při typu „Single Action“ se vytvoří opačný tah, to znamená, že místo tažníku by se pohybovala tažnice a přidržovač. Při typu „Double Action“ se tedy pohybuje tažník svislým pohybem v ose Z, tažnice, přidržovač a přístřih zůstávají pevné.

Při definování nástrojů v nabídce „Define Tools“ se přiřadí jednotlivé modely k již předvoleným nástrojům (DIE, PUNCH, BINDER). Protože má Dynaform v nastavení výše popsaný opačný tah, musí se k předvolenému nástroji DIE přiřadit model PUNCH a k předvolenému nástroji PUNCH zvolit model DIE (tab. 6.1).

Tab. 6.1 Přiřazení nástrojů

Nástroje (TOOLS)	MODEL
Tažník (PUNCH)	DIE
Tažnice (DIE)	PUNCH
Přidržovač (BINDER)	BINDER

### 6.3.1 Definování přístřihu a jeho materiálu

Definování přístřihu bylo provedeno v nabídce „Define Blank“. Byl zde přiřazen model přístřihu BLANK a jeho materiál. Materiál lze zvolit z předvolené knihovny materiálů („Material Library“) ve složce „Material“ nebo si v této složce nadefinovat nový materiál. Materiály v knihovně jsou rozděleny podle typu, který určuje metodu stanovení podmínky plasticity materiálu. Doporučovaným typem pro plošné tváření je materiálový typ 36 nebo 37 [13].

Pro přístřih výtazku levého krytu ventilátoru byl nadefinován nový druh materiálu, protože materiál, ze kterého je výtazek vyroben, v knihovně není. Byl použit materiálový model typu 36 a nejprve byly zadány vlastnosti materiálu DC04 (11 305.21), tab. 6.2. Poté byly pro další výpočty zadány vlastnosti materiálu St 4, tab. 6.3 a také vlastnosti materiálu IF-Stahl, tab. 6.4. Ve složce „Property“, která se rovněž nachází v nabídce „Define Blank“, byla nastavena tloušťka plechu 0,9 mm.

Tab. 6.2 Zadané hodnoty pro materiál DC04

Materiál DC04	
Měrná hmotnost (Mass density)	7,85 kg·m <sup>-3</sup>
Youngův modul pružnosti (Youngs modulus)	2,08·10 <sup>5</sup> MPa
Poissonova konstanta (Poissons ratio)	0,3 [-]
Model křivky zpevnění (Hardening rule)	2 – exponenciální křivka
Konstanta pevnosti (Material param P1 (K))	494 MPa
Průměrný exponent deformačního zpevnění (Material param P2 (n))	0,213 [-]
Materiálová konstanta (Exponent Face) – Kubická prostorově středěná mřížka (BCC)	6
Součinitel plastické anizotropie 0° vůči směru válcování (Lankford param R00)	1,95 [-]
Součinitel plastické anizotropie 45° vůči směru válcování (Lankford param R45)	1,40 [-]
Součinitel plastické anizotropie 90° vůči směru válcování (Lankford param R90)	2,30 [-]

Tab. 6.3 Zadané hodnoty pro materiál St 4

Materiál DC04	
Měrná hmotnost (Mass density)	7,85 kg·m <sup>-3</sup>
Youngův modul pružnosti (Youngs modulus)	2,08·10 <sup>5</sup> MPa
Poissonova konstanta (Poissons ratio)	0,3 [-]
Model křivky zpevnění (Hardening rule)	2 – exponenciální křivka
Konstanta pevnosti (Material param P1 (K))	494 MPa
Průměrný exponent deformačního zpevnění (Material param P2 (n))	0,158 [-]
Materiálová konstanta (Exponent Face) – Kubická prostorově středěná mřížka (BCC)	6
Součinitel plastické anizotropie 0° vůči směru válcování (Lankford param R00)	1,32 [-]
Součinitel plastické anizotropie 45° vůči směru válcování (Lankford param R45)	1,49 [-]
Součinitel plastické anizotropie 90° vůči směru válcování (Lankford param R90)	1,86 [-]

Tab. 6.4 Zadané hodnoty pro materiál IF-Stahl

Materiál DC04	
Měrná hmotnost (Mass density)	7,85 kg·m <sup>-3</sup>
Youngův modul pružnosti (Youngs modulus)	2,08·10 <sup>5</sup> MPa
Poissonova konstanta (Poissons ratio)	0,3 [-]
Model křivky zpevnění (Hardening rule)	2 – exponenciální křivka
Konstanta pevnosti (Material param P1 (K))	494 MPa
Průměrný exponent deformačního zpevnění (Material param P2 (n))	0,172 [-]
Materiálová konstanta (Exponent Face) – Kubická prostorově středěná mřížka (BCC)	6
Součinitel plastické anizotropie 0° vůči směru válcování (Lankford param R00)	1,88 [-]
Součinitel plastické anizotropie 45° vůči směru válcování (Lankford param R45)	2,36 [-]
Součinitel plastické anizotropie 90° vůči směru válcování (Lankford param R90)	2,95 [-]

### 6.3.2 Definování nástrojů a jejich ustavení do výchozí pozice

Nástroje s přístřihem byly ustaveny do základní polohy (obr. 6.5) ve složce „Position Tools“ v nabídce „Auto Position“. Zde bylo vybráno, které nástroje nemění tvar a které budou tvářeny.

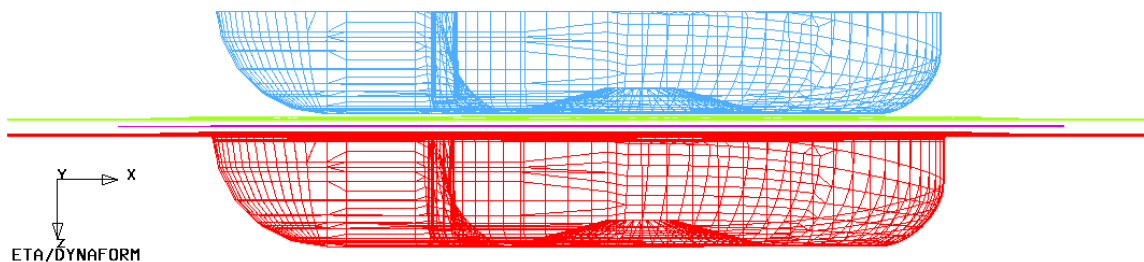
Zadané hodnoty:

Hlavní nástroje („Master Tools – fixed“): PUNCH, DIE, BINDER

Deformované nástroje („Slave Tools“): BLANK

Směr pohybu nástroje („Direction“): Z

Tažná mezera („Contact Gap“): 0,99 mm



Obr. 6.5 Výchozí pozice nástrojů a přístřihu



V nabídce „Define Tools“ byly nadefinovány všechny okrajové podmínky potřebné k výpočtu. Zadané hodnoty pro jednotlivé nástroje jsou v tab. 6.5 pro tažník, v tab. 6.6 pro tažnici a v tab. 6.7 pro přidržovač.

Tab. 6.5 Zadané hodnoty tažníku

Tažník (PUNCH)	
Stupně volnosti („Degrees of Freedom“)	Z
Typ kontaktu („Contact Type“)	Forming_One_Way_S_S (povrch nástrojů)
Součinitel statického tření („Static Friction“)	0,125 [-]
Koeficient tlumení („Damping Coeff.“)	20 [-]
Tvar křivky („Curve Shape“)	Trapezoidal
Začátek pohybu („Begin Time“)	0 s
Rychlost pohybu („Velocity“)	0,5 m·s <sup>-1</sup>
Zdvih („Stroke Dist“)	39,604 mm

Rychlost pohybu tažníku byla zvolena dle doporučení odborné literatury 0,5 m·s<sup>-1</sup>, tato rychlost je vhodná pro menší lisy. Hodnota zdvihu byla spočítána jako rozdíl minimální vzdálenosti mezi tažníkem a tažnicí a hodnoty tažné mezery. Tato hodnota může být různá, záleží na postavení nástrojů vůči sobě. Je nutné ji vždy při každé přípravě výpočtu změřit a překontrolovat.

Tab. 6.6 Zadané hodnoty tažnice

Tažnice (DIE)	
Typ kontaktu („Contact Type“)	Forming_One_Way_S_S (povrch nástrojů)
Součinitel statického tření („Static Friction“)	0,125 [-]
Koeficient tlumení („Damping Coeff.“)	20 [-]

Tab. 6.7 Zadané hodnoty přidržovače

Přidržovač (BINDER)	
Typ kontaktu („Contact Type“)	Forming_One_Way_S_S (povrch nástrojů)
Součinitel statického tření („Static Friction“)	0,125 [-]
Koeficient tlumení („Damping Coeff.“)	20 [-]
Začátek pohybu („Begin Time“)	0 s
Síla přidržovače („Force“)	dle tab. 6.8

Protože má každý přístřih jiný tvar a rozměry, je plocha kontaktu přidržovače s přístřihem u každého případu jiná. Tím se tedy mění i síla přidržovače  $F_p$ , kterou lze určit ze vztahu [7]:

$$F_p = p_p \cdot S_p \quad [\text{N}] \quad (6.1)$$

kde je  $p_p$  – měrný tlak přidržovače [MPa],

$S_p$  – účinná plocha přidržovače [mm<sup>2</sup>].

Přidržovač má zabránit zvlnění příruby. Pro správnou volbu přidřovacího tlaku platí zásada, že čím větší je tloušťka plechu, tím je přidřovací tlak menší. Měrný tlak přidřovače byl zvolen 2 MPa dle doporučení odborné literatury [7]. Nejprve byla spočítána plocha každého přístřihu  $S_i$  pomocí programu CATIA V5R6, poté také plocha otvoru v přidřovači, která dle programu CATIA V5R6 byla 30 288,4 mm<sup>2</sup>. Pokud se tyto dvě plochy od sebe odečtou, výsledkem je účinná plocha přidřovače  $S_p$ , na které působí měrný tlak.

Tab. 6.8 Přidřovací síly pro jednotlivé přístřihy

Přístřihy	Plocha přístřihu $S_i$ [mm <sup>2</sup> ]	Účinná plocha přidřovače $S_p$ [mm <sup>2</sup> ]	Měrný tlak $p_p$ [MPa]	Přidřovací síla $F_p$ [N]
Stávající	76 553,103	46 264,703	2	92 529,41
ČSN	64 154,63	33 866,23	2	67 732,46
Metoda řezů	53 205,41	22 917,01	2	45 834,02
TMSN	59 296,92	29 008,52	2	58 017,04
BSE modul	61 135,80	30 847,40	2	61 694,80

Nadefinované nástroje a přístřih lze před nastavením pohybu nástrojů zkontrolovat v nabídce „Summary“, která se nachází v záložce „Tools“. Po nastavení všech podmínek byla provedena kontrolní animace pohybu nástrojů („Animate“). Poté byly v modulu „Analysis“ ve složce LS-DYNA nastaveny parametry pro výpočet simulace a výsledný soubor byl uložen jako datový soubor dyn.

## **6.4 Výpočet v Submit Dyna Jobs**

Výpočet byl proveden v programu LS-DYNA Jobs Submitter 2.2, který je součástí Dynaformu. Byla nastavena přesnost výpočtu („Single Precision“ – Jednoduchá přesnost), kontrolní parametr („Control Parameter“) a také cesta k řešiči LS-DYNA (ls970.exe). Výpočet simulace probíhá metodou konečných prvků, čas výpočtu je závislý na rychlosti procesoru, velikosti vytvořené mřížky a na počtu kroků.

Vytvořený soubor dyn byl načten („Add Dyn Job“) do řešiče LS-DYNA Jobs Submitter a bylo spuštěno řešení („Submit Jobs“). Jednotlivé kroky bylo možno sledovat v okně. Po dokončení výpočtu („Finished“) bylo možno pročíst zprávu o průběhu zpracovávání („Read Message File“).

## **6.5 Zpracování výsledků simulace procesu tažení v ETA/Post-Processor 1.0**

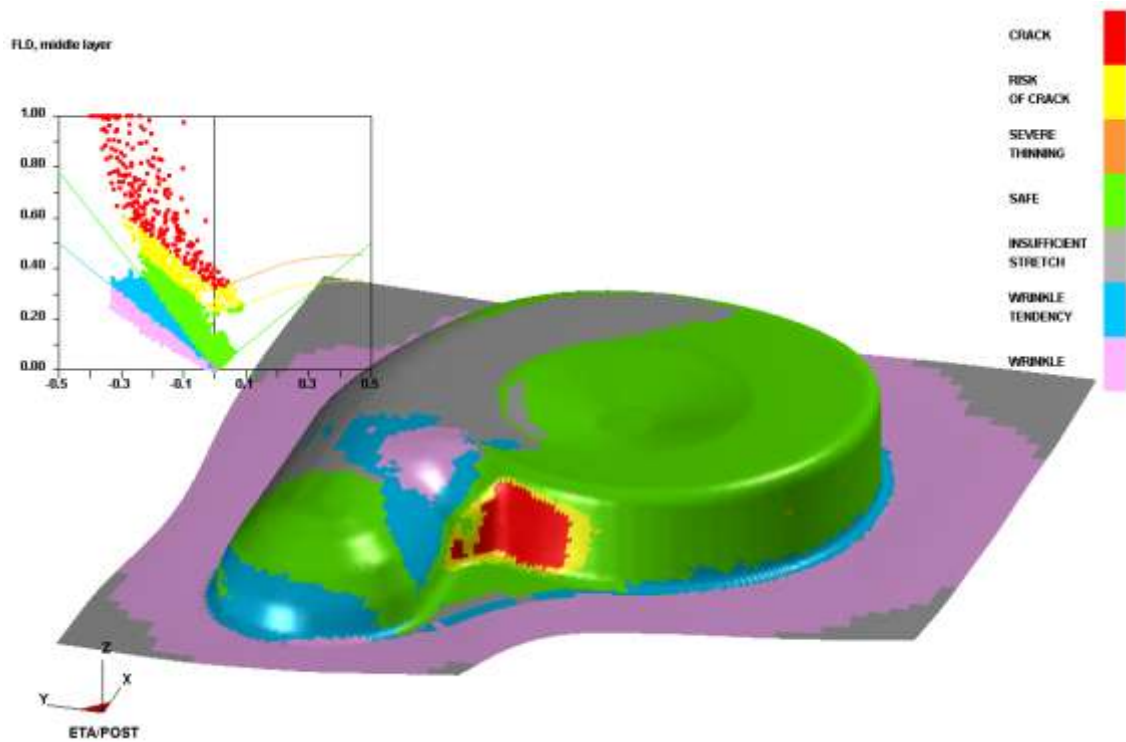
Výsledky simulace lze prohlížet v programu ETA/Post-Processor 1.0, který je součástí Dynaformu. Do programu je možné načíst výsledné soubory d3plot nebo dynain. Soubor d3plot obsahuje veškeré informace o průběhu simulace tažení, proces tažení je zde rozdělen do několika kroků, které je možno prohlédnout každý zvlášť nebo spustit celou simulaci. Soubor dynain obsahuje informace o konečném kroku tažení, zobrazí tedy konečný výtažek na konci simulace tažení.

V programu ETA/Post-Processor je celá řada analýz, podle kterých je možno výtažek hodnotit. Byly použity analýzy: „Diagram mezních deformací“ („Forming Limit Diagram“), „Normálové napětí“ („Norm Strain“) a „Tloušťka materiálu“ („Thickness“).

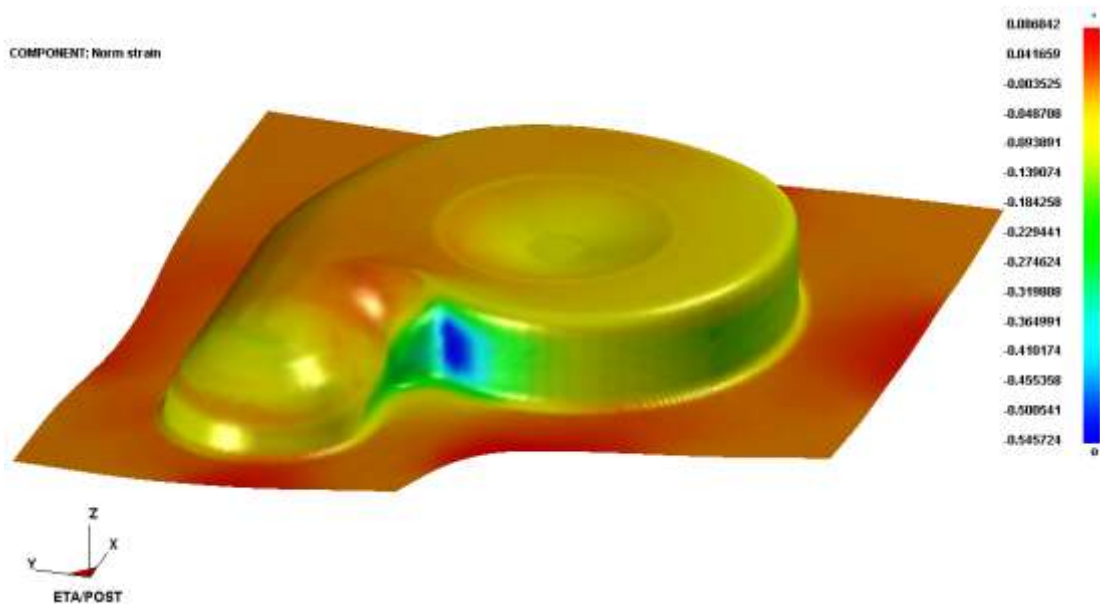
## **6.6 Simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z oceli DC04**

Výsledky simulace jsou rozděleny podle použitého přístříhu do jednotlivých kapitol. U každého přístříhu byly použity tytéž analýzy, aby zde byla možnost porovnání výsledků.

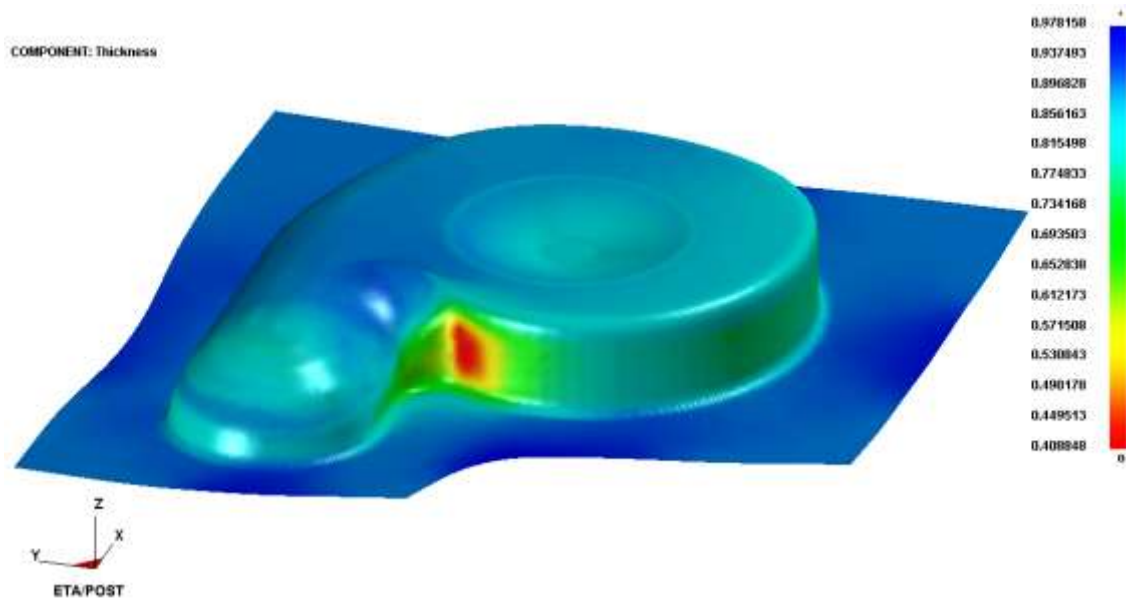
### 6.6.1 Simulace tažení levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístříhu



Obr. 6.6 Rozbor napětí na výtažku taženém ze stávajícího přístříhu z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

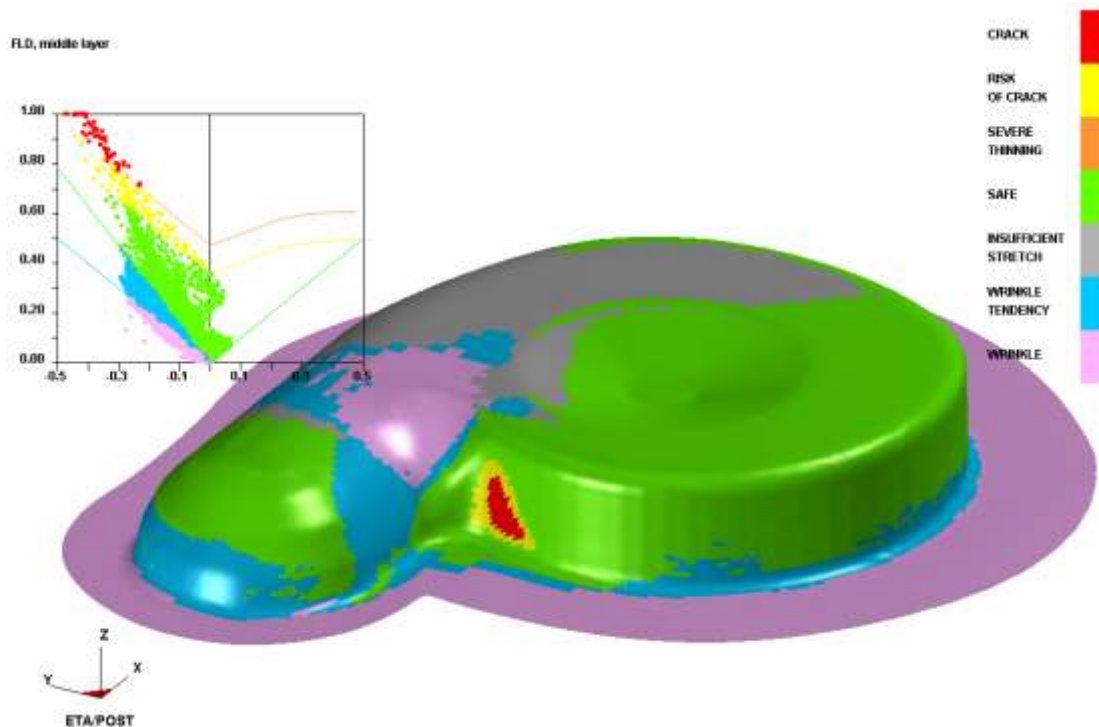


Obr. 6.7 Normálové napětí ve výtažku taženém ze stávajícího přístříhu z oceli DC04

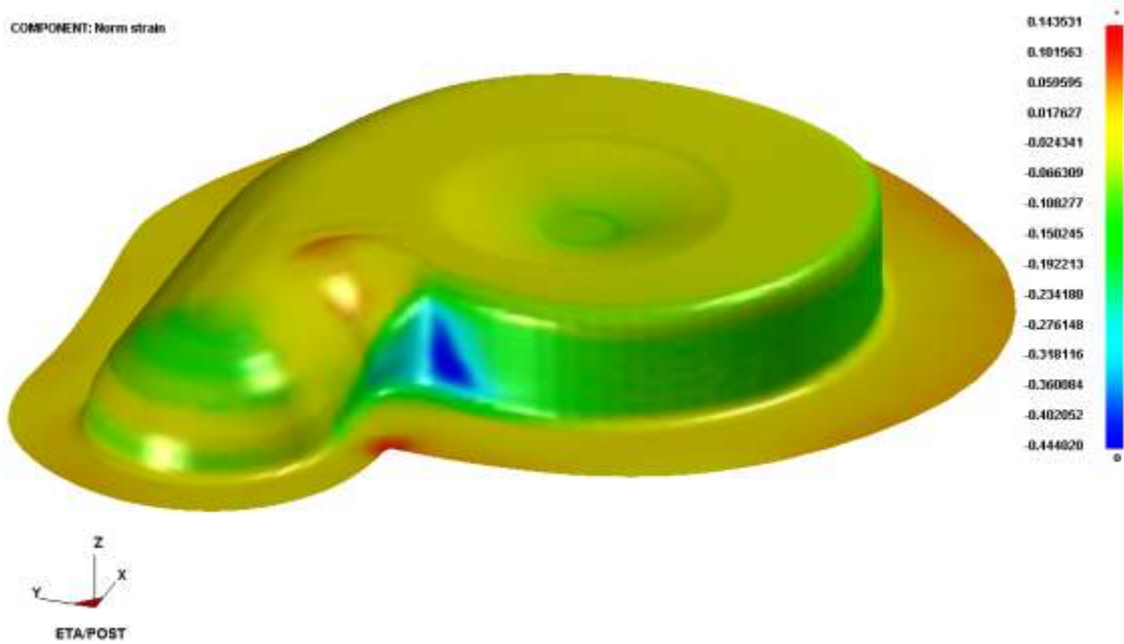


Obr. 6.8 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém ze stávajícího přístřihu z oceli DC04

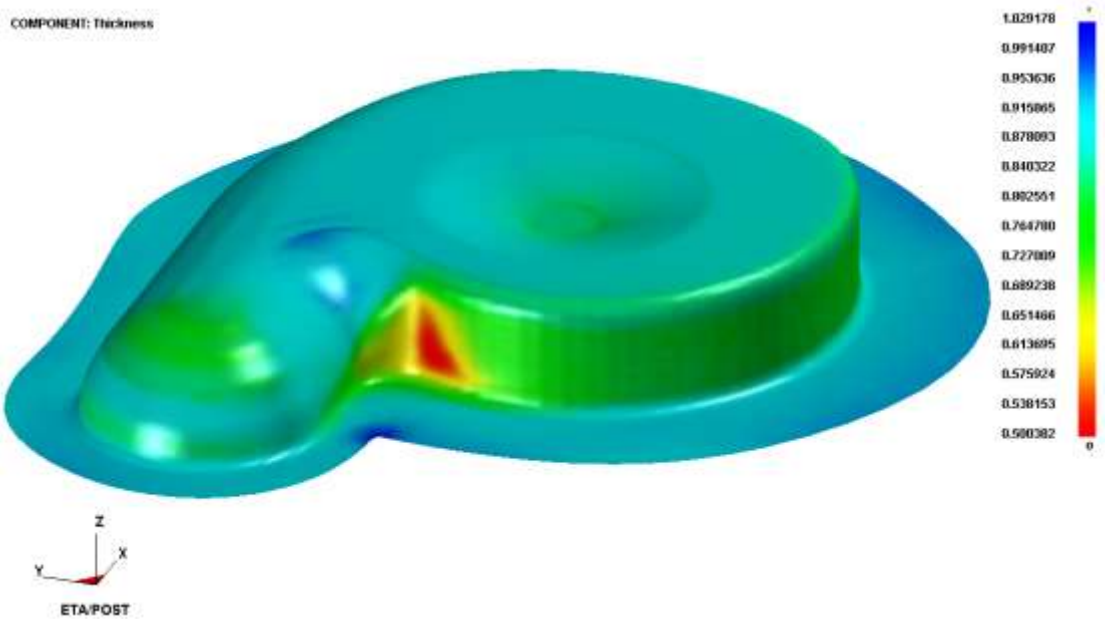
### 6.6.2 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303



Obr. 6.9 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303 z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

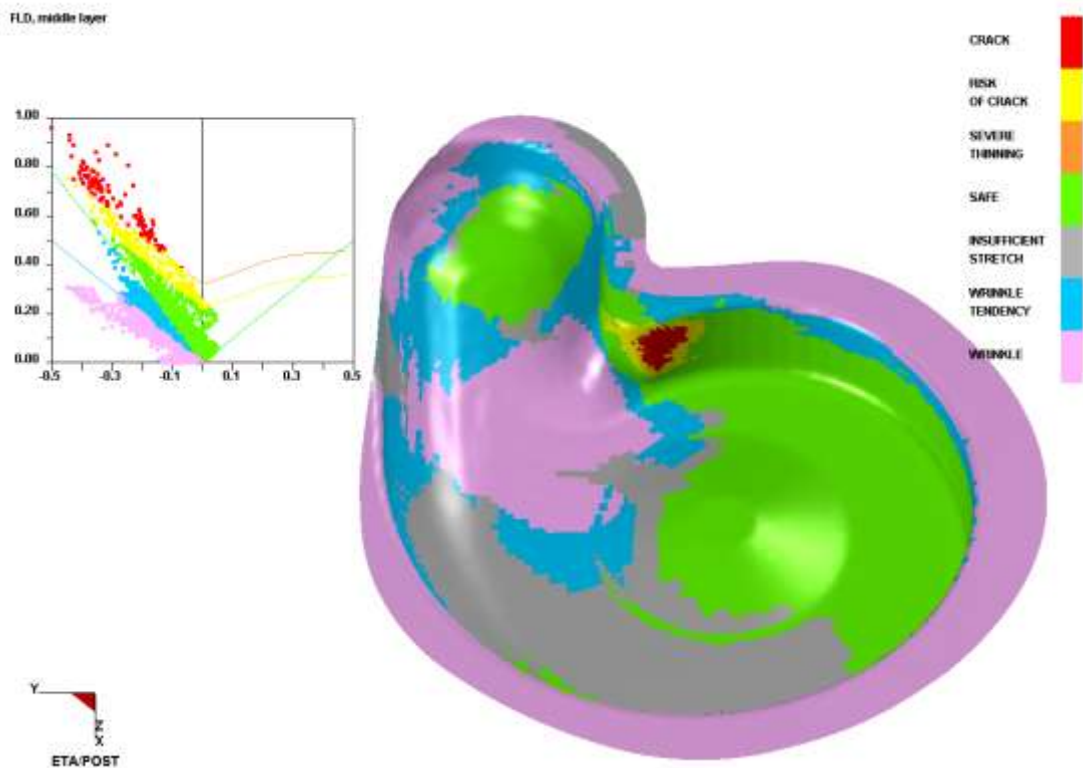


Obr. 6.10 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303 z oceli DC04



Obr. 6.11 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303 z oceli DC04

### 6.6.3 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou řezů



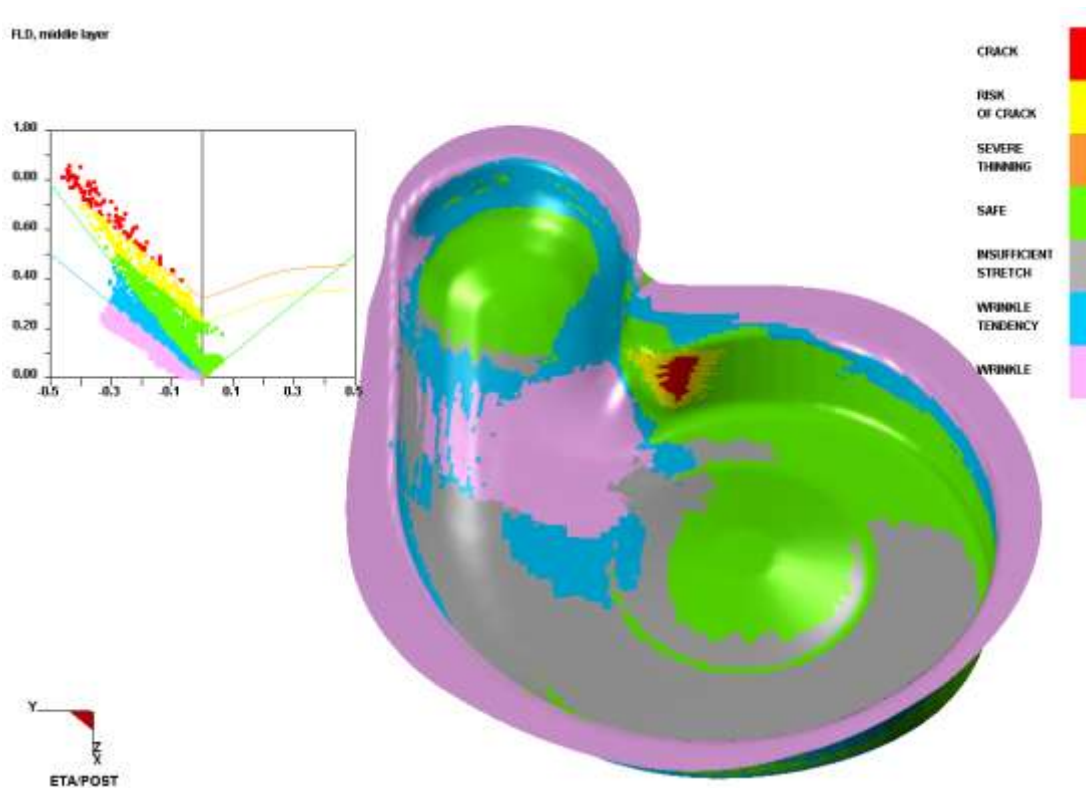
Obr. 6.12 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

#### 6.6.3.1 Korekce polohy přístříhu stanoveného metodou řezů

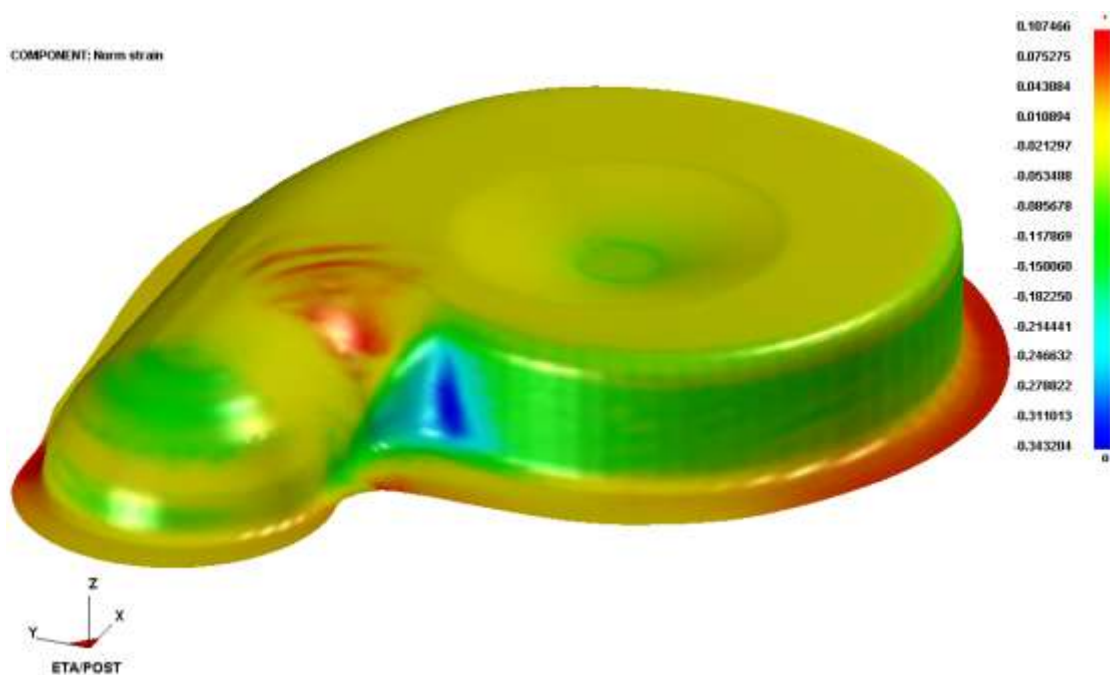
Po simulaci procesu tváření s přístřihem stanoveným metodou řezů bylo znát, že tento přístřih je zcela nevhodný pro tažení levého krytu ventilátoru. V rovinné části výtažku se na jedné straně nedostává materiálu a na straně druhé materiál přebývá. Po vytažení tedy vznikne zmetkový kus, který nelze dále využít.

Problém lze odstranit posunutím přístříhu v souladu se souřadným systémem na obr. 6.14 v ose x o -5 mm a v ose y o 7 mm. Takto posunutý přístřih sice není soustředný s tažnými nástroji a oblast rovinné části je pořád kritickým místem, ale výsledky simulace tažení dokazují (kap. 6.6.3.2), že výtažek levého krytu ventilátoru lze po navržené korekci přístříhu použít a nespadá do kategorie zmetkových kusů.

### 6.6.3.2 Výsledky simulace tažení levého krytu ventilátoru po korekci polohy přístřihu sestrojeného metodou řezů

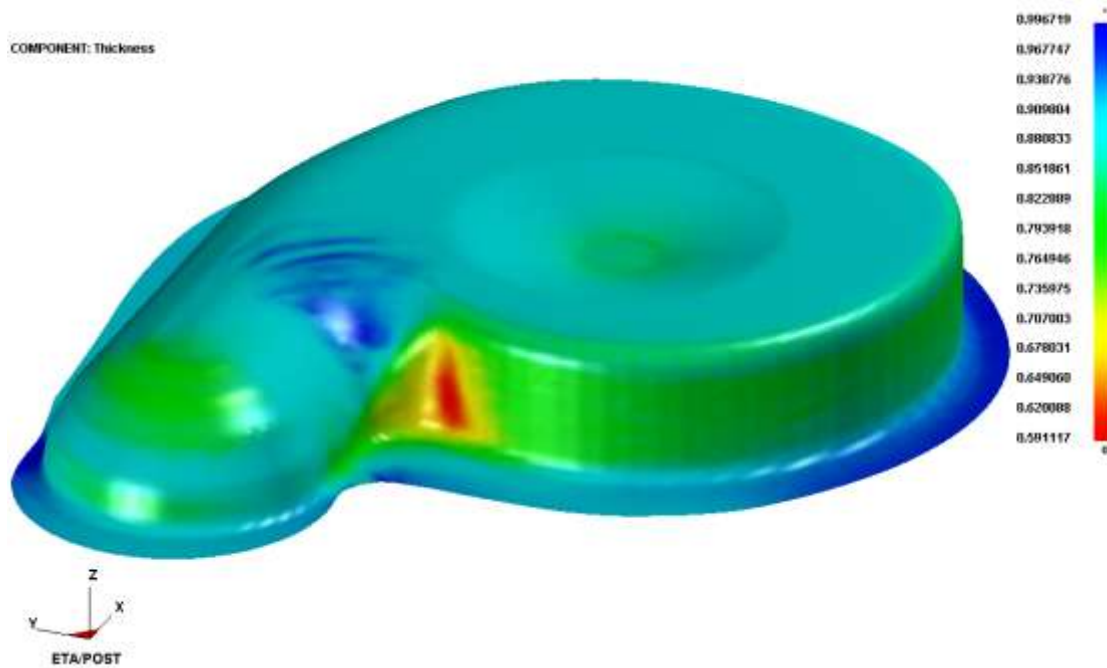


Obr. 6.13 Rozbor napětí na výtazku taženém z přístřihu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



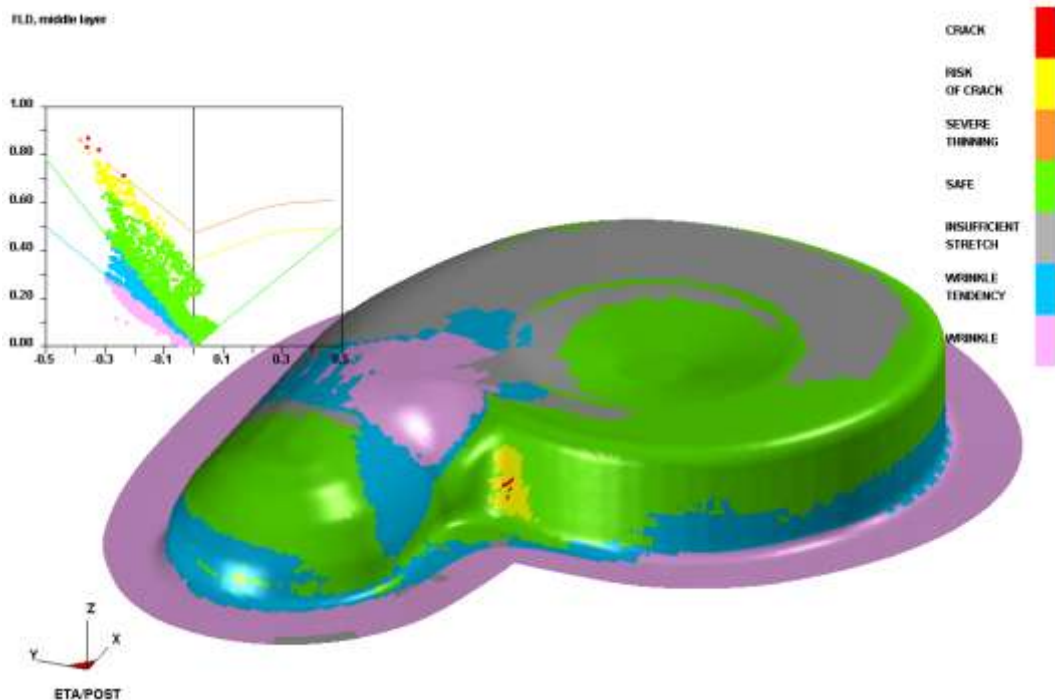
Obr. 6.14 Normálové napětí ve výtazku taženém z přístřihu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy přístřihu z oceli DC04



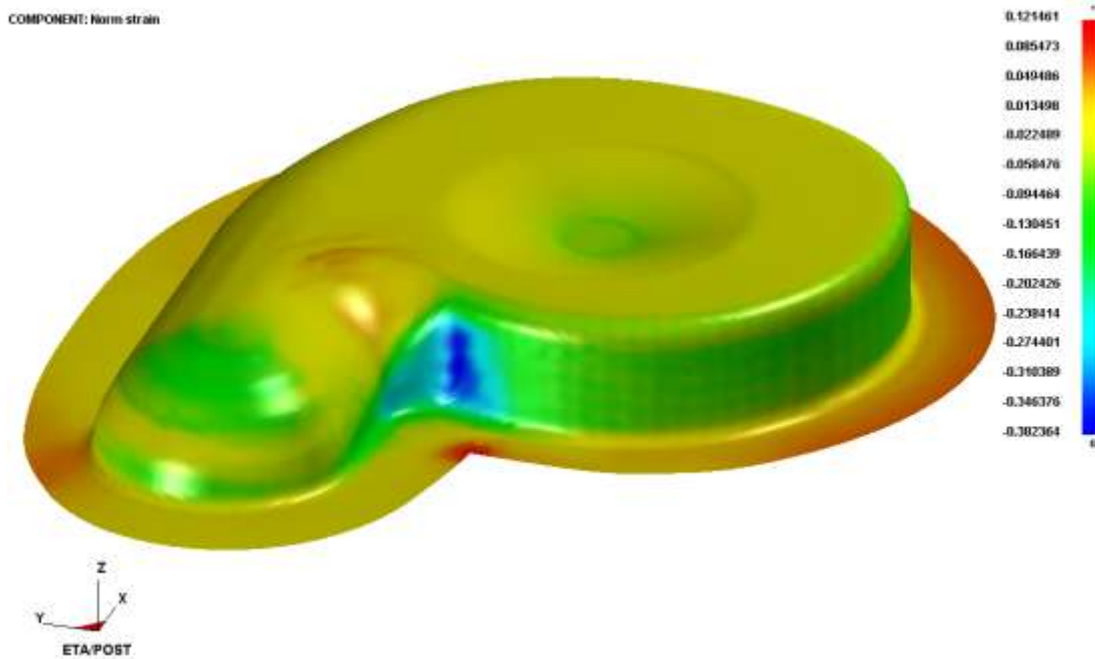


Obr. 6.15 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy přístříhu z oceli DC04

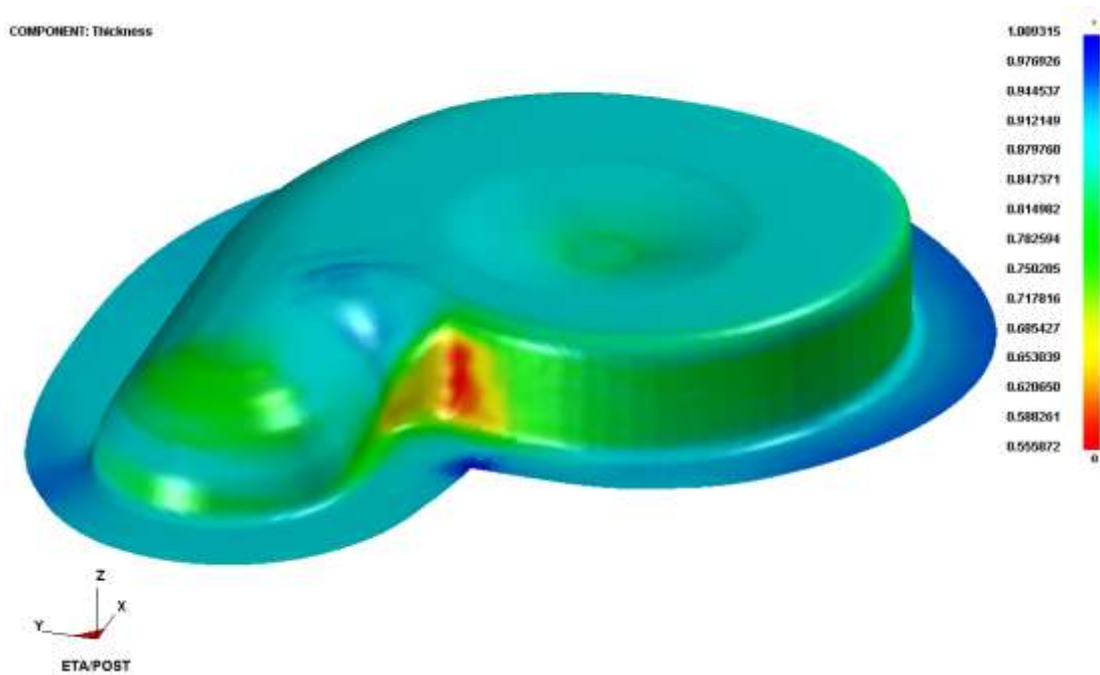
#### 6.6.4 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN



Obr. 6.16 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

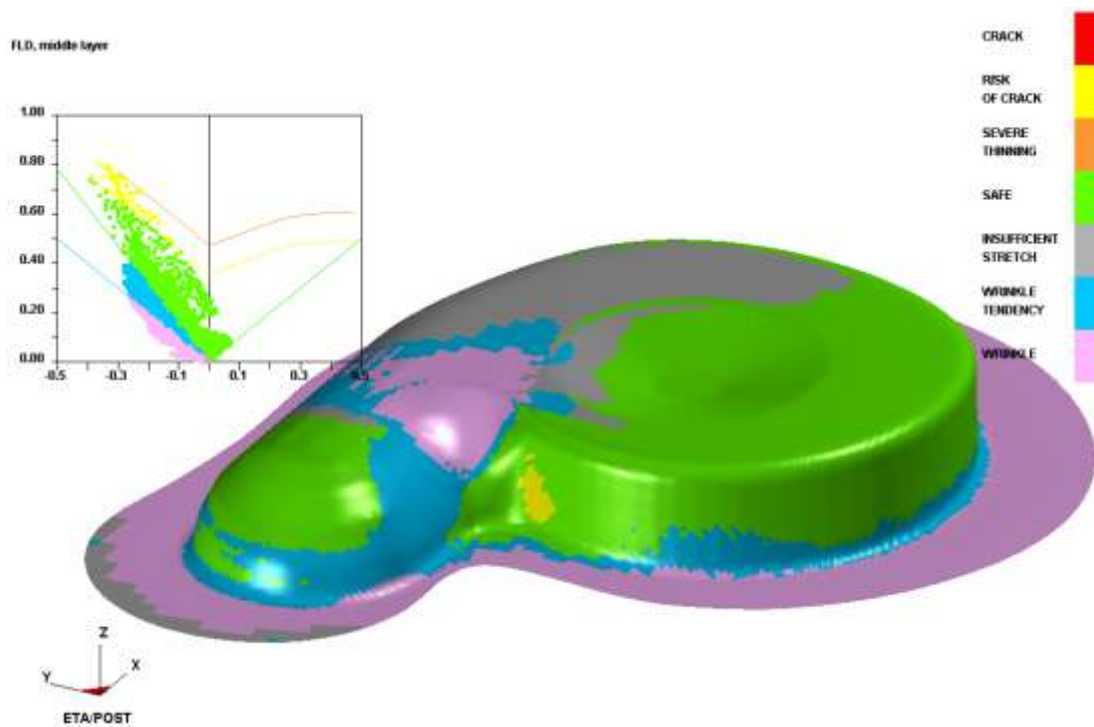


Obr. 6.17 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli DC04

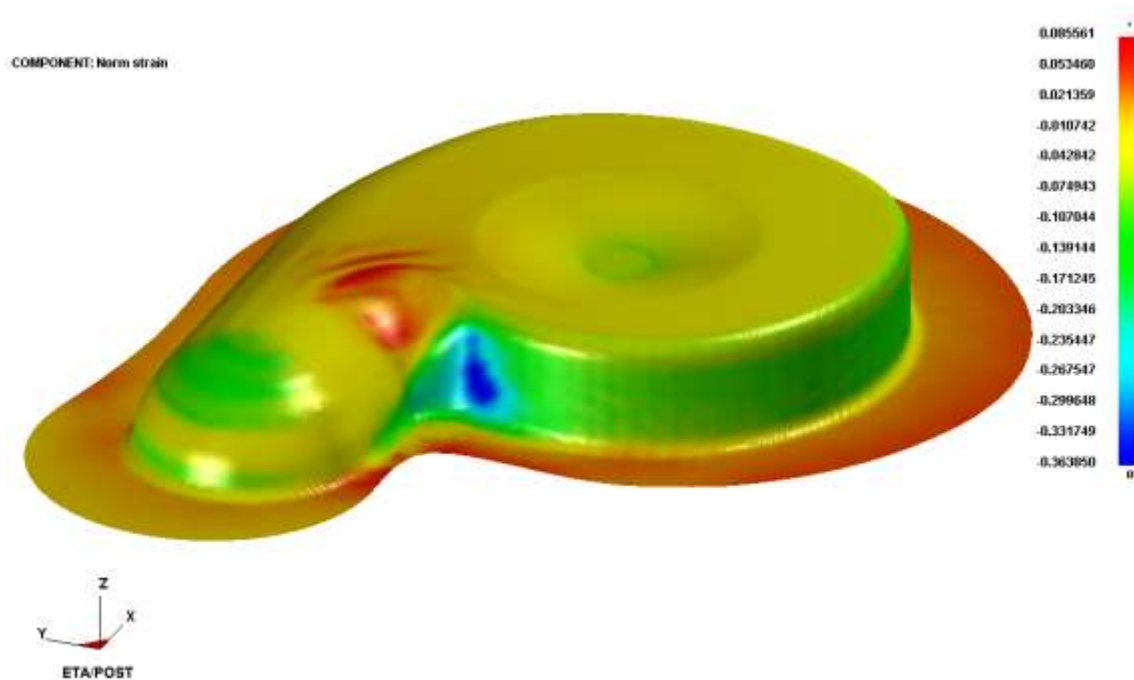


Obr. 6.18 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli DC04

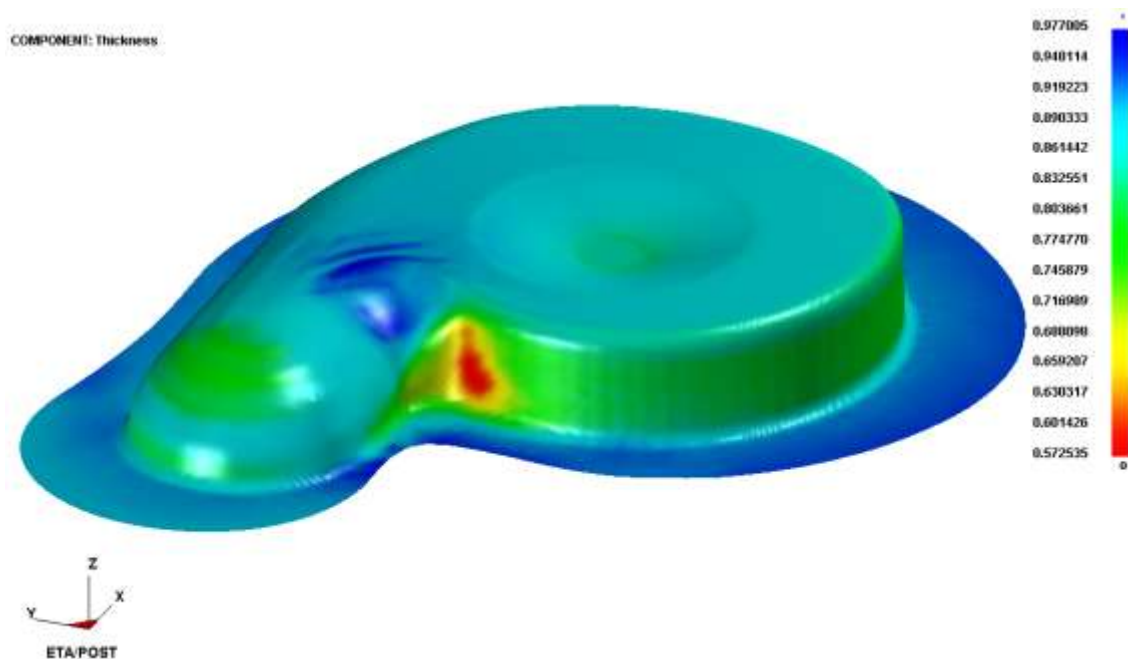
### 6.6.5 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2



Obr. 6.19 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



Obr. 6.20 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli DC04



Obr. 6.21 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli DC04

## 6.7 Vyhodnocení výsledků simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru z oceli DC04

Na výtažky byly použity tři analýzy výsledků, podle kterých byly výsledky mezi sebou porovnávány a hodnoceny. Výsledky za použití všech analýz jsou v této kapitole jednotlivě rozebrány. Výsledné hodnoty z analýzy diagramu mezních deformací, normálového napětí a tloušťky plechu na výtažku se s použitím různých přístřihů liší, místo nad poloměrem 12 mm zůstává kritické za použití všech přístřihů.

### a) Diagram mezních deformací („FLD“)

Na výtažku taženém ze všech přístřihů byla v ETA/Post-Processoru použita analýza diagramu mezních deformací (obr. 6.6, obr. 6.9, obr. 6.12, obr. 6.13, obr. 6.16, obr. 6.19). Tato funkce ukazuje finální model v sedmi různých oblastech tváritelnosti. Oblasti se promítají v diagramu mezních deformací, kde osa x znázorňuje hlavní logaritmickou deformaci ve směru 2 –  $\varphi_2$  a osa y hlavní logaritmickou deformaci ve směru 1 –  $\varphi_1$ . Oranžová (nebo žlutá, podle přisnosti pohledu) křivka mezních deformací vymezuje dvě plochy, přípustné deformace se nacházejí pod křivkou a nepřípustné nad křivkou. Nad žlutou křivkou se nachází oblast nebezpečí tvorby trhlin a nad oranžovou křivkou

se už nachází jen oblast vzniku praskliny. Zcela bezpečná oblast je tedy vymezena žlutou a zelenou křivkou mezních deformací a nachází se mezi nimi. Z velké části na výtažku převládá právě bezpečná oblast vykreslená zeleně (SAFE). U části plechu, která je pod přídržovačem, lze předpokládat vznik zvrásnění. Toto místo je u všech modelů z různých přístřihů vyznačeno růžovou barvou s označením WRINKLE (zvrásnění). Program nejen ukazuje, kde vznikne zvrásnění, ale i ve které části je tendence k tomuto jevu (WRINKLE TENDENCY). U všech modelů se na stejném místě (blízko poloměru 12 mm) objevuje červené místo, tj. hlášení o prasklině (CRACK). Kolem tohoto místa program žlutě znázorňuje nebezpečí vzniku praskliny (RISK OF CRACK) nebo oranžově oblast vážného ztenčení (SEVERE THINNING). Toto místo je v praxi opravdu kritické, zvláště u výtažku taženého ze stávajícího přístřihu, ze kterého byl levý kryt ventilátoru dosud tažen (obr. 6.22). U stávajícího přístřihu (obr. 6.6) je červené místo největší, protože nevhodně navržené vybrání brání vtahování materiálu do místa s poloměrem 12 mm. S použitím vhodnějších přístřihů pro levý kryt ventilátoru se oblast praskliny zmenšuje a u přístřihu stanoveného metodou využívající TMSN (obr. 6.16) je prasklina nejmenší. Výtažek tažený z přístřihu vytvořeného pomocí BSE modulu dokonce nevykazuje vznik praskliny, v kritickém místě se objevuje pouze žlutě značená oblast s varováním nebezpečí vzniku praskliny. Přístřih stanovený metodou řezů nevyhovuje z hlediska nadměrného vtahování materiálu v rovinné části výtažku a po vytažení výtažku vznikne zmetkový kus, je tedy zbytečné se touto variantou dále zabývat.



Obr. 6.22 Levý kryt ventilátoru s prasklinou blízko poloměru 12 mm

#### b) Normálové napětí („Norm Strain“)

Hodnoty maximálního normálového napětí se na výtažcích pohybují různě (obr. 6.7, obr. 6.10, obr. 6.14, obr. 6.17, obr. 6.20). U stávajícího přístřihu (obr. 6.7) je maximální hodnota normálového napětí  $0,0868 \cdot 10^9$  Pa, u optimálního přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN (obr. 6.17) je hodnota maximálního normálového napětí  $0,121 \cdot 10^9$  Pa. Největší hodnotu maximálního normálového napětí vykazuje výtažek vytažený z přístřihu dle ČSN (obr. 6.10), a to  $0,144 \cdot 10^9$  Pa. Nejmenšího maximálního normálového napětí dosahuje výtažek z přístřihu vytvořeného pomocí BSE modulu, a to  $0,0855 \cdot 10^9$  Pa (viz obr. 6.20). Těchto maximálních normálových napětí však výlisky dosahují jen na přírubě, v rozích přístřihu a hlavně v místě zvrásnění. U výtažku z přístřihu stanoveného metodou řezů s korigovanou polohou a u přístřihu vytvořeného pomocí BSE modulu dochází k největšímu zvrásnění v místě pod poloměrem 12 mm.

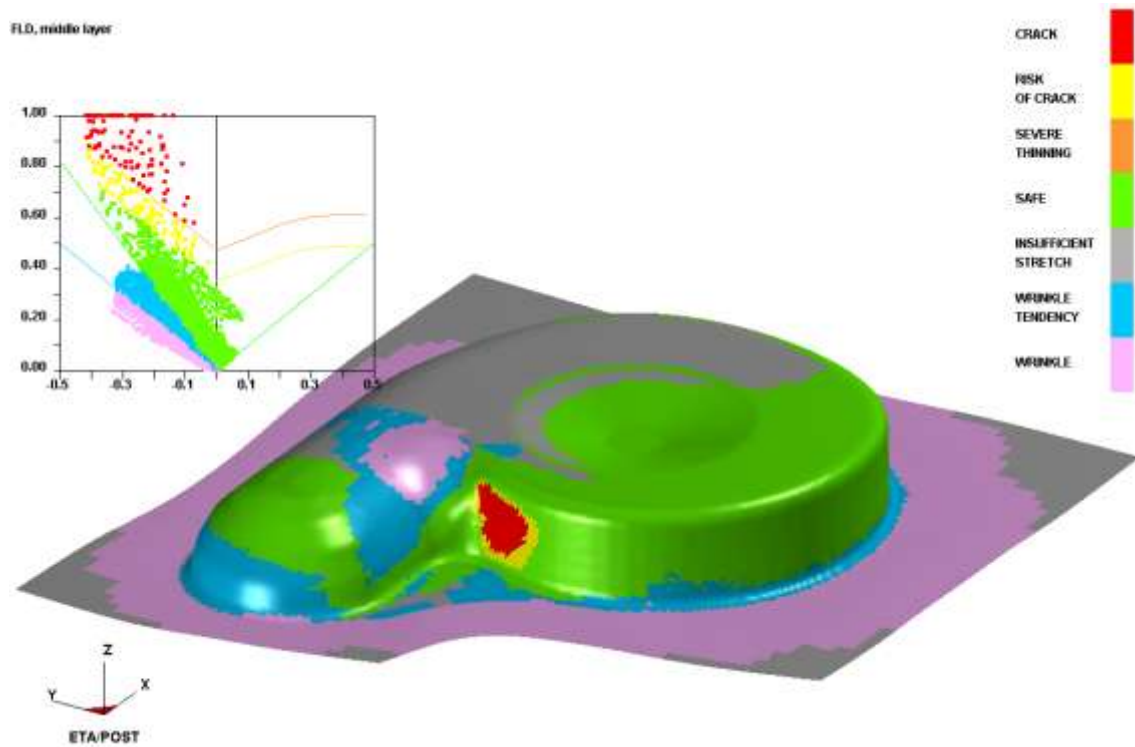
#### c) Tloušťka („Thickness“)

Tloušťka plechu se na většině plochy výtažků pohybuje okolo hodnoty 0,9 mm (obr. 6.8, obr. 6.11, obr. 6.15, obr. 6.18, obr. 6.21). Místy na výtažcích dochází ke ztenčení, například dno výtažku je ve všech případech mírně ztenčeno, tloušťka dna se pohybuje okolo 0,85 mm. Nejmenší tloušťka plechu se na výtažku objevuje v okolí místa s poloměrem 12 mm, kde dochází k prasknutí, a to platí skoro u všech výlisků (výtažek dle BSE modulu vykazuje pouze nebezpečí vzniku praskliny, ne vznik praskliny). Nejmenší tloušťku v tomto místě vykazuje výtažek ze stávajícího přístřihu, minimální tloušťka je 0,409 mm (obr. 6.8). V místě praskliny má největší tloušťku plechu výtažek z přístřihu vytvořeného metodou řezů po korekci polohy (obr. 6.15). U tohoto přístřihu ale dochází k největšímu zvrásnění v místě pod kritickým místem, kde se naopak plech pěchuje a tloušťka se zvětšuje. Optimální přístřih vytvořený metodou využívající TMSN má celkové rozmezí hodnot tloušťky  $0,556 \text{ mm} \div 1,009 \text{ mm}$  (obr. 6.18). Maximální tloušťku na výtažku z přístřihu sestrojeném metodou využívající TMSN, 1,009 mm, lze najít v přírubě nad místem s poloměrem 12 mm, plech je tu držen přidržovačem a vlivem tažení přístřihu zde dochází k napěchování materiálu. Výtažek z přístřihu stanoveného pomocí BSE modulu (obr. 6.20) má rozmezí tloušťky  $0,573 \text{ mm} \div 0,977 \text{ mm}$ , napěchování materiálu se objevuje v tom samém místě jako u optimálního přístřihu.

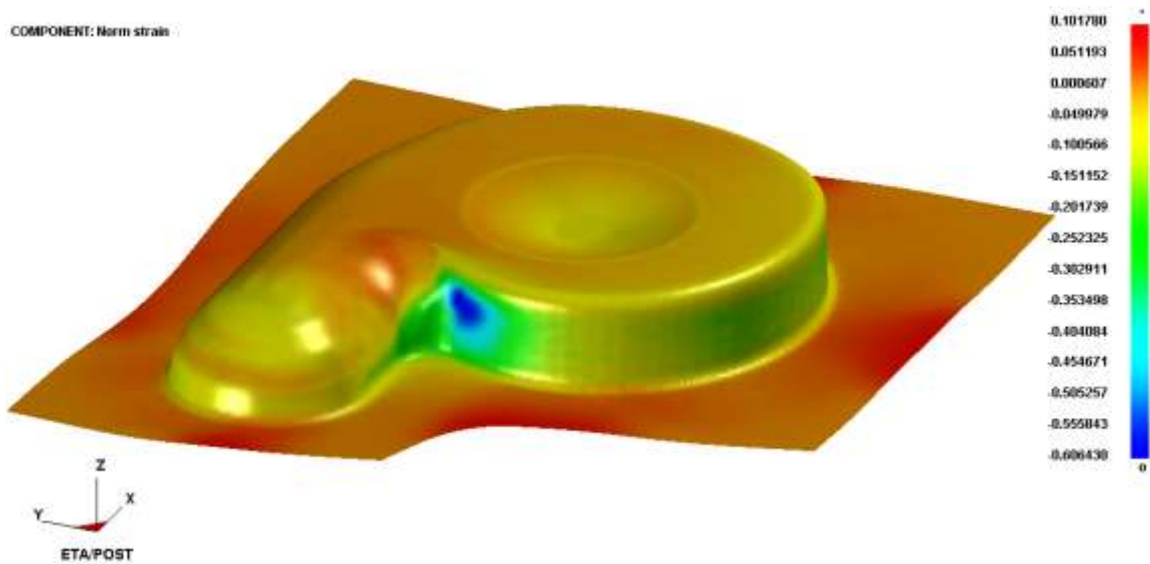
## 6.8 Simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z oceli St 4

Výsledky simulace jsou rozděleny podle použitého přístřihu do jednotlivých kapitol. U každého přístřihu byly použity tytéž analýzy, aby zde byla možnost porovnání výsledků.

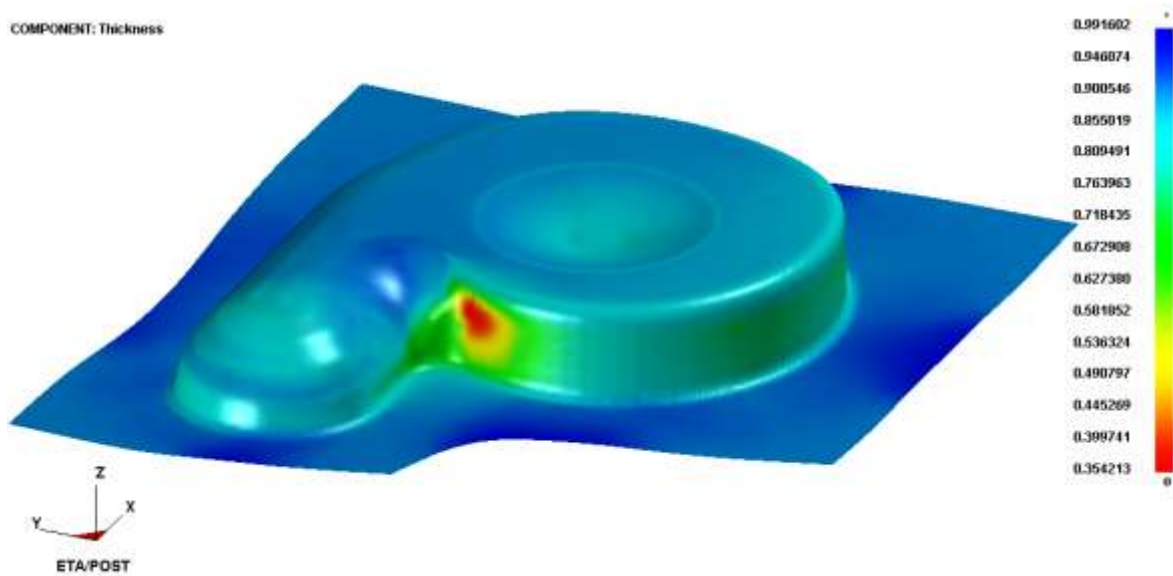
### 6.8.1 Simulace tažení levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu



Obr. 6.23 Rozbor napětí na výtažku taženém ze stávajícího přístřihu z oceli St 4 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



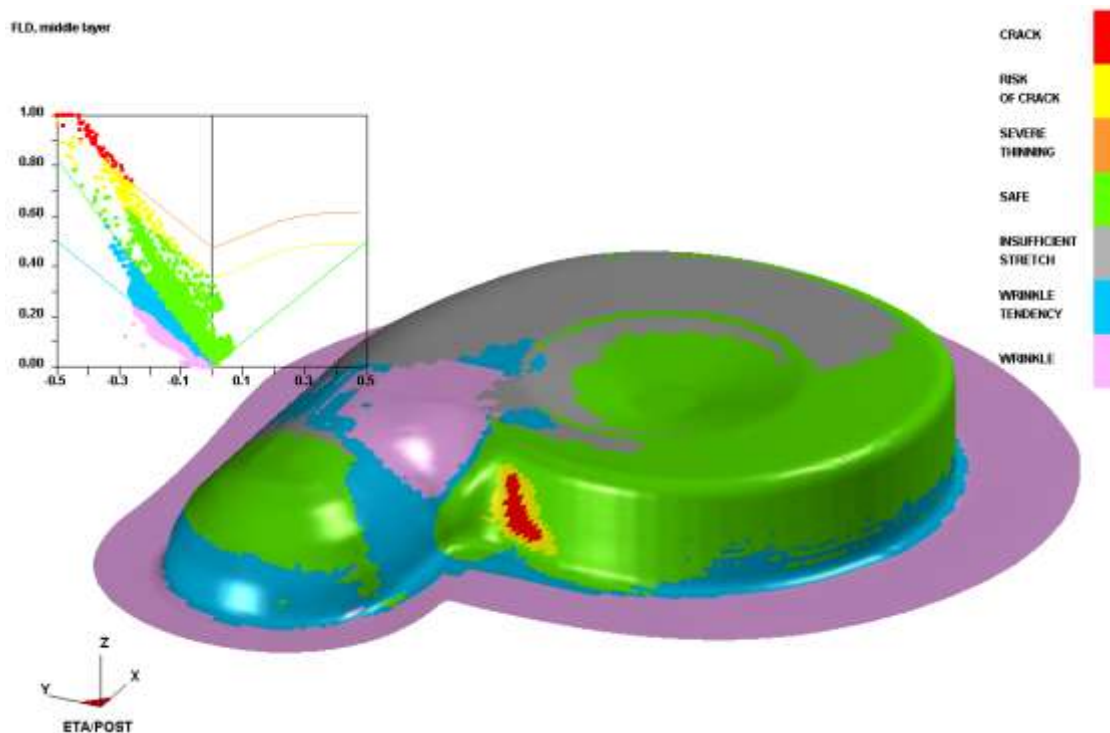
Obr. 6.24 Normálové napětí ve výtažku taženém ze stávajícího přístříhu z oceli St 4



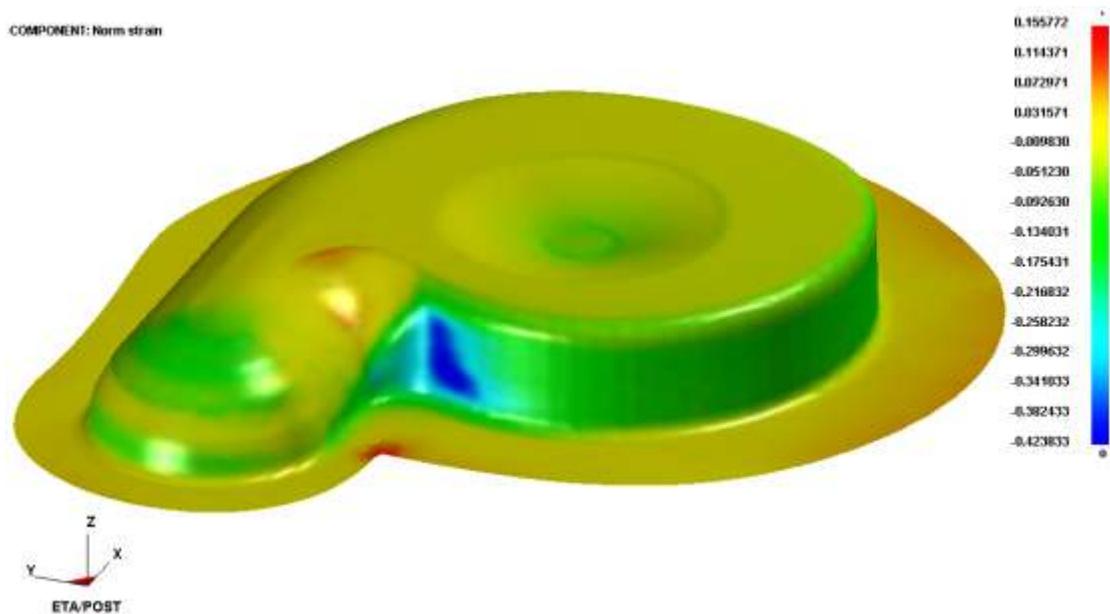
Obr. 6.25 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém ze stávajícího přístříhu z oceli St 4



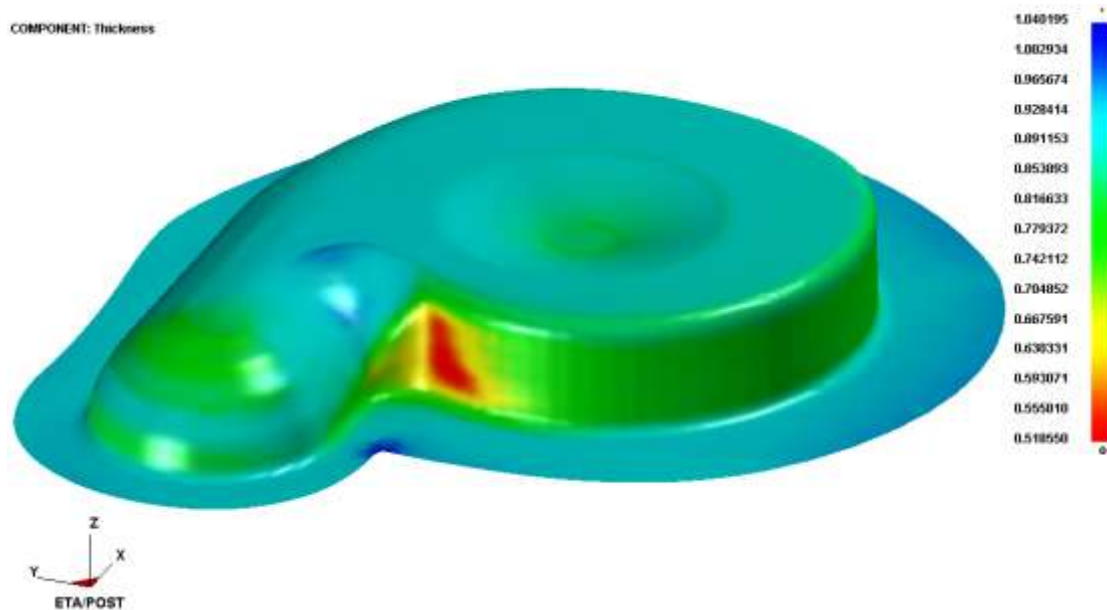
## 6.8.2 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného dle ČSN 22 7303



Obr. 6.26 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu dle ČSN 22 7303 z oceli St 4 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

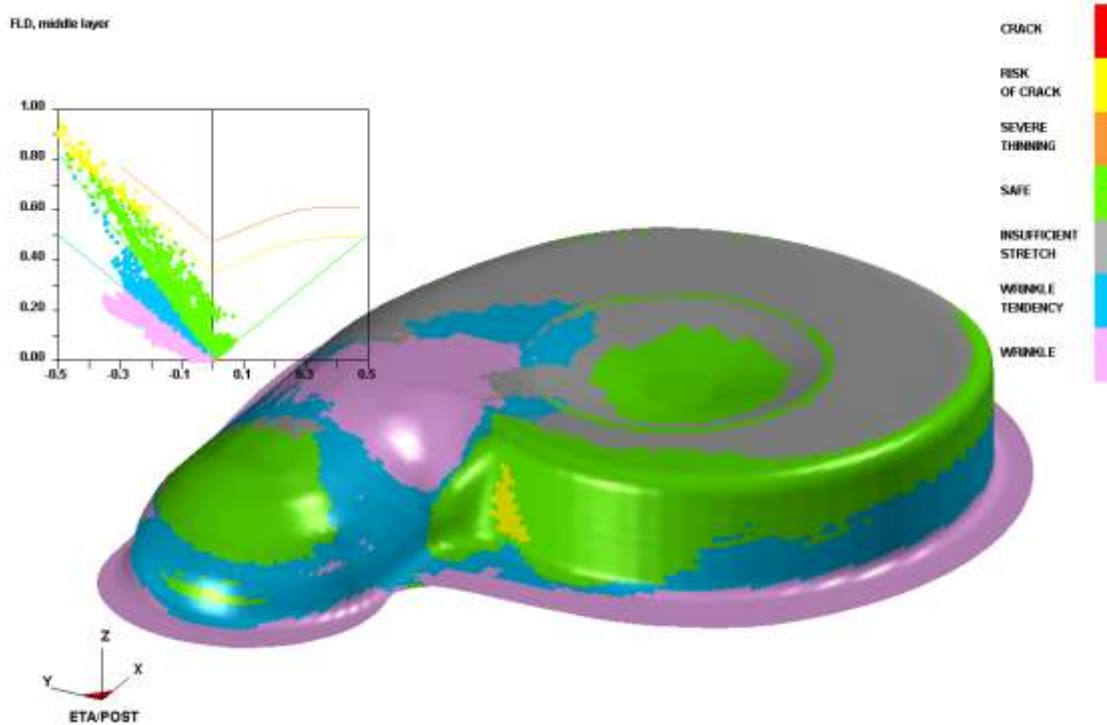


Obr. 6.27 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu dle ČSN 22 7303 z oceli St 4

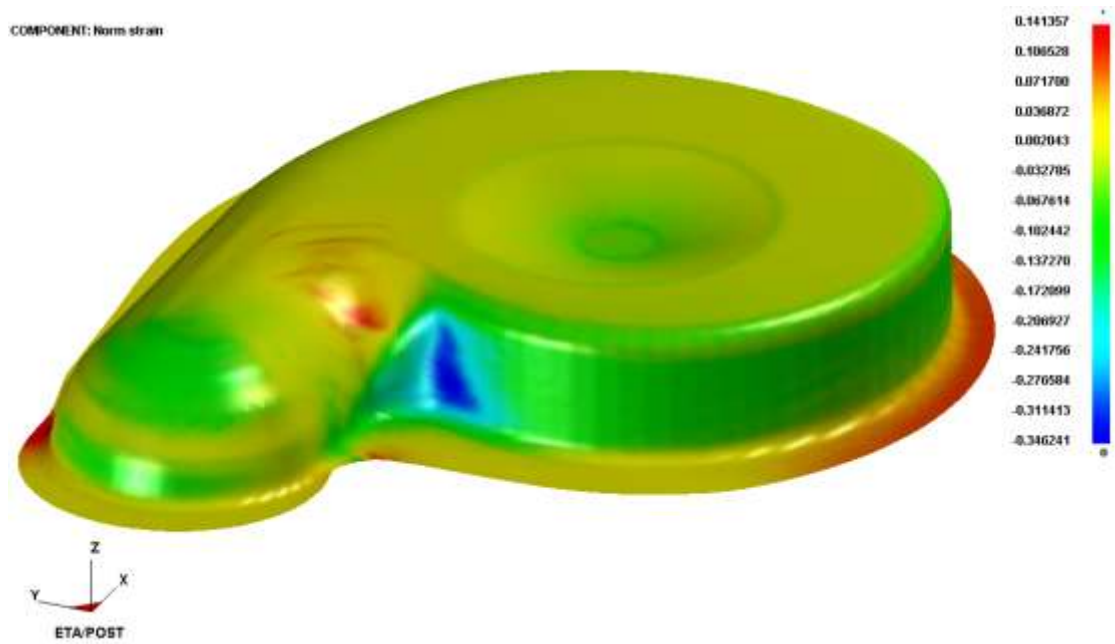


Obr. 6.28 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303 z oceli St 4

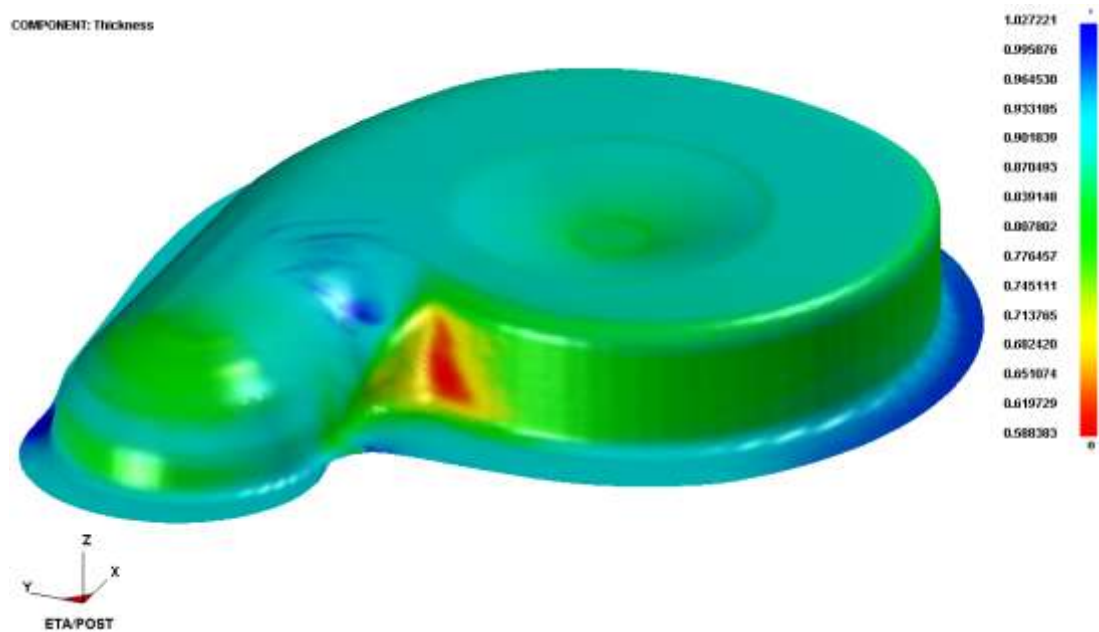
### 6.8.3 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístřihu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy



Obr. 6.29 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístřihu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy z oceli St 4 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

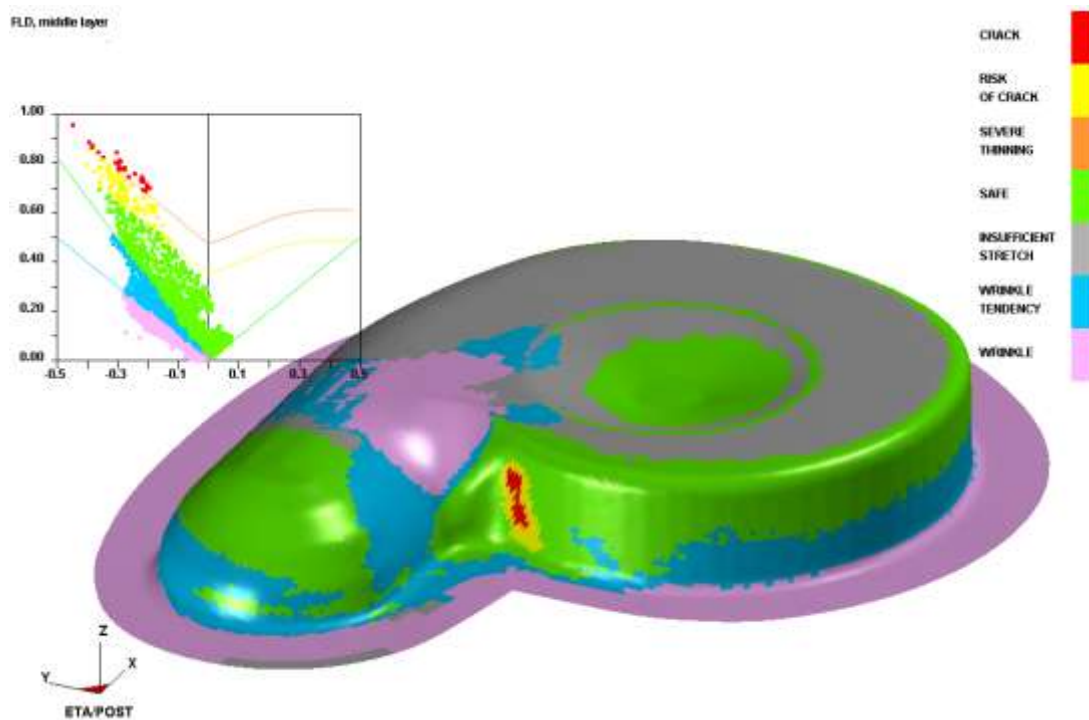


Obr. 6.30 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy přístříhu z oceli St 4

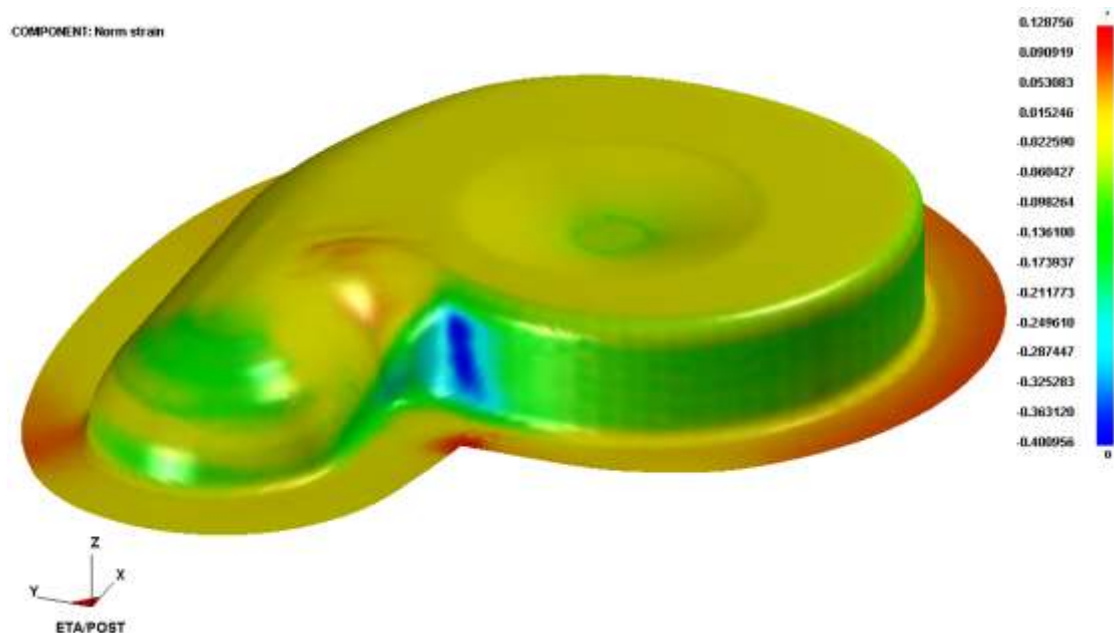


Obr. 6.31 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy přístříhu z oceli St 4

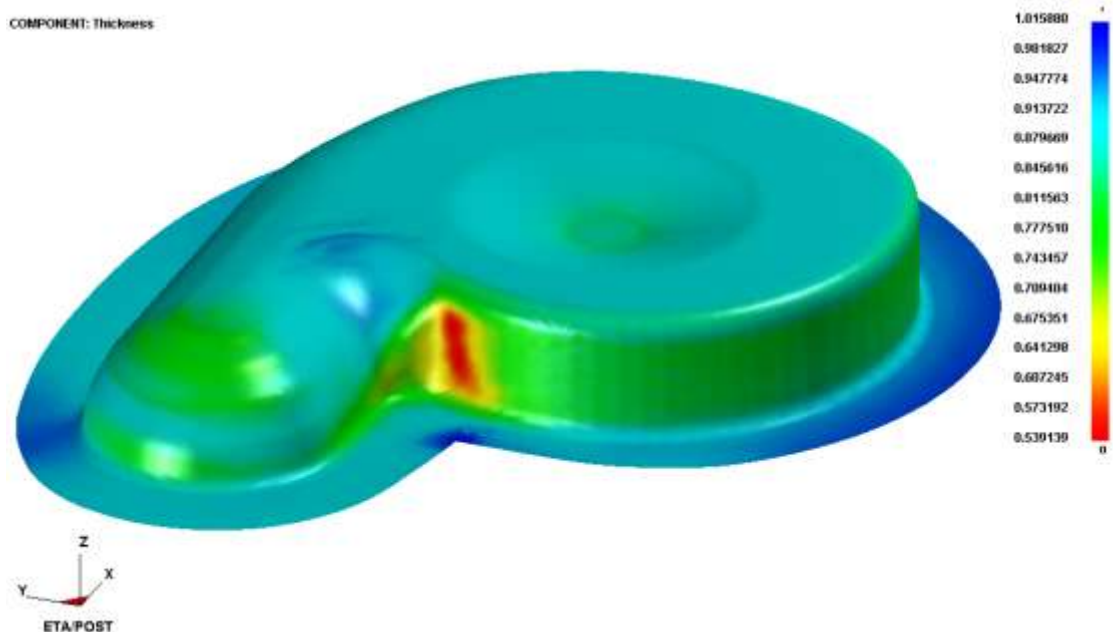
### 6.8.4 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN



Obr. 6.32 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli St 4 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

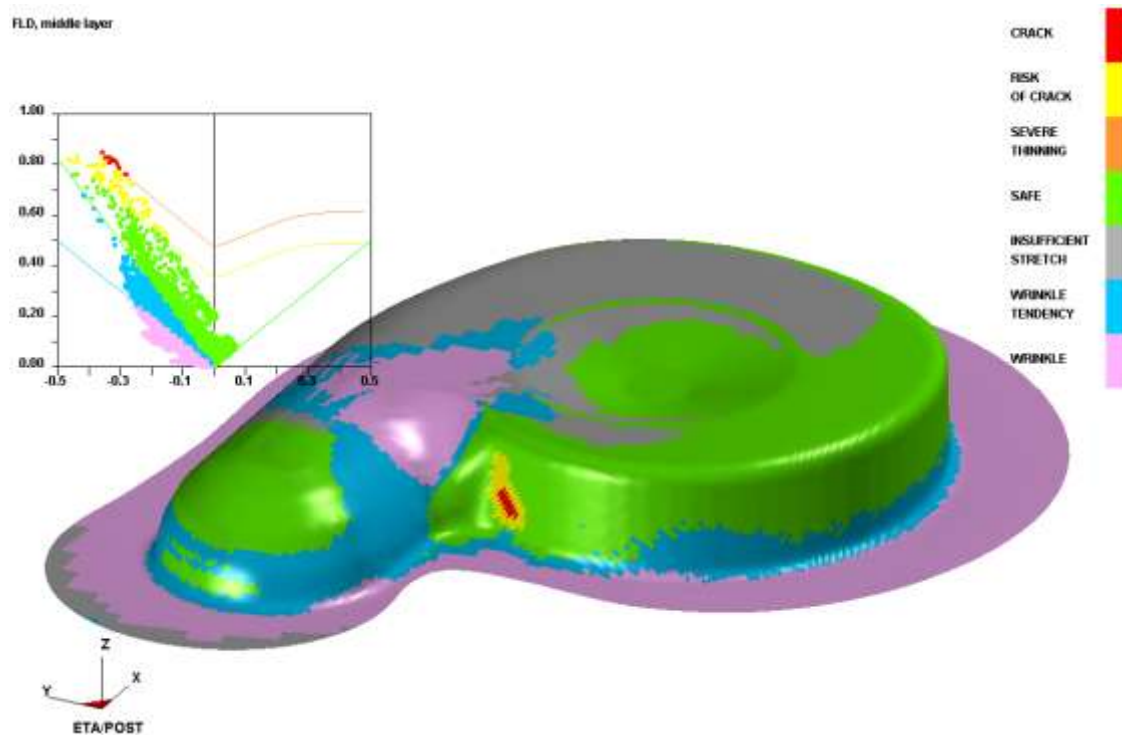


Obr. 6.33 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli St 4

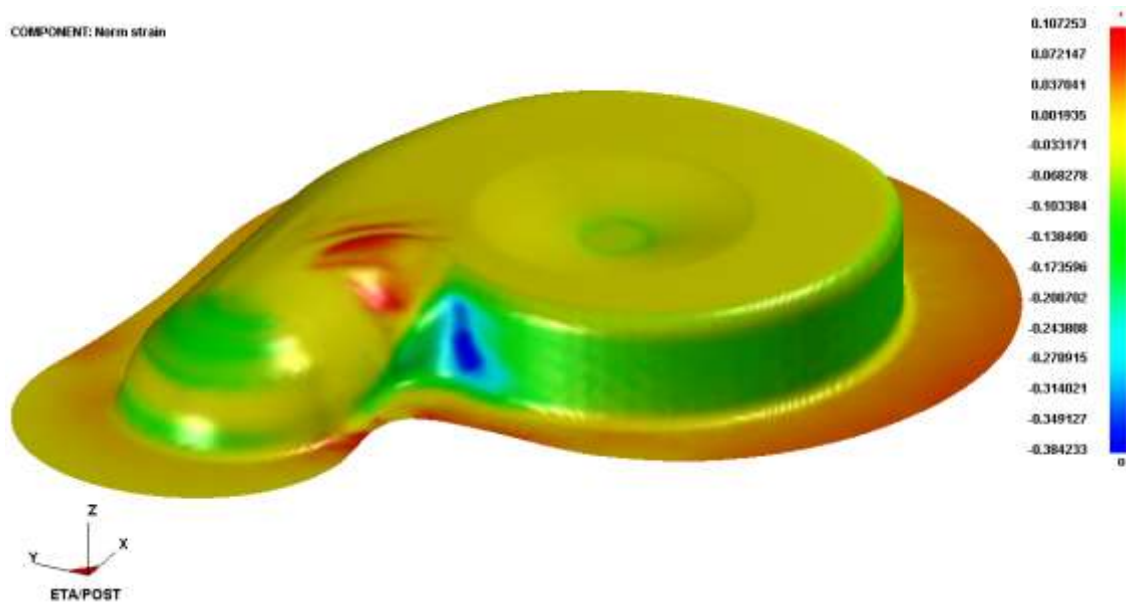


Obr. 6.34 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli St 4

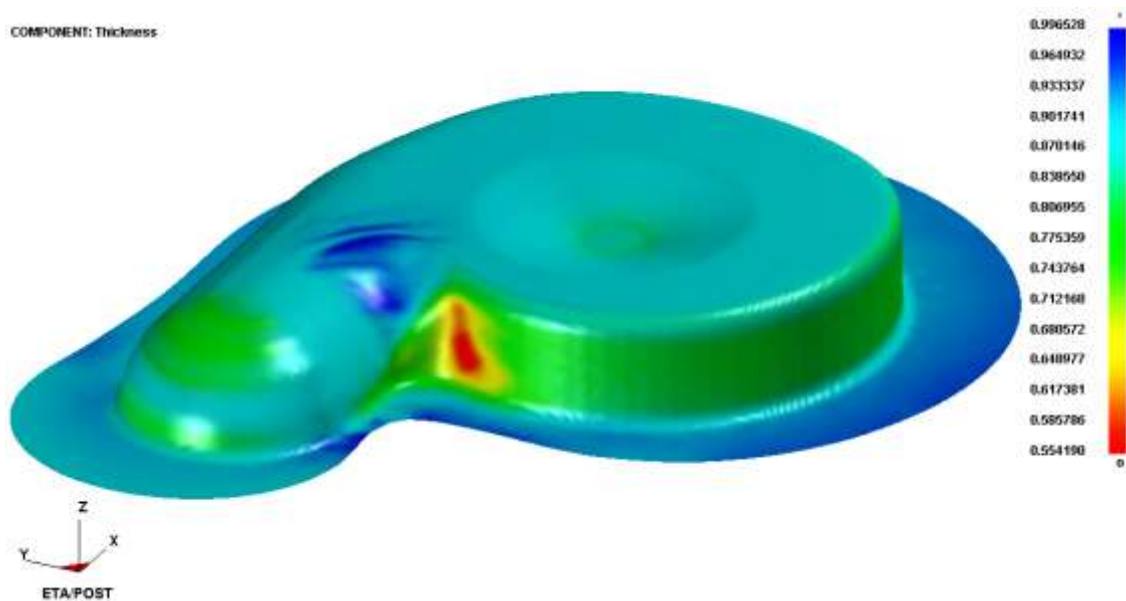
### 6.8.5 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2



Obr. 6.35 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli St 4 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



Obr. 6.36 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli St 4



Obr. 6.37 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli St 4

## 6.9 Vyhodnocení výsledků simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru z oceli St 4

Na výtažky byly použity opět stejné tři analýzy výsledků jako v kap. 6.7, podle kterých byly výsledky mezi sebou porovnávány a hodnoceny. Výsledky za použití všech analýz jsou v této kapitole jednotlivě rozebrány. Výsledné hodnoty z analýzy diagramu mezních deformací, normálového napětí a tloušťky plechu na výtažku se s použitím různých přístřihů liší, místo nad poloměrem 12 mm zůstává kritické za použití všech přístřihů.

### a) Diagram mezních deformací („FLD“)

Na výtažku taženém ze všech přístřihů byla v ETA/Post-Processoru použita analýza diagramu mezních deformací (obr. 6.23, obr. 6.26, obr. 6.29, obr. 6.32 a obr. 6.35), jejíž funkce byla blíže popsána v kap. 6.7. Z velké části na výtažku taženém z oceli St 4 opět převládá bezpečná oblast vykreslená zeleně (SAFE). Místo pod přidržovačem a v oblasti pod kritickým místem je u všech modelů z různých přístřihů vyznačeno růžovou barvou s označením WRINKLE (zvrásnění). U všech modelů se také na stejném místě (blízko poloměru 12 mm) objevuje červeně vyznačené hlášení o prasklině (CRACK). Kolem tohoto místa program žlutě znázorňuje nebezpečí vzniku praskliny (RISK OF CRACK) nebo oranžově oblast vážného ztenčení (SEVERE THINNING). U stávajícího přístřihu (obr. 6.23) je červené místo největší, je však mnohem menší u výtažku z oceli St 4 než u výtažku z oceli DC04 (obr. 6.6). S použitím vhodnějších přístřihů pro levý kryt ventilátoru se oblast praskliny zmenšuje a u přístřihu stanoveného softwarem pomocí BSE modulu (obr. 6.35) je prasklina nejmenší. Výtažek tažený z přístřihu vytvořeného metodou řezů po korekci polohy (obr. 6.29) dokonce nevykazuje vznik praskliny, v kritickém místě se objevuje pouze žlutě značená oblast s varováním nebezpečí vzniku praskliny.

### b) Normálové napětí („Norm Strain“)

Hodnoty maximálního a minimálního normálového napětí se na výtažcích pohybují různě (obr. 6.24, obr. 6.27, obr. 6.30, obr. 6.33, obr. 6.36). U stávajícího přístřihu (obr. 6.24) je maximální hodnota normálového napětí  $0,1018 \cdot 10^9$  Pa, u optimálního přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN (obr. 6.33) je hodnota maximálního normálového napětí  $0,1288 \cdot 10^9$  Pa. Největší hodnotu maximálního normálového napětí

vykazuje výtažek vytažený z přístříhu dle ČSN (obr. 6.27), a to  $0,1557 \cdot 10^9$  Pa. Nejmenšího maximálního normálového napětí dosahuje výtažek ze stávajícího přístříhu. Těchto maximálních normálových napětí však výlisky dosahují jen na přírubě, v rozích přístříhu a hlavně v místě zvrásnění. U výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů s korigovanou polohou a u přístříhu vytvořeného pomocí BSE modulu dochází k největšímu zvrásnění v místě pod poloměrem 12 mm.

### c) Tloušťka („Thickness“)

Tloušťka plechu se na většině plochy výtažků pohybuje okolo hodnoty 0,9 mm (obr. 6.25, obr. 6.28, obr. 6.31, obr. 6.34, obr. 6.37). Místy na výtažcích dochází ke ztenčení, například dno výtažku je ve všech případech mírně ztenčeno, tloušťka dna se pohybuje okolo 0,85 mm. Nejmenší tloušťka plechu se na výtažku objevuje v okolí místa s poloměrem 12 mm, kde dochází k prasknutí, a to platí skoro u všech výlisků (výtažek sestrojeno metodou řezů vykazuje pouze nebezpečí vzniku praskliny, ne vznik praskliny). Nejmenší tloušťku v tomto místě vykazuje výtažek ze stávajícího přístříhu, minimální tloušťka je 0,3542 mm (obr. 6.25). V místě praskliny má největší tloušťku plechu výtažek z přístříhu vytvořeného metodou řezů po korekci polohy, a to 0,5884 mm (obr. 6.31). U tohoto přístříhu ale dochází k velkému zvrásnění v místě pod kritickým místem, kde se naopak plech pěchuje a tloušťka se zvětšuje. Optimální přístřih má celkové rozmezí hodnot tloušťky 0,5391 mm ÷ 1,0158 mm (obr. 6.34). Maximální tloušťku na výtažku z přístříhu sestrojeno metodou využívající TMSN, 1,0158 mm, lze najít v přírubě nad místem s poloměrem 12 mm, plech je tu držen přídržovačem a vlivem tažení přístříhu zde dochází k napěchování materiálu. Hodnoty tloušťky plechu z oceli St 4 jsou mírně nižší než u plechu z oceli DC04, u výtažku taženého z optimálního přístříhu se však jedná pouze o setiny milimetru

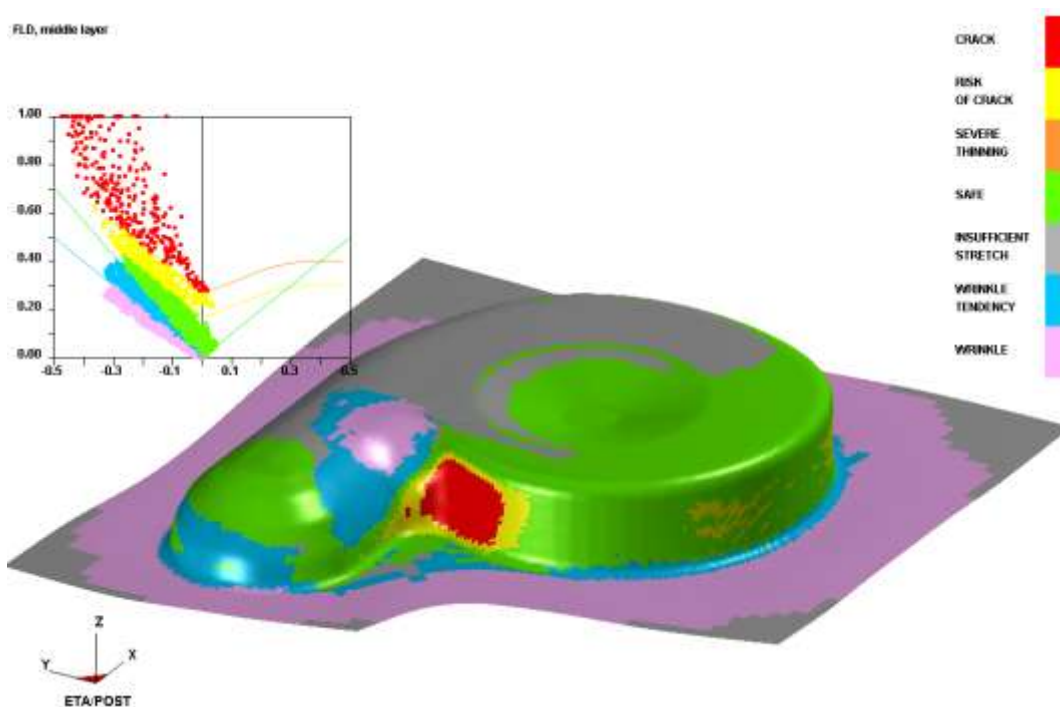
Po celkovém shrnutí výsledků simulace tažení výtažku z oceli St 4 lze konstatovat a všechny použité analýzy výsledků to potvrzují, že ocel St 4 je pro levý kryt ventilátoru vhodná a je dobrou alternativou pro ocel DC04. V případě tažení výtažku ze stávajícího přístříhu z oceli St 4 byla dle počítačové simulace prasklina v kritickém místě menší, ale v případě tažení výtažku z optimálního přístříhu sestrojeno s využitím TMSN by bylo vhodnější použít stávající ocel DC04.



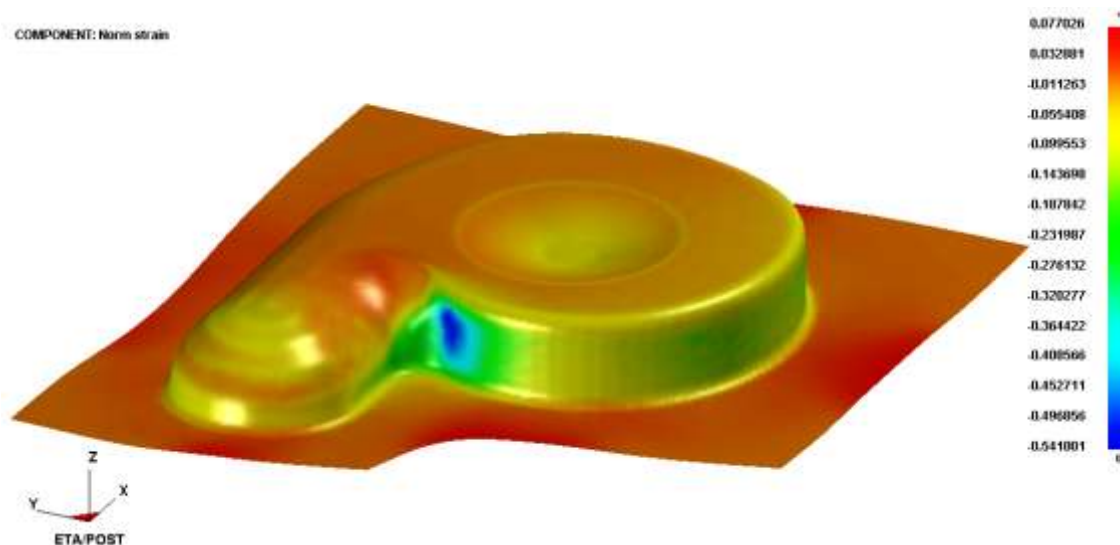
## 6.10 Simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z oceli IF-Stahl

Výsledky simulace jsou rozděleny podle použitého přístřihu do jednotlivých kapitol. U každého přístřihu byly použity tytéž analýzy, aby zde byla možnost porovnání výsledků.

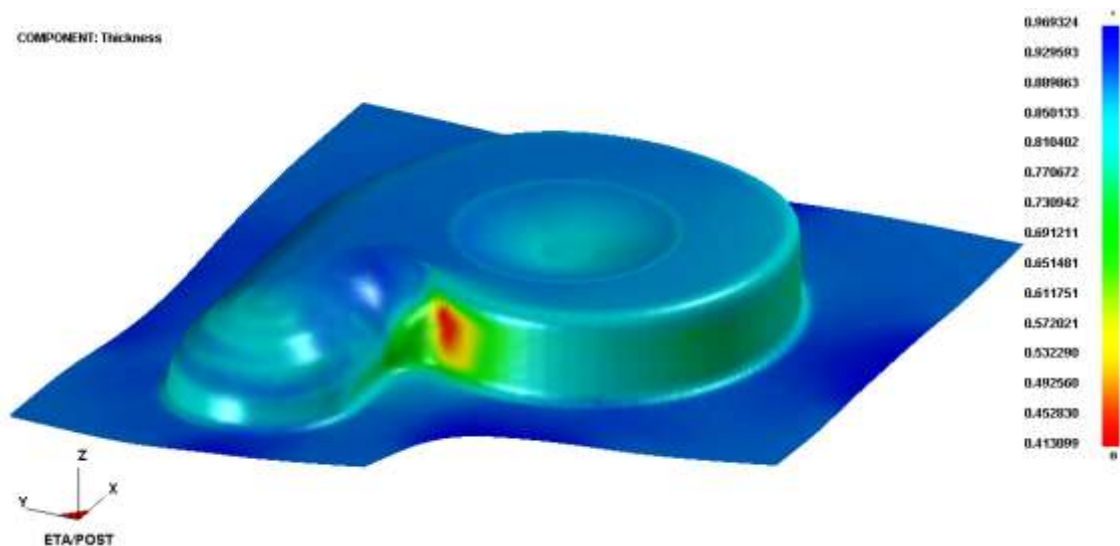
### 6.10.1 Simulace tažení levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu



Obr. 6.38 Rozbor napětí na výtažku taženém ze stávajícího přístřihu z oceli IF-Stahl a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

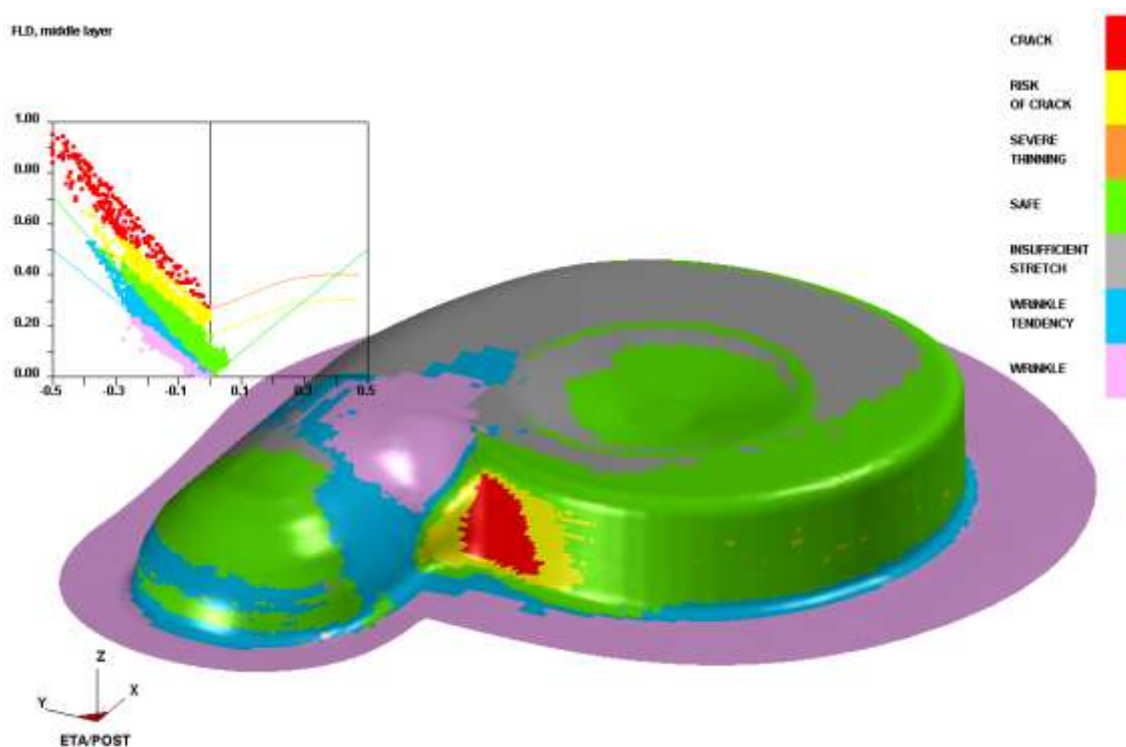


Obr. 6.39 Normálové napětí ve výtažku taženém ze stávajícího přístřihu z oceli IF-Stahl

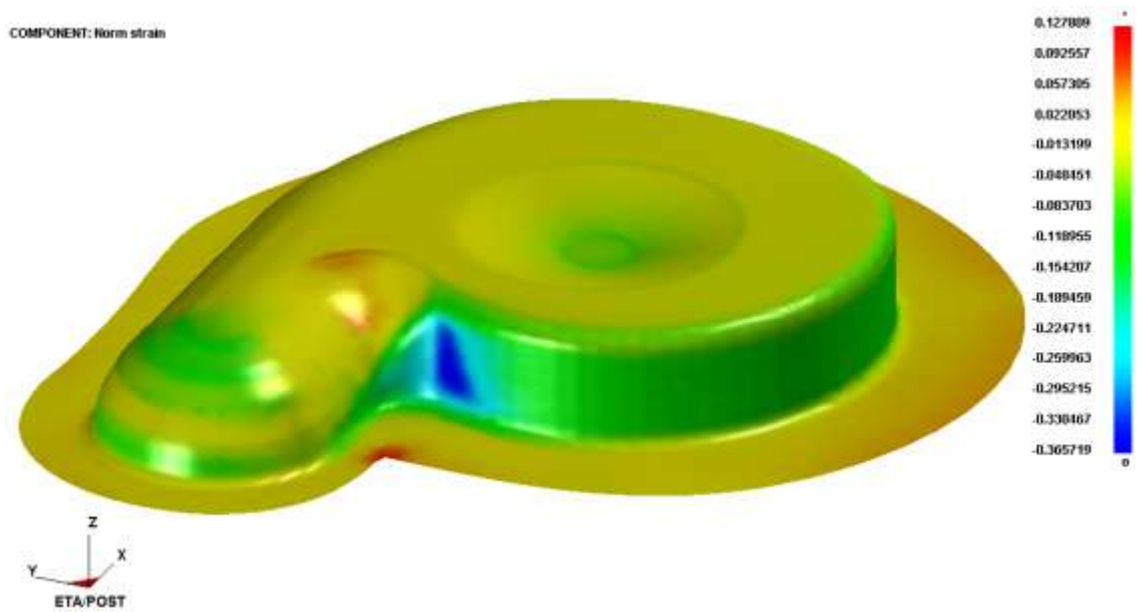


Obr. 6.40 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém ze stávajícího přístříhu z oceli IF-Stahl

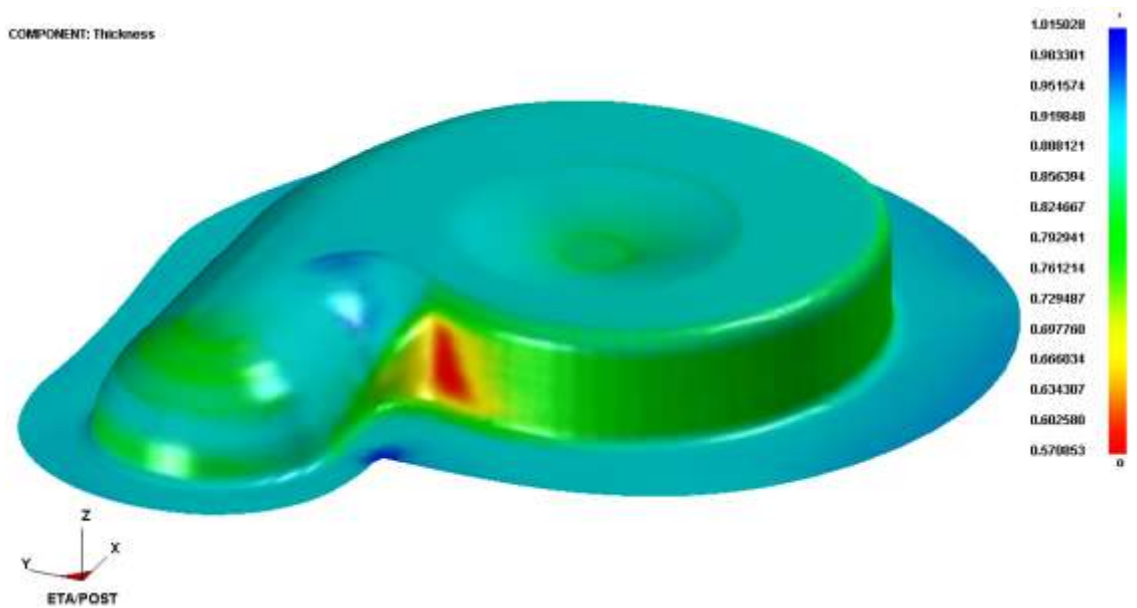
### 6.10.2 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného dle ČSN 22 7303



Obr. 6.41 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu dle ČSN 22 7303 z oceli IF-Stahl a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

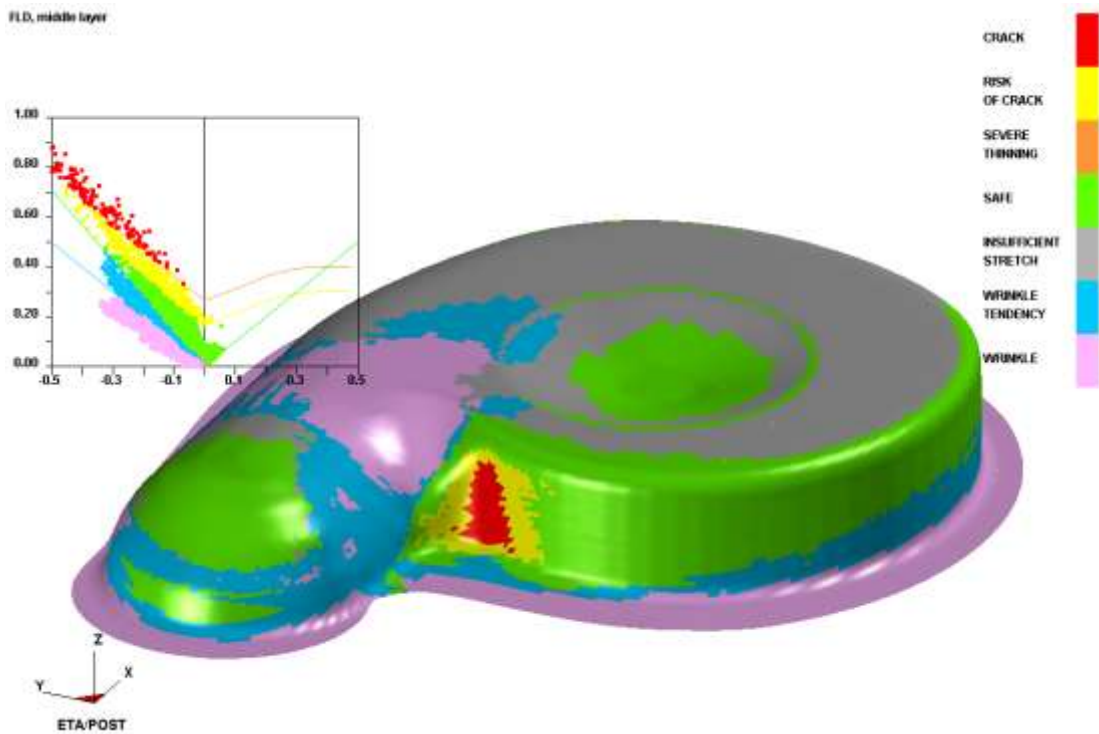


Obr. 6.42 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303  
z oceli IF-Stahl

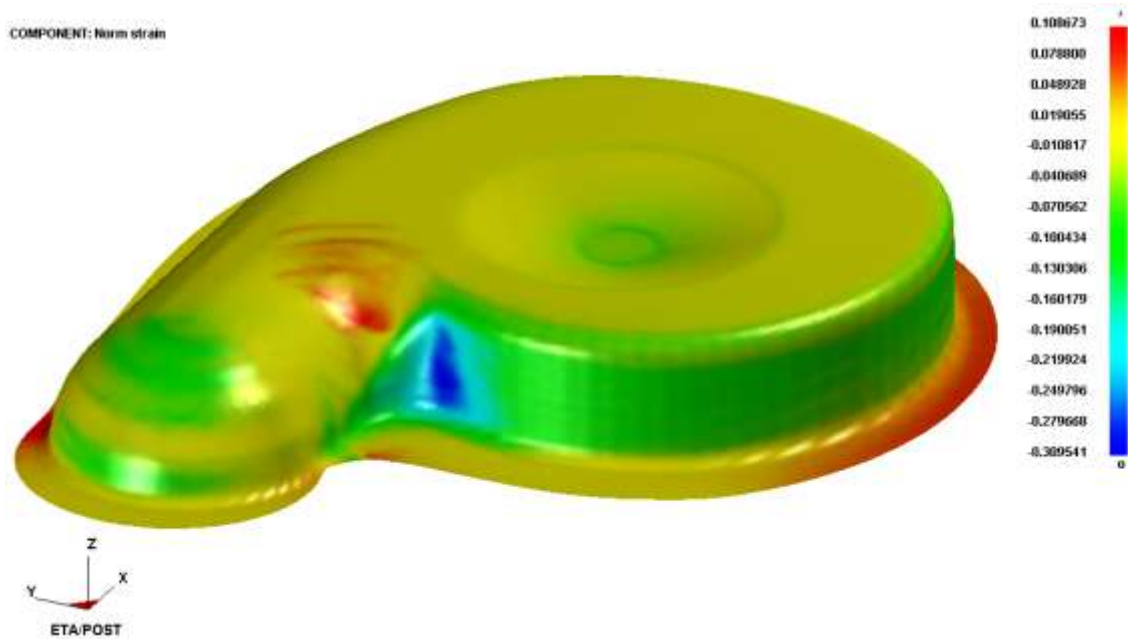


Obr. 6.43 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303  
z oceli IF-Stahl

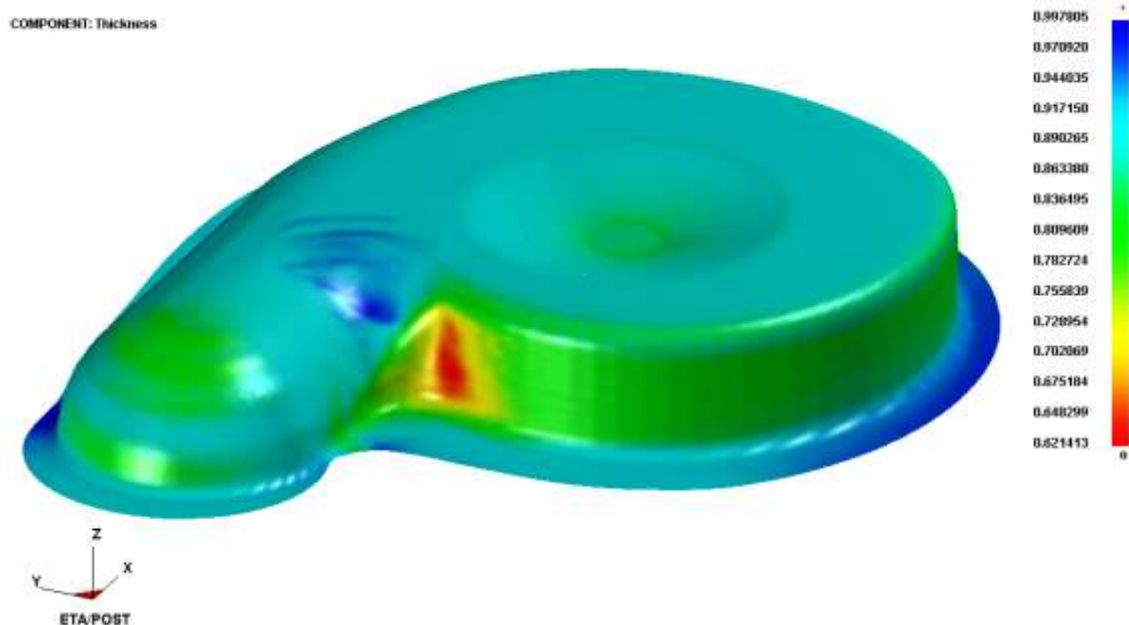
### 6.10.3 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy



Obr. 6.44 Rozbor napětí na výtazku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy z oceli IF-Stahl a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

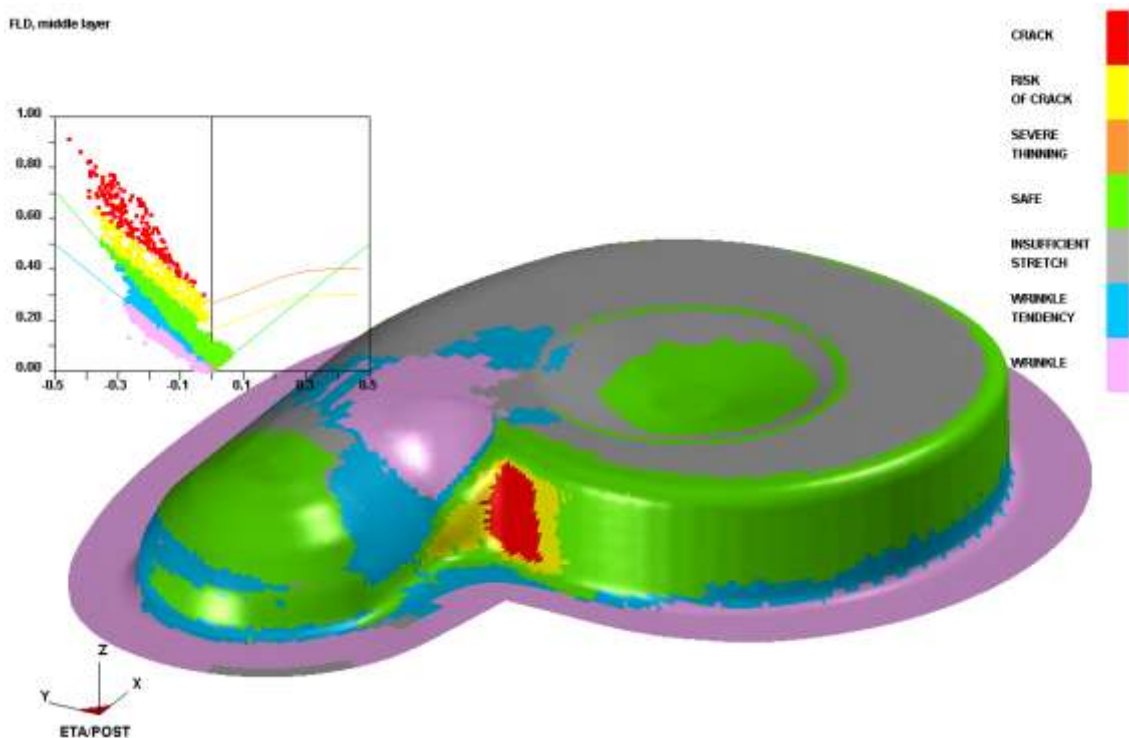


Obr. 6.45 Normálové napětí ve výtazku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy přístříhu z oceli IF-Stahl

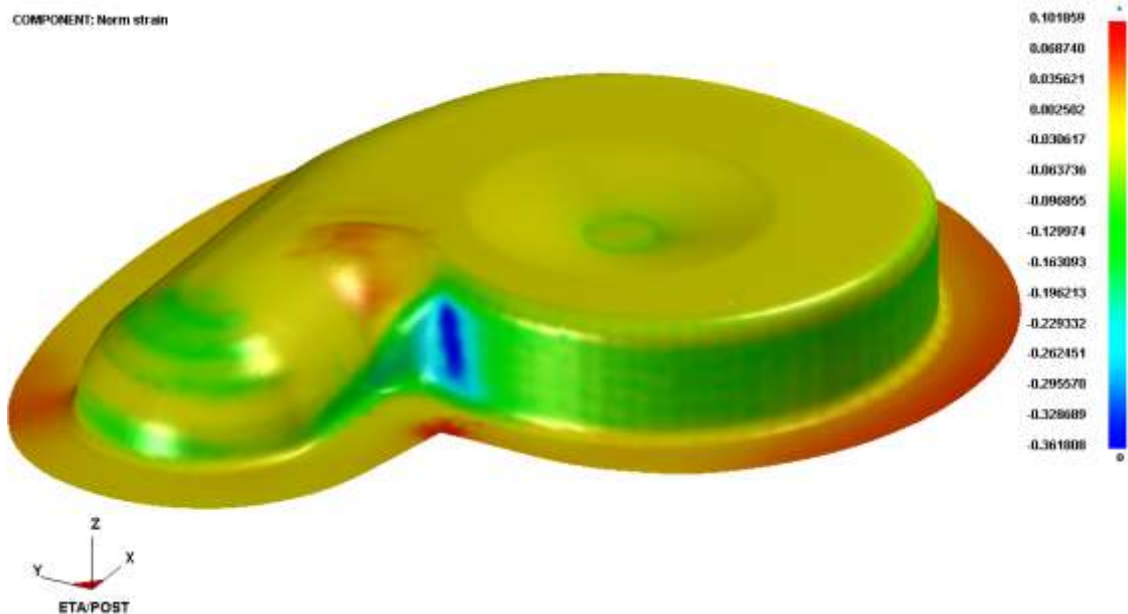


Obr. 6.46 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy přístříhu z oceli IF-Stahl

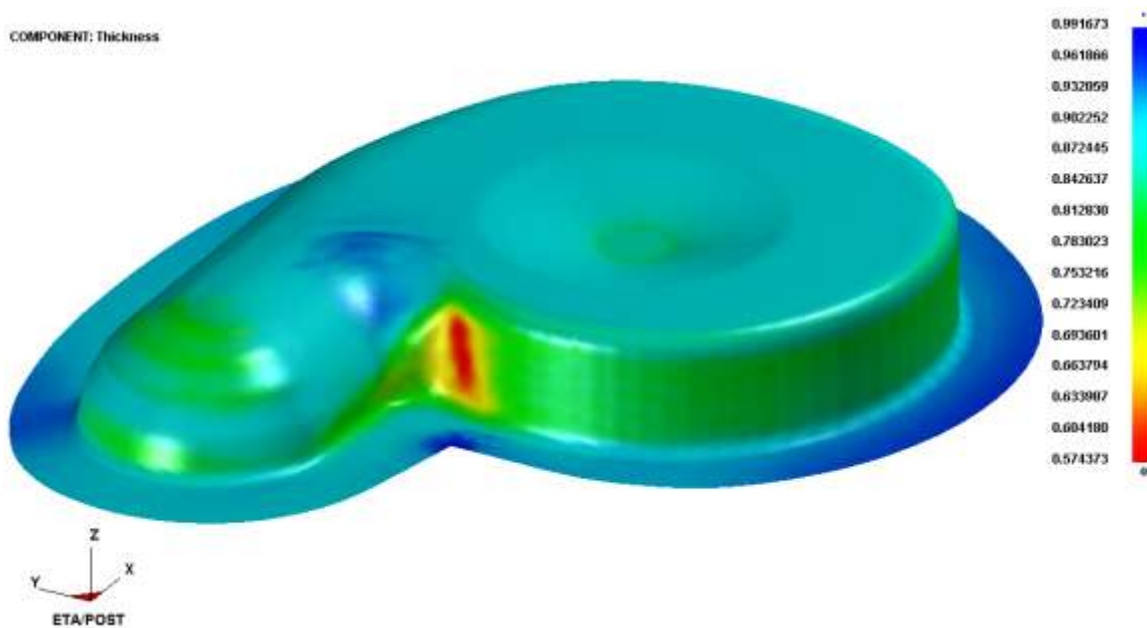
#### 6.10.4 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN



Obr. 6.47 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli IF-Stahl a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

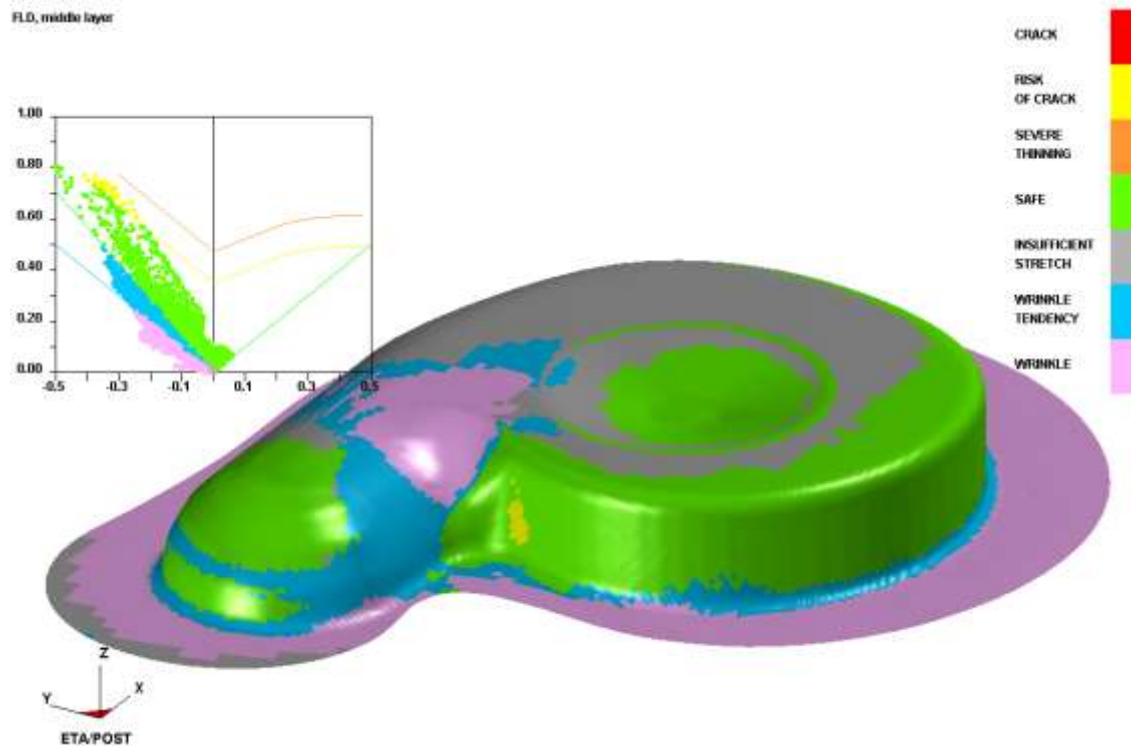


Obr. 6.48 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli IF-Stahl

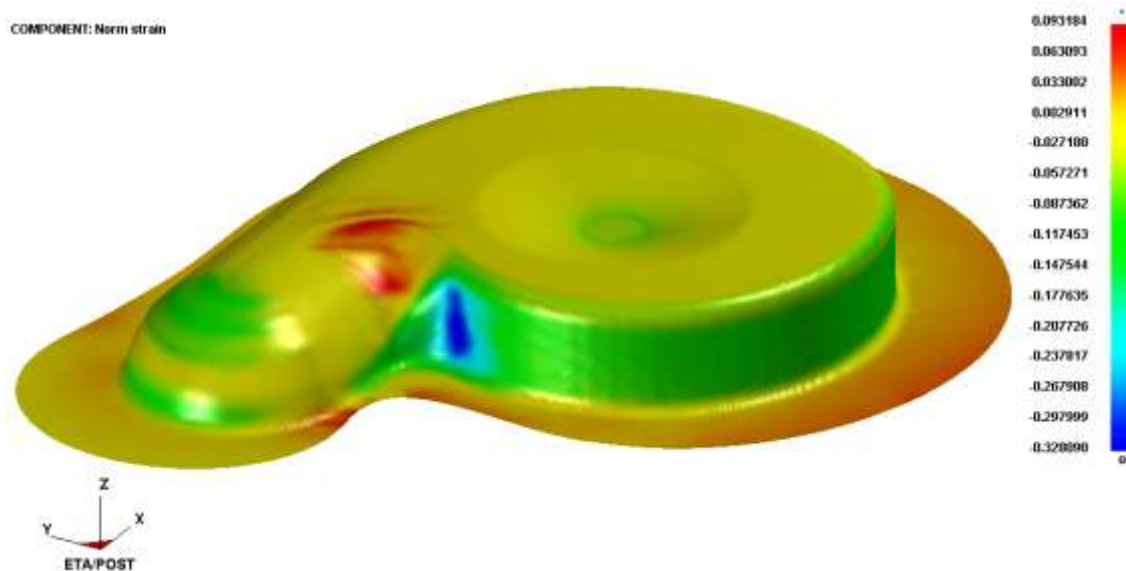


Obr. 6.49 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN z oceli IF-Stahl

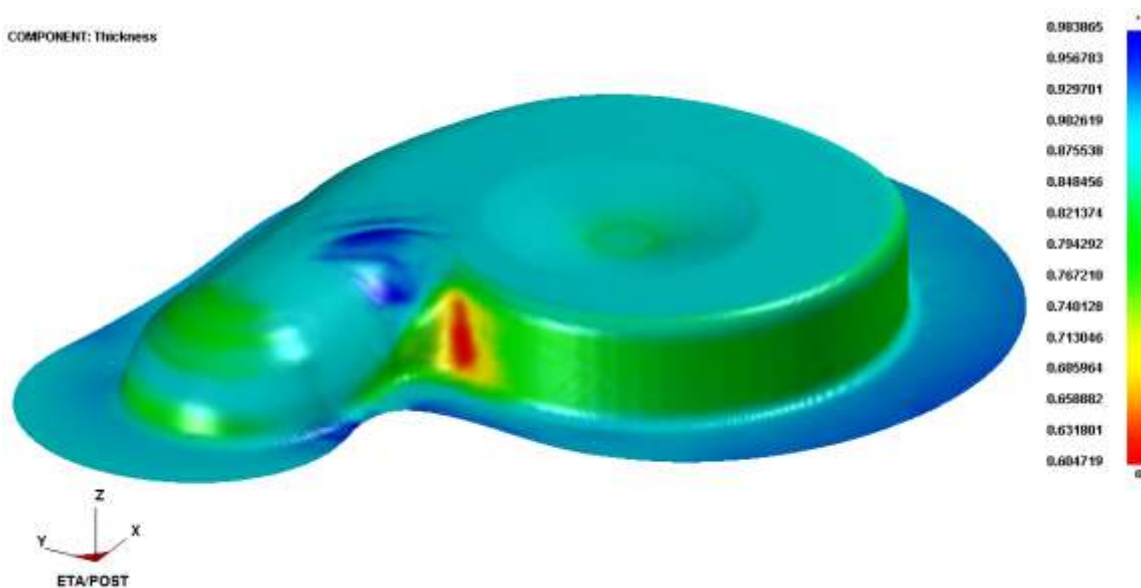
### 6.10.5 Simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2



Obr. 6.50 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli IF-Stahl a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



Obr. 6.51 Normálové napětí ve výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli IF-Stahl



Obr. 6.52 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu z oceli IF-Stahl

## 6.11 Vyhodnocení výsledků simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru z oceli IF-Stahl

Na výtažky byly použity tři analýzy výsledků, podle kterých byly výsledky mezi sebou porovnávány a hodnoceny. Výsledky za použití všech analýz jsou v této kapitole jednotlivě rozebrány. Výsledné hodnoty z analýzy diagramu mezních deformací, normálového napětí a tloušťky plechu na výtažku se s použitím různých přístřihů liší, místo nad poloměrem 12 mm zůstává kritické za použití všech přístřihů.

### a) Diagram mezních deformací („FLD“)

Na výtažku taženém ze všech přístřihů byla v ETA/Post-Processoru použita analýza diagramu mezních deformací (obr. 6.38, obr. 6.41, obr. 6.44, obr. 6.47 a obr. 6.50), jejíž funkce byla blíže popsána v kap. 6.7. Z velké části na výtažku taženém z oceli IF-Stahl opět převládá bezpečná oblast vykreslená zeleně (SAFE). Místo pod přidržovačem a v oblasti pod kritickým místem je u všech modelů z různých přístřihů vyznačeno růžovou barvou s označením WRINKLE (zvrásnění). U všech modelů se také na stejném místě (blízko poloměru 12 mm) objevuje červeně vyznačené hlášení o prasklině (CRACK). Kolem tohoto místa program žlutě znázorňuje nebezpečí vzniku praskliny (RISK OF CRACK) nebo oranžově oblast vážného ztenčení (SEVERE THINNING).



U stávajícího přístřihu (obr. 6.38) je červené místo největší, jeho velikost je srovnatelná u výtažku z oceli DC04 (obr. 6.6). S použitím vhodnějších přístřihů pro levý kryt ventilátoru se oblast praskliny zmenšuje. U optimálního přístřihu pro levý kryt ventilátoru (obr. 6.47) se objevuje poměrně velká oblast vzniku praskliny. Přístřih stanovený softwarem pomocí BSE modulu (obr. 6.50) nevykazuje vznik praskliny, v kritickém místě se objevuje pouze malá, žlutě značená oblast s varováním nebezpečí vzniku praskliny.

#### b) Normálové napětí („Norm Strain“)

Hodnoty maximálního a minimálního normálového napětí se na výtažcích pohybují opět různě (obr. 6.39, obr. 6.42, obr. 6.45, obr. 6.48, obr. 6.51). U stávajícího přístřihu (obr. 6.39) je maximální hodnota normálového napětí  $0,077 \cdot 10^9$  Pa, u optimálního přístřihu sestrojného metodou využívající TMSN (obr. 6.48) je hodnota maximálního normálového napětí  $0,1018 \cdot 10^9$  Pa. Největší hodnotu maximálního normálového napětí vykazuje opět výtažek vytažený z přístřihu dle ČSN (obr. 6.42), a to  $0,1278 \cdot 10^9$  Pa. Nejmenšího maximálního normálového napětí dosahuje výtažek ze stávajícího přístřihu. Těchto maximálních normálových napětí však výlisky dosahují jen na přírubě, v rozích přístřihu a hlavně v místě zvrásnění. U výtažku z přístřihu stanoveného metodou řezů s korigovanou polohou a u přístřihu vytvořeného pomocí BSE modulu dochází k největšímu zvrásnění v místě pod poloměrem 12 mm.

#### c) Tloušťka („Thickness“)

Tloušťka plechu se na většině plochy výtažků pohybuje okolo hodnoty 0,9 mm (obr. 6.40, obr. 6.43, obr. 6.46, obr. 6.49, obr. 6.52). Místy na výtažcích dochází ke ztenčení, například dno výtažku je ve všech případech mírně ztenčeno, tloušťka dna se pohybuje okolo 0,85 mm. Nejmenší tloušťka plechu se na výtažku objevuje v okolí místa s poloměrem 12 mm, kde dochází k prasknutí, a to platí skoro u všech výlisků (výtažek sestrojný pomocí BSE modulu vykazuje pouze nebezpečí vzniku praskliny, ne vznik praskliny). Nejmenší tloušťku v tomto místě vykazuje výtažek ze stávajícího přístřihu, minimální tloušťka je 0,4131 mm (obr. 6.40). V místě praskliny má největší tloušťku plechu výtažek z přístřihu vytvořeného metodou řezů po korekci polohy, a to 0,6214 mm (obr. 6.46). U tohoto přístřihu ale dochází k poměrně velkému zvrásnění v místě pod kritickým místem, kde se naopak plech pěchuje a tloušťka se zvětšuje. Optimální přístřih má celkové rozmezí hodnot tloušťky  $0,5743 \text{ mm} \div 0,9916 \text{ mm}$  (obr. 6.49), míra napěchování je tedy v tomto případě (ocel IF-Stahl) nejmenší ze všech tří

použitých ocelí. Maximální tloušťku na výtažku z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN, 0,9916 mm, lze najít v přírubě nad místem s poloměrem 12 mm, plech je tu držen přídržovačem a vlivem tažení přístřihu zde dochází k napěchování materiálu. Hodnoty tloušťky plechu na finálním výtažku z oceli IF-Stahl jsou pozitivnější než u plechu z oceli DC04 a St 4.

Po celkovém shrnutí výsledků simulace tažení výtažku z oceli IF-Stahl lze konstatovat a všechny použité analýzy výsledků to potvrzují, že ocel IF-Stahl je pro levý kryt ventilátoru vhodná a je dobrou alternativou pro ocel DC04. V případě tažení výtažku ze stávajícího přístřihu taženého z oceli IF-Stahl byla dle počítačové simulace prasklina v kritickém místě srovnatelná s výtažkem z oceli DC04, v případě tažení výtažku z optimálního přístřihu byl výsledek simulace tažení z oceli IF-Stahl vyhodnocen jako nejhorší varianta ze všech tří použitých ocelí.

## **7 Stanovení napět'ových a kinematických poměrů ve výtažku pomocí metody charakteristik a metody deformačních sítí**

Každý tvarově složitý výtažek se vyrábí s určitým procentem zmetkovitosti. Již při navrhování technologického procesu výroby je ale možno tuto zvýšenou zmetkovitost omezit zjišťováním napět'ových a kinematických poměrů ve výtažku. Poté je možno provést korekci tvaru výtažku, tvaru a velikosti přístřihu nebo změnit napět'ové a kinematické poměry použitím brzdících lišt nebo žeber v oblasti přidržovače. K řešení napět'ových a kinematických poměrů se využívá metody charakteristik (viz kap. 7.1).

Vyšetření stavu napjatosti a deformací plechu je nutné pro výzkum procesů plošného tváření. K tomuto účelu se využívá metoda deformačních sítí (viz kap. 7.2).

### **7.1 Metoda charakteristik**

Pomocí metody charakteristik lze stanovit napět'ové poměry v přírubě výtažku. Metoda využívá vzájemné shodnosti kluzových čar, které se objeví na tělese při deformaci s charakteristikami parciálních diferenciálních rovnic, které jsou výsledkem matematického řešení. Metoda charakteristik však musí vycházet z určitých zjednodušujících předpokladů, a to:

- existuje pouze rovinná deformace ( $\sigma_3 = 0$ ), při které se předpokládá, že posuvy probíhající v tvářeném objemu probíhají pouze rovnoběžně s určitou rovinou a posuvy kolmé k této rovině jsou nulové,
- tažník a tažnice jsou zcela tuhé,
- tvářený materiál je stejnorodý, izotropní, zcela tuhý v pružném stavu, čistě plastický, nezpevňuje se v plastickém stavu, v celém objemu je splněna podmínka plasticity.

### 7.1.1 Vlastnosti charakteristik a matematické odvození napět'ových poměrů při tažení

Síť charakteristik musí vyhovovat následujícím podmínkám:

- musí být spojitá,
- obě soustavy charakteristik musí být ortogonální,
- musí protínat směry hlavních napětí pod úhlem 45° (obr. 7.1).

Matematické odvození diferenciálních rovnic TMSN vychází z rovnic rovnováhy pro rovinný stav napjatosti při zanedbání objemových a setrvačných sil (7.1, 7.2) [10].

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (7.2)$$

Za složky napětí  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  se do těchto rovnic dosadí vztahy vyjádřené z Mohrovy kružnice a po úpravě se získá soustava dvou parciálních diferenciálních rovnic 1. řádu [10]:

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial x} - 2k \cdot \left( \cos 2\varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sin 2\varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (7.3)$$

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial y} + 2k \cdot \left( \cos 2\varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \sin 2\varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = 0 \quad (7.4)$$

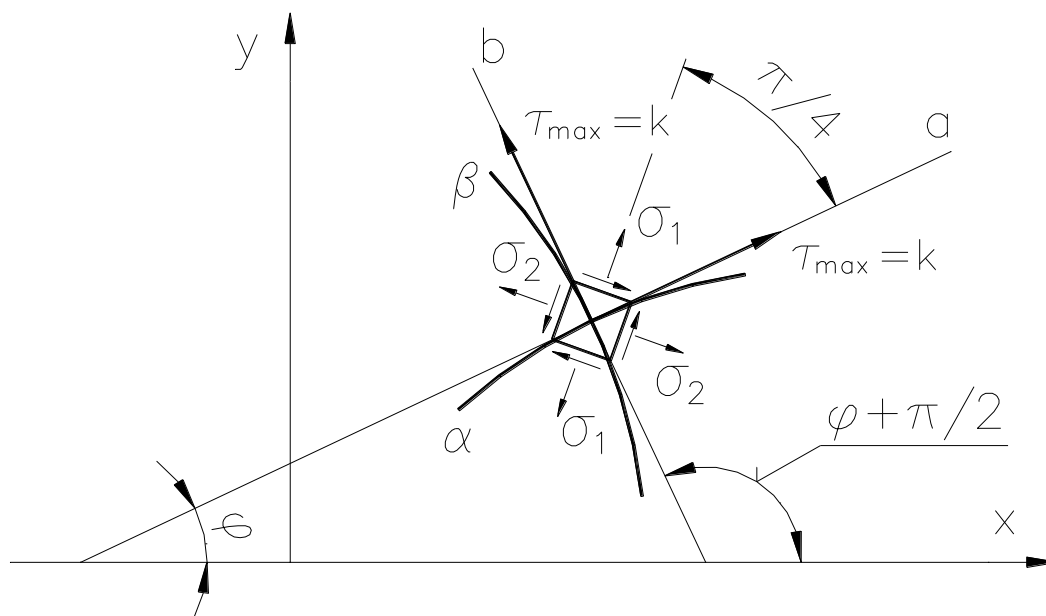
kde je  $k$  – materiálová konstanta [MPa], která udává velikost poloměru Mohrovy kružnice, je dána podmínkou plasticity dle SVT nebo energetickou podmínkou plasticity HMM.

Po vyřešení této soustavy dvou parciálních diferenciálních rovnic 1. řádu se získají dvě rovnice TMSN ve tvaru [10]:

$$\left( \frac{dy}{dx} \right)_\alpha = \operatorname{tg} \varphi \quad (7.5)$$

$$\left( \frac{dy}{dx} \right)_\beta = -\operatorname{cotg} \varphi$$

Podle těchto rovnic (7.5) je síť TMSN tvořena dvěma osnovami  $\alpha$  a  $\beta$  (obr. 7.1). TMSN jsou tedy spojitě, ortogonální a protínají směry hlavních napětí pod úhlem  $45^\circ$ .



Obr. 7.1 Znárodnění dvou osnov sítě TMSN  $\alpha$  a  $\beta$

Další podmínkou, které musí síť charakteristik vyhovovat je to, že musí splňovat Henckeho teorémy. Matematická formulace prvního Henckeho teorému umožňuje stanovit velikost napětí v libovolném bodě sítě TMSN ze známé hodnoty středního napětí  $\sigma_s$  v jednom bodě sítě TMSN.

Umístí-li se souřadnicový systém tak, aby osy x a y splynuly se směry a a b, bude úhel  $\varphi = 0^\circ$ . Rovnice (7.3) a (7.4) lze přepsat do tvaru [10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \sigma_s - 2 \cdot k \cdot \varphi = 0 \tag{7.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \sigma_s + 2 \cdot k \cdot \varphi = 0$$

Využitím shodnosti os x, y se směry a, b lze pak rovnice (7.6) derivovat podle oblouků TMSN  $\alpha$  a  $\beta$  [10]:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \sigma_s - 2 \cdot k \cdot \varphi = 0 \quad (7.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \sigma_s + 2 \cdot k \cdot \varphi = 0$$

Integrací rovnic (7.7) se získají vztahy [10]:

$$\sigma_s - 2 \cdot k \cdot \varphi = \text{konst.} ; \quad \alpha = \text{konst.} \quad (7.8)$$

$$\sigma_s + 2 \cdot k \cdot \varphi = \text{konst.} ; \quad \beta = \text{konst.}$$

Tyto vztahy (7.8) jsou matematickou formulací prvního Henckova teorému.

Poslední podmínkou pro síť charakteristik je splnění okrajových podmínek. Podle velikosti tečného napětí existují tři alternativy řešení okrajových podmínek pro charakteristiky, dotýkající se obrysu tělesa:

- je-li na volné části tvářeného tělesa nebo na stykové ploše nástroje s materiálem tečná složka napětí  $\tau_{xy} = 0$ , pak z rovnice  $\tau_{xy} = k \cdot \cos 2\varphi$  plyne, že úhel  $\varphi = 45^\circ$ , tzn. že charakteristiky svírají s obrysem tělesa úhel  $45^\circ$ ,
- při maximální hodnotě tečného napětí  $\tau_{xy} = \tau_{\max} = k$  je  $\cos 2\varphi = 1$ , pak charakteristiky svírají s obrysem tělesa úhel  $\varphi = 0$  a  $\varphi = \pi/2$ ,
- je-li hodnota tečné složky napětí větší než 0 a zároveň menší než  $k$ , pak protínají charakteristiky obrys tělesa pod úhlem  $\varphi$ , vypočteným z rovnice  $\tau_{xy} = k \cdot \cos 2\varphi$ .

### 7.1.2 Vyšetření a vyhodnocení napět'ových poměrů při tažení výtažku

Vyšetření napět'ových poměrů při tažení výtažku levého krytu ventilátoru bylo provedeno na výtažku taženém ze stávajícího přístřihu (příloha A2.2, výkres KMT-01-01) a z optimálního přístřihu (přístřih sestrojený metodou využívající TMSN, příloha A2.8, výkres KMT-01-07). Pro porovnání stávajícího a optimálního přístřihu z hlediska napjatosti při tažení byla využita příloha A2.7 (KMT-01-06), ve které je nakreslena síť TMSN i oba zmíněné tvary přístřihů.

Na základě sestavené sítě TMSN a s využitím okrajové podmínky pro napětí lze vypočítat napětí v libovolném bodě přístřihu pod přidržovačem při tažení.

V nakreslené síti TMSN byly označeny průsečíky sítě s obrysy obou přístřihů, byly zde změřeny úhly obratu  $\varphi$  TMSN a úhly  $\alpha$ , pod kterými TMSN protíná obrys přístřihu. Pro oba přístřihy byl vyhledán bod obrysu, kterému odpovídá největší úhel obratu TMSN  $\varphi_{\max}$ . Pro tento bod platí okrajová podmínka pro střední napětí:

$$\sigma_s = -k \quad (7.9)$$

Z největšího úhlu obratu TMSN byla s využitím Henckeho teorému (7.8) vypočtena velikost středního napětí na obrysu oblasti kontaktu tažníku s přístřihem na počátku tažení (vnitřní obrys sítě TMSN), která se vlivem tření mezi tažníkem a plechem přemísťuje v procesu tažení rychlostí rovnou rychlosti pohybu tažníku. Z této hodnoty pak byly opět s využitím Henckeho teorému vypočteny hodnoty středních napětí v jednotlivých bodech přístřihu daných úhly obratu TMSN. Hodnoty radiálního napětí  $\sigma_r$  a tangenciálního napětí  $\sigma_t$  byly pro jednotlivé body vypočteny z hodnoty středního napětí  $\sigma_s$  s využitím rovnic, vyplývajících z Mohrovy kružnice pro rovinnou napjatost:

$$\sigma_r = \sigma_s + k \quad (7.10)$$

$$\sigma_t = \sigma_s - k$$

Z naměřených úhlů  $\alpha$ , pod kterými protínají TMSN obrys přístřihu, byly vypočteny velikosti smykových napětí  $\tau$  v jednotlivých bodech obrysu přístřihu dle rovnice:

$$\tau = k \cdot \cos 2\alpha \quad (7.11)$$

Úhly obratu  $\varphi$  TMSN, úhly  $\alpha$ , pod kterými TMSN protíná obrys přístřihu, vypočtené hodnoty středních napětí  $\sigma_s$ , radiálních napětí  $\sigma_r$ , tangenciálních napětí  $\sigma_t$  a smykových napětí  $\tau_{xy}$  pro oba přístřihy byly seřazeny do tabulek a nacházejí se v příloze A3.1 pro stávající přístřih a v příloze A3.2 pro optimální přístřih. Z těchto hodnot byly vykresleny grafy průběhů napětí na obrysu přístřihů, v příloze A3.3 se nachází graf průběhů napětí pro stávající přístřih a pro optimální přístřih v příloze A3.4.

Vyhodnocení napět'ových poměrů výtažku pro oba přístřihy:

a) Stávající přístřih

Při tažení výtažku ze stávajícího přístřihu vzniká na obrysu přístřihu smykové napětí  $\tau$ , které se po celém obvodě pohybuje v kladných i záporných hodnotách (viz příloha A3.1). Největších záporných hodnot, minim, si lze všimnout v bodech, které náležejí rohům přístřihu, hodnoty smykového napětí zde dosahují až k -0,286 MPa. V těchto místech jsou zároveň největší tlaková střední napětí  $\sigma_s$ , která místy dosahují až -0,482 MPa. Největší tahová radiální napětí ( $\sigma_r = 0,984$  MPa) jsou v přímkové části vnitřního obrysu sítě TMSN.

b) Optimální přístřih

Smyková napětí se na obrysu přístřihu při tažení netvoří (příloha A3.2). Je to dáno tím, že optimální přístřih je sestrojený metodou využívající TMSN a tyto trajektorie maximálních smykových napětí protínají obrys pod úhlem  $\pm 45^\circ$ . Při užití vzorce 7.11 pro výpočet smykových napětí je tedy zřejmé, že smyková napětí  $\tau = 0$ . Průběh středního napětí  $\sigma_s$  je vyrovnaný, hodnoty se po obrysu mírně mění. V porovnání s hodnotami u stávajícího přístřihu jsou zde hodnoty středního napětí nižší. Nejnižší hodnoty  $\sigma_s$  jsou v mírně obloukové části vnitřního obrysu sítě TMSN (přímková část výtažku), kde střední napětí dokonce dosahuje nuly. Největší tahová radiální napětí jsou jako u stávajícího přístřihu v mírně obloukové části vnitřního obrysu sítě TMSN (přímková část výtažku).

Z rozboru průběhů napjatosti stávajícího a optimálního přístřihu jasně vyplývá, že při tažení výtažku z optimálního přístřihu jsou při tažení nižší všechna tahová napětí. Tento přístřih je tedy opravdu vhodnější pro levý kryt ventilátoru.



### 7.1.3 Matematické odvození diferenciálních rovnic charakteristik v rovině hodografu rychlostí

Podmínka plasticity při rovinné deformaci je plastickým potenciálem pro rychlosti deformací:

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2 = 4 \cdot k^2 \quad (7.12)$$

Odtud vyplývají složky tenzoru rychlostí deformací:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial x} &= \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} = 2 \cdot \lambda \cdot (\sigma_x - \sigma_y) = 4 \cdot \lambda \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \\ \frac{\partial v_y}{\partial y} &= \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} = 2 \cdot \lambda \cdot (\sigma_y - \sigma_x) = 4 \cdot \lambda \cdot (\sigma_y - \sigma_x) \end{aligned} \quad (7.13)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} = 8 \cdot \lambda \cdot \tau_{xy}$$

kde  $\lambda$  je parametr větší než 0.

Z rovnic (7.13) vyplývá vztah mezi napětím a rychlostmi deformací:

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2 \cdot \tau_{xy}} = \frac{\frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_x}{\partial x}}{\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}} = \operatorname{tg} 2\varphi \quad (7.14)$$

kde  $\varphi$  je úhel mezi směrem hlavního smykového napětí a osou x.

Rovnice (7.14) spolu s podmínkou nestlačitelnosti tvoří soustavu dvou parciálních diferenciálních rovnic 1. řádu, která popisuje kinematické poměry částic materiálu pod přídržovačem. Řešením této soustavy se získají dvě rovnice charakteristik v rovině hodografu:

$$\left(\frac{\partial v_y}{\partial v_x}\right)_{\alpha'} = -\cotg \varphi \quad (7.15)$$

$$\left(\frac{\partial v_y}{\partial v_x}\right)_{\beta'} = \tg \varphi$$

Z porovnání rovnic (7.5) s rovnicemi (7.15) je zřejmé, že sítě TMSN a charakteristik v rovině hodografu jsou vzájemně ortogonální.

Rovnice (7.15) je možno napsat ve vektorové formě:

$$d\bar{v} \cdot \bar{e} = 0 \quad (7.16)$$

$$d\bar{v} \cdot \bar{g} = 0$$

kde  $\bar{v}$  je vektor rychlosti;  $\bar{e}(\varphi)$  a  $\bar{g}(\varphi)$  jsou jednotkové vektory, které svírají úhly  $\varphi$  a  $\varphi + \pi/2$  s osou x.

Vektor rychlosti  $\bar{v}$  lze vyjádřit ve tvaru:

$$\bar{v} = \bar{e} \cdot v_{\alpha'} + \bar{g} \cdot v_{\beta'} \quad (7.17)$$

Přírůstek vektoru rychlosti:

$$d\bar{v} = \bar{e} \cdot (v_{\alpha'} - v_{\beta'}) \cdot d\varphi + \bar{g} \cdot (v_{\beta'} + v_{\alpha'}) \cdot d\varphi \quad (7.18)$$

Z rovnic (7.17) a (7.18) se získají vztahy:

$$dv_{\alpha'} - v_{\beta'} \cdot d\varphi = 0 ; \quad \beta' = \text{konst.} \quad (7.19)$$

$$dv_{\beta'} + v_{\alpha'} \cdot d\varphi = 0 ; \quad \alpha' = \text{konst.}$$

Rovnice (7.19) umožňují stanovit velikosti rychlostí v libovolném bodě sítě charakteristik v rovině hodografu ze známých hodnot rychlostí v jednom bodě.

### **7.1.4 Vyšetření a vyhodnocení kinematických poměrů při tažení výtažku**

Na základě sestrojené sítě TMSN a s využitím okrajové podmínky pro rychlosti lze sestrojít hodograf rychlostí pohybu částic materiálu přístřihu pod přidržovačem při tažení a z něj stanovit rychlosti pohybu všech bodů přístřihu při tažení. Rozbor kinematických poměrů umožňuje stanovit příčiny vzniku zvlnění a vrás na přírubě, příčiny vzniku prasklin ve výtažcích při tažení a doporučit opatření pro jejich odstranění. Z vypočtených rychlostí pohybu bodů obrysu přístřihu při tažení lze určit polohy obrysu přístřihu v jednotlivých fázích procesu tažení i stanovit tvar a velikost výchozího rovinného přístřihu.

Vyšetření kinematických poměrů při tažení výtažku levého krytu ventilátoru bylo provedeno na výtažku taženém ze stávajícího přístřihu (příloha A2.2, KMT-01-01) a z optimálního přístřihu (přístřih sestrojený metodou využívající TMSN, příloha A2.8, KMT-01-07). Pro porovnání stávajícího a optimálního přístřihu z hlediska kinematických poměrů při tažení byla využita příloha A2.7 (KMT-01-06), ve které je nakreslena síť TMSN i oba zmíněné tvary přístřihů. V nakreslené síti TMSN byly označeny průsečíky sítě s obrysu obou přístřihů.

Na základě takto sestrojené sítě TMSN byly zkonstruovány hodografy rychlostí pohybu částic materiálu stávajícího a optimálního přístřihu. Při konstrukci byla využita okrajová podmínka pro rychlosti, která spočívá v tom, že rychlosti na vnitřním obrysu sítě TMSN je možno považovat za konstantní, rovné rychlosti pohybu tažníku. V hodogramech byl proto vnitřní obrys sítě TMSN zobrazen jako kružnice. Další konstrukce hodografů rychlostí probíhala při dodržování podmínky, že odpovídající části sítě TMSN a hodografu rychlostí jsou vzájemně ortogonální. Logaritmické spirály ze sestrojené sítě TMSN se zobrazily v hodogramech rychlostí jako logaritmické spirály, úsečky se v hodogramech rychlostí zobrazily jako body. Body, označené v hodogramech rychlostí a v síti TMSN stejnými indexy, si odpovídají.

Hodograf rychlostí pohybu částic materiálu stávajícího přístřihu výtažku je v příloze A3.5 (výkres KMT-02-01), hodograf rychlostí optimálního přístřihu je v příloze A3.6 (výkres KMT-02-02).

Vyhodnocení kinematických poměrů výtažku pro oba přístřihy:

a) Stávající přístřih

V hodografu rychlostí stávajícího přístřihu výtažku levého krytu ventilátoru je pět minim a to v částech obrysu (s,8) - (5,s), (s,14) - (11,s), (s,23) - (19,s), (s,31) - (29,s) a (s,37) - (33,s). Těchto pět částí obrysu odpovídá pěti rohům přístřihu. Z toho vyplývá, že pokud se v hodografu objeví minimum, odpovídá toto místo rohu přístřihu a rychlost pohybu částic materiálu při tažení je zde menší než v ostatních bodech obrysu přístřihu. Materiál se v rozích přístřihu příliš neúčastní procesu plastické deformace při tažení a přemísťuje se jako tuhý. Rohy přístřihu značně brzdí tok materiálu do dutiny tažnice a způsobují tak vzrůst tahových napětí ve stěně výtažku u tažné hrany tažnice. Ve stěně výtažku naproti rohům přístřihu je při tažení riziko, že vznikne napěťový stav, při kterém intenzita logaritmické deformace překročí svou kritickou hodnotu, zásoba plasticity materiálu se vyčerpá a dojde k porušení materiálu. V hodografu rychlostí pro stávající přístřih se nachází i maximum, které odpovídá rovinné obrysu (23,s) - (s,30), odpovídající přímkové části vnitřního obrysu sítě TMSN. V této části probíhá přemísťování částic materiálu při tažení velkou rychlostí, proto by bylo vhodné v této části použít brzdící žebro.

b) Optimální přístřih

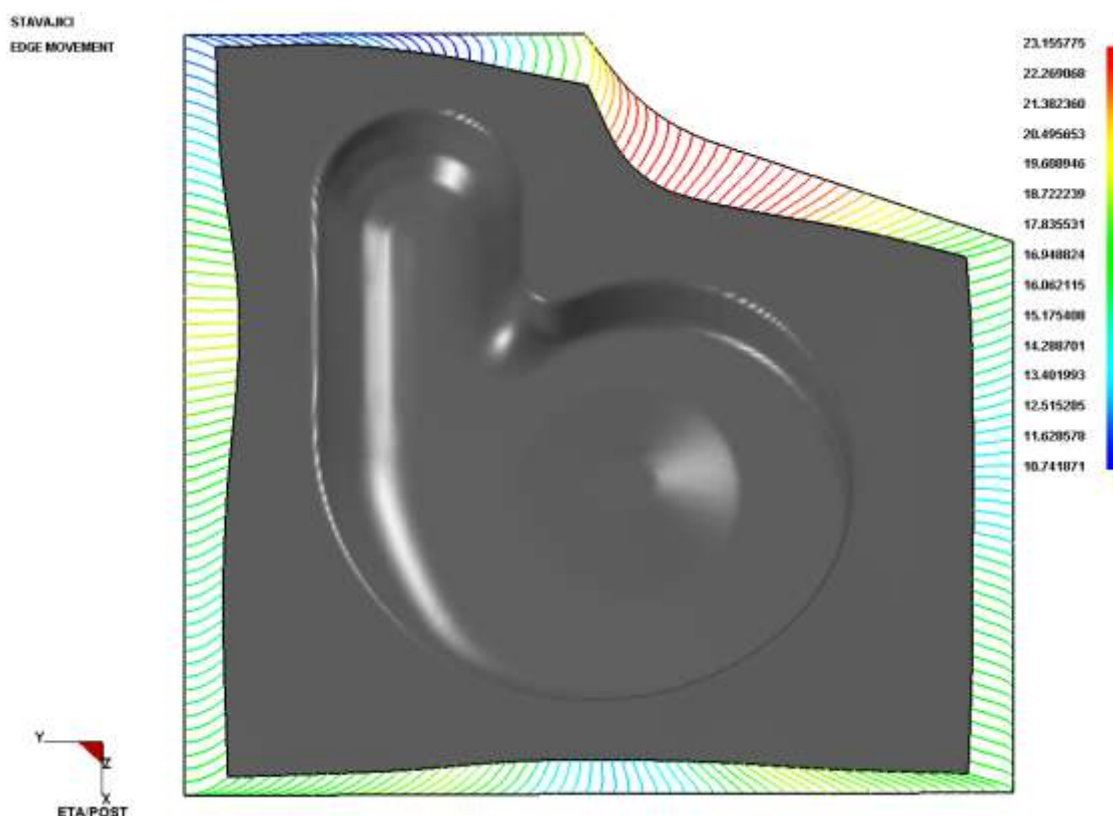
Ze sestrojeného hodografu rychlostí optimálního přístřihu výtažku levého krytu ventilátoru je znát, že průběh rychlosti pohybu bodů obrysu přístřihu je vyrovnaný. Existuje pouze jedno maximum, které odpovídá části obrysu (23,o) - (o,30), tj. přímkové části vnitřního obrysu sítě TMSN. V této části probíhá přemísťování materiálu při tažení velkou rychlostí, a proto je vhodné zde umístit brzdící žebro.

Z porovnání obou sestrojených hodografů rychlostí vyplývá, že přístřih sestrojený pomocí TMSN (optimální přístřih) je z hlediska příznivějších kinematických poměrů při tažení výtažku vhodnější pro tažení levého krytu ventilátoru. S použitím optimálního přístřihu se sníží nebezpečí vzniku prasklin, vln a vrás.

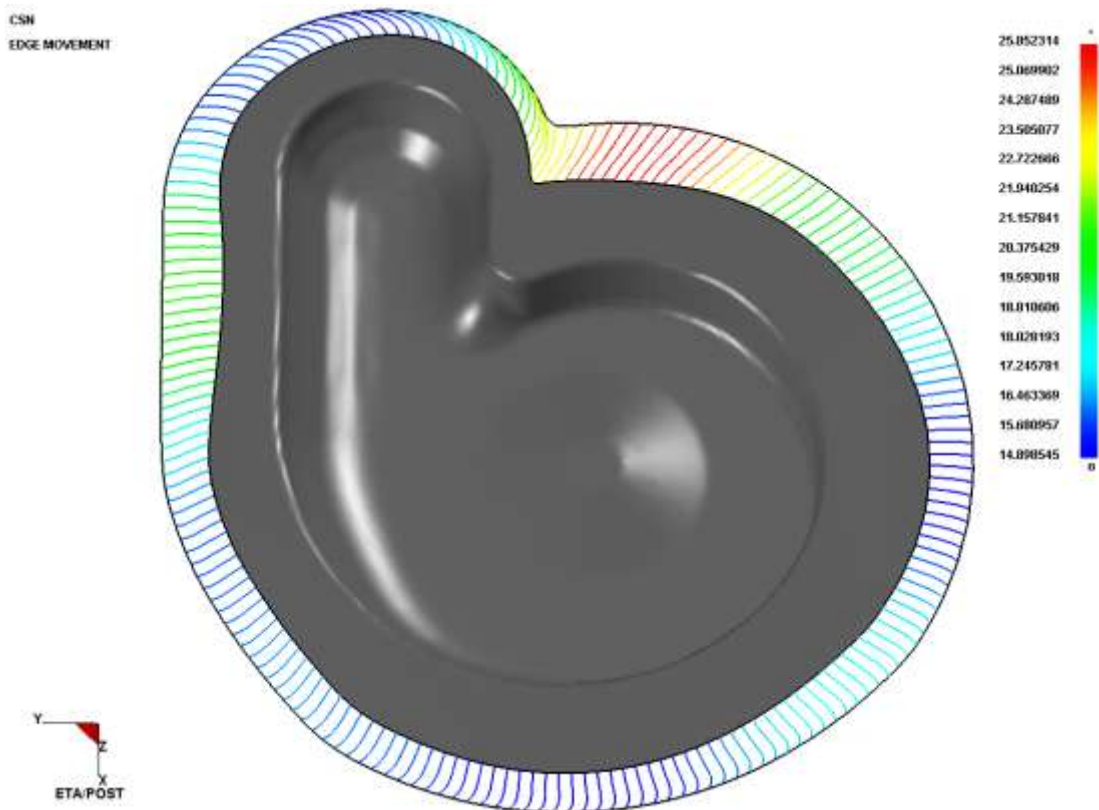
### 7.1.5 Kinematické poměry okraje příruby při tažení výtažku z jednotlivých přístřihů s použitím software DYNAFORM 5.2

Pohyb přístřihu v tvářecích nástrojích při probíhajícím procesu tažení je důležitým faktorem, kterým lze tento proces popsat. V podprogramu softwaru Dynaform 5.2, v ETA/Post-Processoru, byla k účelu porovnání jednotlivých přístřihů z hlediska kinematických poměrů okraje příruby použita analýza pohybu okraje přístřihu („Edge movement“). Tato analýza umožňuje zjistit, jakou vzdálenost urazí okraj přístřihu nebo jen jeho vybraná část za dobu celého procesu tažení.

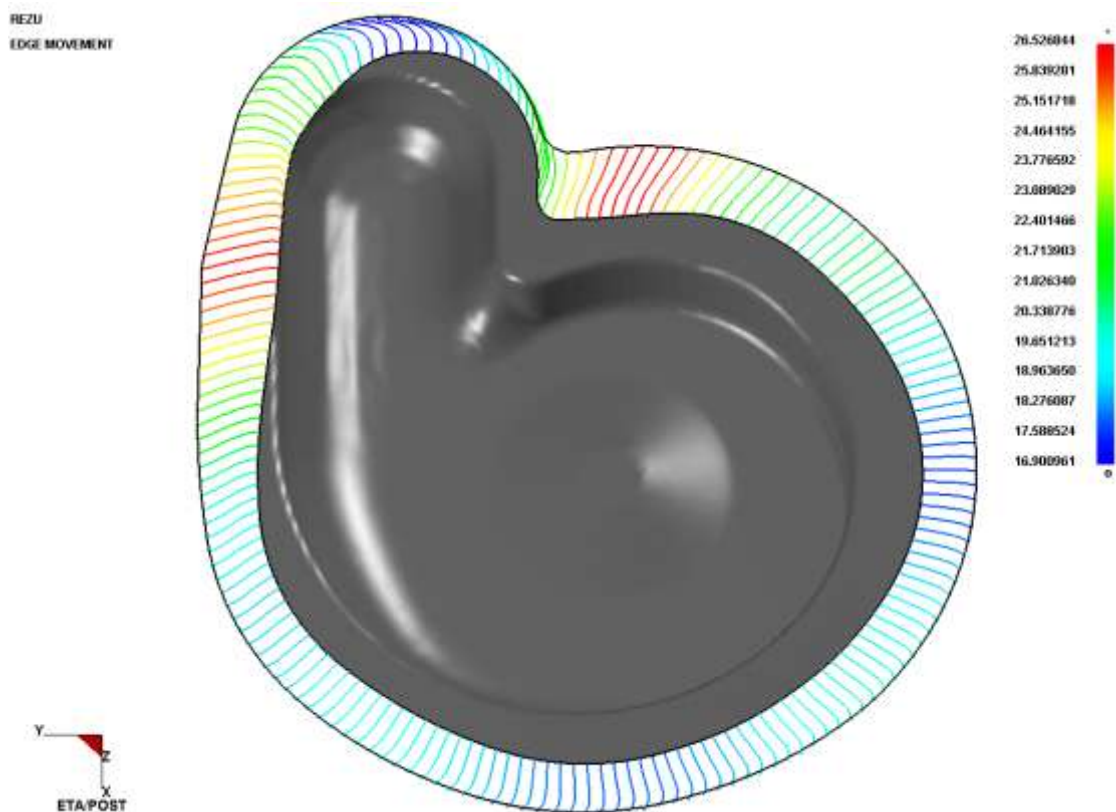
Jednotlivé výsledky pro všechny přístřihy jsou znázorněny níže, pro stávající přístřih na obr. 7.2, pro přístřih stanovený dle ČSN 22 7303 na obr. 7.3, pro přístřih stanovený metodou řezů na obr. 7.4 a pro přístřih stanovený toutéž metodou s korekcí polohy přístřihu na obr. 7.5, pro přístřih stanovený metodou využívající TMSN na obr. 7.6 a pro přístřih sestrojžený pomocí BSE modulu na obr. 7.7.



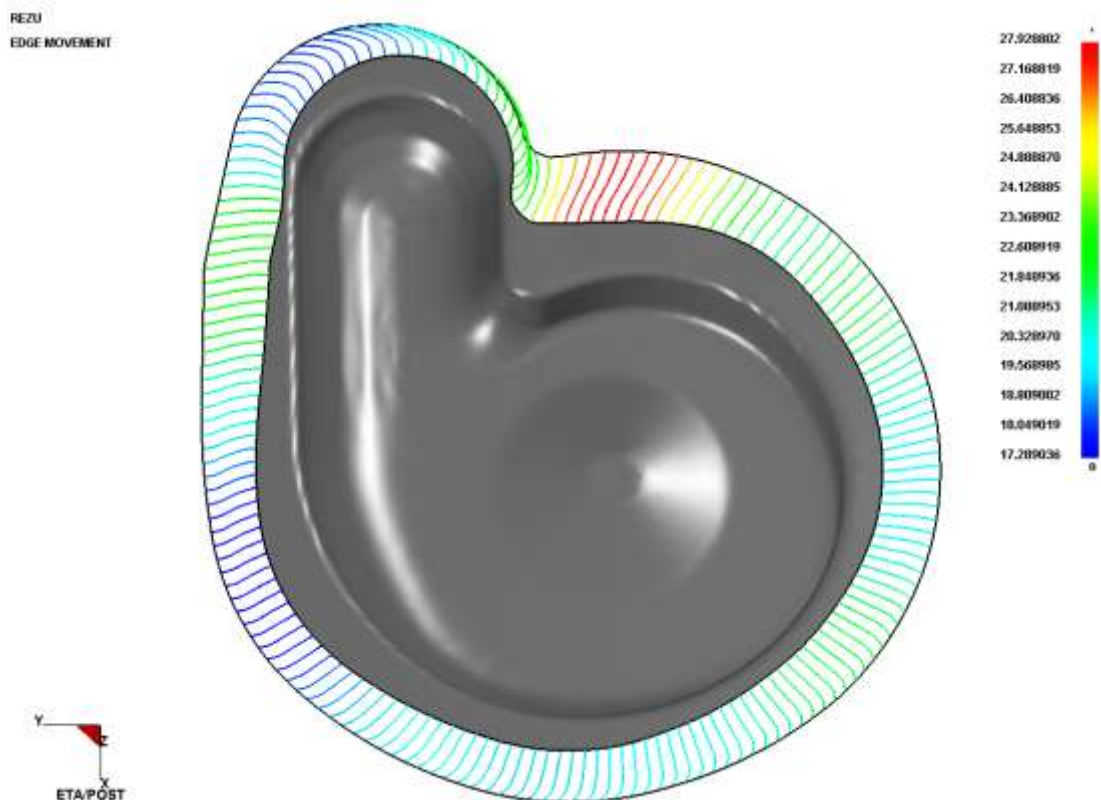
Obr. 7.2 Pohyb okraje příruby u výtažku taženého ze stávajícího přístřihu



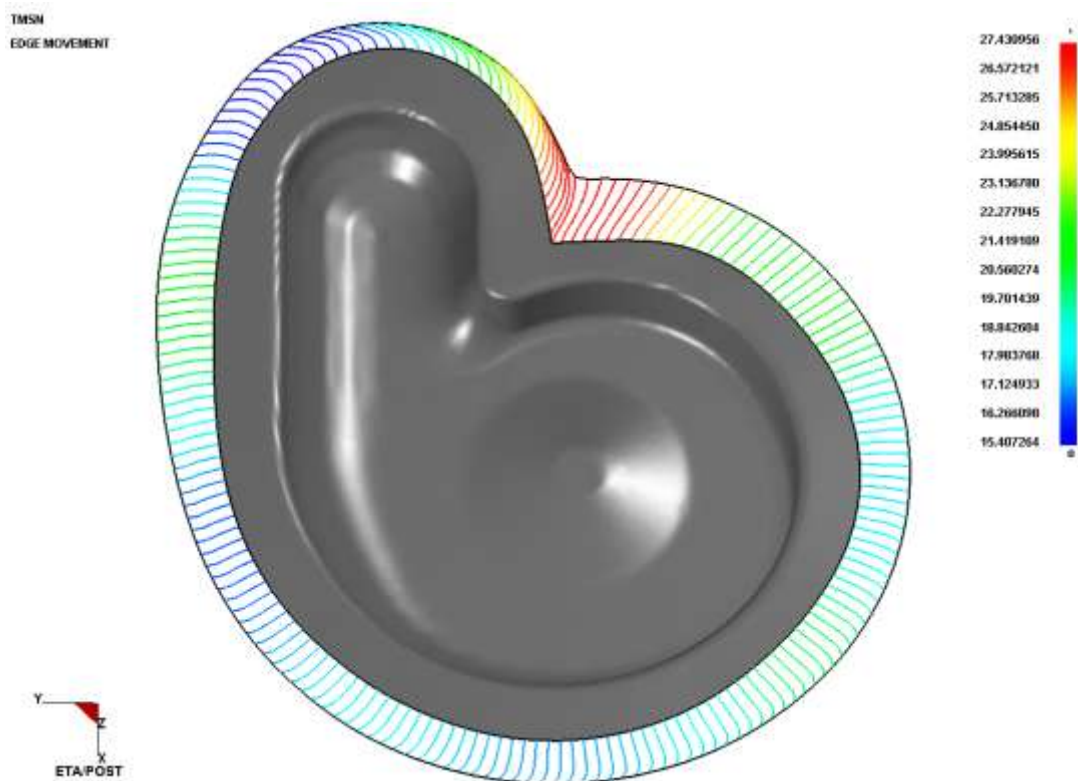
Obr. 7.3 Pohyb okraje příruby u výtažku taženého z přístřihu dle ČSN 22 7303



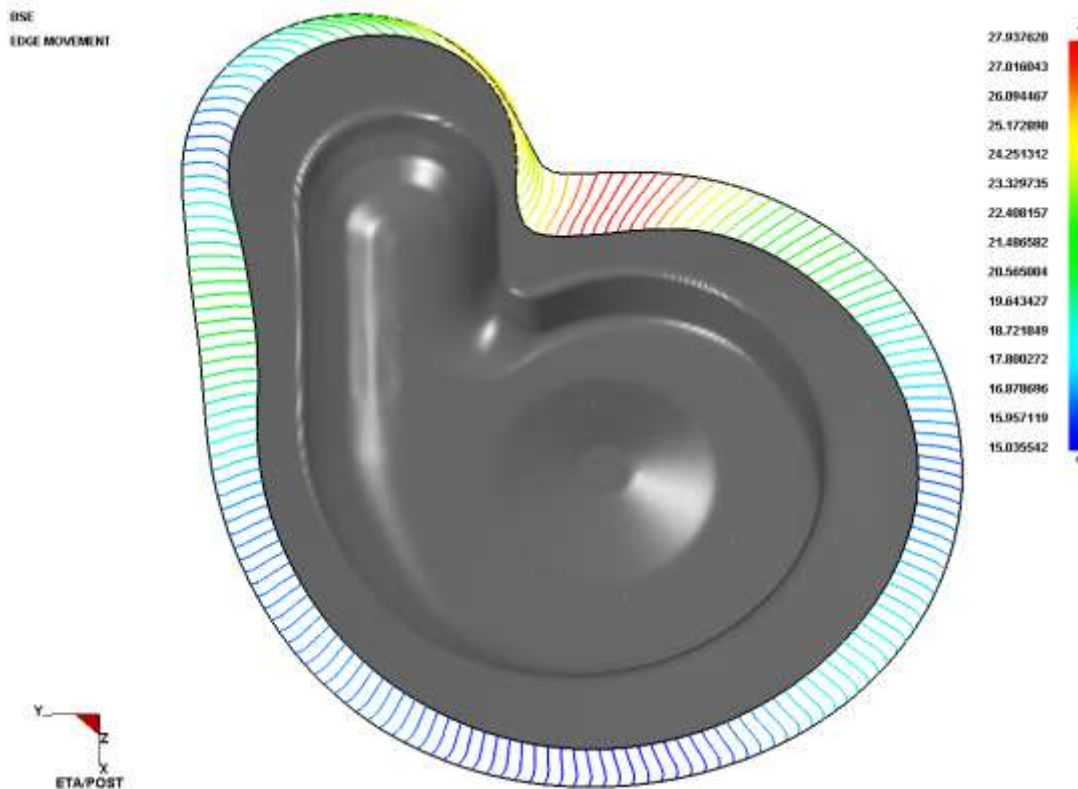
Obr. 7.4 Pohyb okraje příruby u výtažku taženého z přístřihu stanoveného metodou řezů



Obr. 7.5 Pohyb okraje příruby u výtažku taženého z přístříhu stanoveného metodou řezů po korekci polohy přístříhu



Obr. 7.6 Pohyb okraje příruby u výtažku taženého z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN



Obr. 7.7 Pohyb okraje příruby u výtažku taženého z přístříhu sestrojěného s využitím BSE modulu

U výtažku taženého ze stávajícího přístříhu (obr. 7.2) se vzdálenost, kterou musí okraj přístříhu urazit, pohybuje v rozmezí 10,742 mm ÷ 23,156 mm. K největšímu vtahování materiálu dochází ve vybrání přístříhu. Zde se dráha, kterou okraj přístříhu urazí, pohybuje v maximální hranici 23,156 mm. U stávajícího přístříhu je patrné, že na okrajích přebývá dost materiálu. Velikost stávajícího přístříhu je zbytečně velká a z ekonomického hlediska je použití tohoto přístříhu nevýhodné.

Obr. 7.3 znázorňuje pohyb přístříhu stanoveného dle ČSN 22 7303. Vzdálenost, kterou musí okraj přístříhu urazit, se pohybuje v rozmezí 14,898 mm ÷ 25,852 mm. Tato vzdálenost je v porovnání se stávajícím přístřihem větší. K největšímu přesunu dochází opět v kritickém místě vybrání nad poloměrem 12 mm.

U výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů (obr. 7.4) dochází k nadměrnému vtažení materiálu v rovinné části výtažku. Okraj přístříhu zde urazí největší vzdálenost, až 26,527 mm. Takto velké hodnoty už na okraji výtažku nebylo dosaženo, průměrně se vzdálenost, kterou okraj přístříhu urazí, pohybuje kolem 18,963 mm ÷ 23,089 mm. Výsledný výtažek může být pro nadměrné vtažení materiálu označen jako zmetkový kus.



Pokud se však na přístřihu provede korekce polohy vůči nástrojům popsaná v kap. 6.6.3.1, vtahování materiálu do tažnice pak probíhá rovnoměrněji po celém obvodu výtažku (obr. 7.5). Vzdálenost, kterou urazí okraj přístřihu, se převážně pohybuje v rozmezí 18,049 mm ÷ 24,128 mm, jen v oblasti nad poloměrem 12 mm a v rovinné části je vzdálenost pohybu příruby maximální, a to až 27,928 mm.

Vzdálenost, kterou musí urazit okraj výtažku z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN (obr. 7.6) se po obvodu výtažku průměrně pohybuje v rozmezí 16,266 mm ÷ 23,0136 mm. V místě přístřihu nad poloměrem 12 mm bylo dosaženo maximální hodnoty 27,431 mm. Konstrukce přístřihu metodou TMSN se z hlediska kinematických poměrů okraje příruby a rovnoměrnosti vtahování materiálu po celém obvodu výtažku jeví jako nejlepší varianta pro výtažek levého krytu ventilátoru.

Při tažení výtažku z přístřihu sestrojeného pomocí BSE modulu (obr. 7.7) došlo k posunutí okraje přístřihu v celkovém rozmezí 15,036 mm ÷ 27,938 mm. K maximálnímu přesunu okraje opět dochází v místě výtažku nad poloměrem 12 mm. Lze si povšimnout, že navržený přístřih je konstruovaný s velkým přídavkem v místě příruby.

## 7.2 Metoda deformačních sítí

Deformační sítě se používají při analýze a popisu procesů plošného tváření, kdy je nutné znát stav napjatosti a deformací plechu v různých oblastech tvářené součásti. Také se této metody využívá při experimentálním určování diagramů mezních deformací a při ověřování výsledků počítačové simulace. Je tedy nejrozšířenější metodou kvantitativního popisu toku materiálu. Princip této metody spočívá v nanesení deformační sítě na přístřih plechu před tažením a v následném vyhodnocení deformační sítě po skončení operace tažení výtažku.

U metody sítí se na celý plech nebo na jeho zkoumanou část nanese různými metodami (mechanicky, leptáním, tištěním) deformační síť nejčastěji těchto typů:

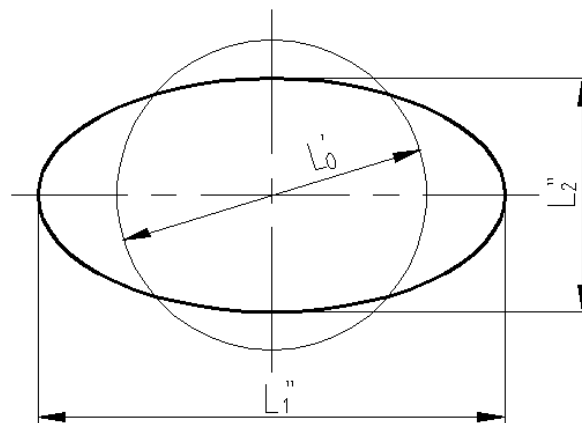
- síť s kružnicovými elementy,
- síť se čtvercovými elementy,
- kombinované sítě s elementy kružnicovými i čtvercovými,
- sítě s jinými tvary elementů.

Pro vyšetření rozložení napětí a deformací se u výtazků nepravidelného tvaru nejčastěji používají kružnicové elementy. Jejich výhodou je to, že se deformují do elips, kde jejich hlavní osy jsou totožné se směrem hlavních deformací.

Deformační síť musí splňovat následující požadavky:

- musí co nejméně ovlivňovat podmínky tření mezi nástrojem a tvářeným plechem,
- nesmí narušit povrch plechu do té míry, aby projevil vrubový účinek, který by mohl způsobit posunutí mezních hodnot deformací k nižším hodnotám,
- musí být dostatečně plastická, tj. schopna velkých plastických deformací,
- musí být odolná proti otěru, což určuje míru čitelnosti sítě po tváření,
- musí být odolná proti používaným mazivům, aby nedocházelo ke snížení čitelnosti sítě po deformaci,
- musí být tvarově a rozměrově přesná,
- její vytváření by mělo být jednoduché a málo pracné.

Pomocí deformační sítě s elementem určité velikosti (obr. 7.8) nelze změřit deformaci v bodě, lze zjistit pouze průměrnou deformaci v ploše daného elementu. Je třeba použít co nejmenší elementy pro splnění podmínky rovnoměrnosti deformace v této ohraničené oblasti. Naopak pro dosažení malé poměrné chyby měření je třeba použít elementu co největšího. Parametr sítě  $L_0'$  má být kompromisem mezi těmito protichůdnými požadavky na síť. Podle účelu se volí v rozmezí 2 mm až 20 mm. Pro výtazek levého krytu ventilátoru byla na přístřih z plechu o tloušťce 0,9 mm nanesena síť s kružnicovými elementy o parametru sítě  $L_0' = (4,873 \pm 0,1)$  mm.



Obr. 7.8 Element deformační sítě před (tenkou čarou) a po deformaci (tlustou čarou), ( $L_0'$  - průměr kružnicového elementu,  $L_1''$  - délka hlavní osy elipsy,  $L_2''$  - délka vedlejší osy elipsy)

## 7.2.1 Experimentální stanovení napětí a deformací

Pro porovnání napěťových a deformačních poměrů ve výtažku byla metoda deformačních sítí použita u výtažku ze stávajícího přístříhu, dále u výtažku z přístříhu stanoveného dle ČSN, metodou řezů a metodou využívající TMSN.

Byl zhotoven výkres deformační sítě na stávajícím přístříhu (viz příloha A4.1, výkres KMT-03-01), tato deformační síť byla pro všechny přístříhy stejná. Jednotlivé kružnicové elementy sítě byly seřazeny s pravidelným odstupem středů 9 mm do sedmi směrů, procházejících kritickými místy výtažku. Z výkresu deformační sítě byly světlotiskem zhotoveny kopie, které po připevnění na přístříhy sloužily jako šablony pro přesné nanesení elementů. Tvarové přístříhy byly vyřezány dle šablon, zhotovených z výrobních výkresů přístřihů (přílohy A2.4 KMT-01-03, A2.6 KMT-01-05, A2.8 KMT-01-07). Elementy deformační sítě byly vytvořeny pomocí přípravku pro vytváření vtisku s regulací razící síly, seřízeným na hloubku vtisku 0,06 mm.

Po nanesení celé deformační sítě byly z jednotlivých přístřihů vyrobeny výtažky levého krytu ventilátoru tak, že se deformační síť ocitla na vnějším povrchu výtažku a došlo k deformaci nanesené deformační sítě. Pro podrobné vyhodnocení byly zvoleny směry I, II, IV, V a VII deformační sítě.

Vypočtené hodnoty pro jednotlivé vyhodnocované směry jsou pro výtažek vyrobený ze stávajícího přístříhu v přílohách A4.2 až A4.6, pro výtažek vyrobený z přístříhu stanoveného metodou dle ČSN 22 7303 v přílohách A5.1 až A5.5, pro výtažek vyrobený z přístříhu stanoveného metodou řezů v přílohách A6.1 až A6.5 a pro výtažek vyrobený z přístříhu stanoveného metodou využívající TMSN v přílohách A7.1 až A7.5. Pro vykreslení závislostí vypočtených veličin byl vybrán směr I deformační sítě, protože v kritickém místě v tomto směru se nejčastěji vyskytují praskliny. Grafy průběhů vypočítaných veličin jsou pro výtažek vyrobený ze stávajícího přístříhu v přílohách A4.7 a A4.8, pro výtažek tažený z přístříhu stanoveného dle ČSN 22 7303 v přílohách A5.6 a A5.7, pro výtažek zhotovený z přístříhu stanoveného metodou řezů v přílohách A6.6 a A6.7 a pro výtažek z přístříhu stanoveného metodou využívající TMSN v přílohách A7.6 a A7.7.

Z vypočítaných hodnot lze určit kritická místa, zmenšení tloušťky stěny, využití zásoby plasticity atd. při tažení výtažku v jednotlivých směrech deformační sítě pro každou ze čtyř variant přístřihu.

### **7.2.2 Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném ze stávajícího přístřihu**

Při zkoumání výsledných hodnot byla zjištěna nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta = 175,5 \%$  ve směru I deformační sítě u elementu *K6* (viz příloha A4.2). Právě u tohoto elementu došlo také k největšímu zmenšení tloušťky plechu z  $s_0 = 0,90$  mm na  $s = 0,62$  mm. V této oblasti (elementy *K5*, *K6*, *K7*) se nachází kritické místo, kde při tažení výtažku dochází nejčastěji ke vzniku prasklin.

Rozložení napětí a deformací ve výtažku v jednotlivých směrech:

- Směr I (příloha A.2) – elementy *K5*, *K6*, *K7* jsou v kritické oblasti výtažku, proto udávají nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity. Zároveň je v tomto místě největší pokles hodnoty tloušťky plechu. U elementu *K5* je  $\eta = 117,4 \%$ ,  $s = 0,70$  mm, u *K6* viz odstavec výše, u *K7* je  $\eta = 124,3 \%$  a  $s = 0,66$  mm. Vysoké hodnoty  $\eta$  svědčí o existenci soustředěné deformace a nestabilitnosti procesu při tažení. Toto místo je skutečně kritické, dochází zde při tažení nejčastěji ke vzniku prasklin.
- Směr II (příloha A4.3) – nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity udává element *K2*, a to  $\eta = 88,0 \%$ . Tloušťka se zde mění z  $s_0 = 0,90$  mm na  $s = 0,75$  mm.
- Směr IV (příloha A4.4) – na místě kružnicového elementu *K4* udává plech největší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta = 80,8 \%$  a zároveň nejmenší tloušťku  $s = 0,76$  mm. U elementů *K7* až *K15* nepřesáhne koeficient hodnotu  $\eta = 25,9 \%$ , protože se jedná o místo s vysokou tvorbou zvlnění při tažení.
- Směr V (příloha A4.5) – nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity je u elementu *K3*, a to  $\eta = 32,9 \%$ . Takto vysoká hodnota je v tomto směru

ojedinelá, koeficienty v ostatních elementech nepřesahují hodnotu  $\eta = 25,9 \%$ . Je to dáno tím, že v tomto směru nejvíce dochází ke zvlnění plechu při tažení (viz obr. 7.9).

- Směr VII (příloha A4.6) – nejnižší hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity vykazují místa s elementy *K10*, *K11*, *K14* a *K15*, kdy tento koeficient nepřesáhne hodnotu  $\eta = 15,9 \%$ . Nejvyšší hodnota koeficientu  $\eta$  je u elementu *K6*, a to  $\eta = 69,3 \%$ .



Obr. 7.9 Zvlnění na výtažku levého krytu ventilátoru ve směrech IV a V  
deformační síť

### **7.2.3 Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném z přístřihu stanoveného metodou dle ČSN 22 7303**

Při zkoumání výsledných hodnot byla zjištěna nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta = 126,2 \%$  ve směru I deformační sítě u elementu *K6* (viz příloha A5.1). U elementu *K7* došlo k největšímu zmenšení tloušťky plechu z  $s_0 = 0,90$  mm na  $s = 0,67$  mm. V této oblasti (elementy *K5*, *K6*, *K7*) se nachází kritické místo, kde při tažení výtažku dochází nejčastěji ke vzniku prasklin. Je ovšem zřejmé, že hodnoty jsou pozitivnější než u výtažku vyrobeného ze stávajícího přístřihu.

Rozložení napětí a deformací ve výtažku v jednotlivých směrech:

- Směr I (příloha A5.1) – elementy *K5*, *K6*, *K7* se nacházejí v kritické oblasti výtažku, udávají nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity. Zároveň

je v tomto místě největší pokles hodnoty tloušťky plechu. U elementu *K5* je  $\eta = 116,8 \%$  a  $s = 0,70 \text{ mm}$ , u *K6* je  $\eta = 126,2 \%$  a  $s = 0,69 \text{ mm}$ , u *K7* je  $\eta = 125,5 \%$  a  $s = 0,67 \text{ mm}$ .

- Směr II (příloha A5.2) – nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity udává element *K2*, a to  $\eta = 42,8 \%$ . Tloušťka se zde mění z  $s_0 = 0,90 \text{ mm}$  na  $s = 0,82 \text{ mm}$ .
- Směr IV (příloha A5.3) – na místě kružnicového elementu *K4* udává plech největší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta = 73,8 \%$  a zároveň nejmenší tloušťku po vytažení  $s = 0,77 \text{ mm}$ . U elementů *K17* a *K20* jsou hodnoty podobné (*K17*:  $\eta = 73,6 \%$ ,  $s = 0,77 \text{ mm}$ , *K20*:  $\eta = 73,1 \%$ ,  $s = 0,77 \text{ mm}$ ).
- Směr V (příloha A5.4) – nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity je u elementu *K3*, a to  $\eta = 32,6 \%$ . Nejmenší hodnota tloušťky je u téhož elementu  $s = 0,82 \text{ mm}$ .
- Směr VII (příloha A5.5) – nejnižší hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity vykazují místa s elementy *K11*, *K14* a *K15*, kdy tento koeficient nepřesáhne hodnotu  $\eta = 8,1 \%$ . Nejvyšší hodnotu koeficientu  $\eta$  je u elementu *K6*, a to  $\eta = 67,2 \%$ .

#### **7.2.4 Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném z přístřihu stanoveného metodou řezů**

Při zkoumání výsledných hodnot byla zjištěna nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta = 114,8 \%$  ve směru I deformační sítě u elementu *K6* (viz příloha A6.1). U téhož elementu došlo k největšímu zmenšení tloušťky plechu z  $s_0 = 0,90 \text{ mm}$  na  $s = 0,70 \text{ mm}$ . V této oblasti (elementy *K5*, *K6*, *K7*) se nachází kritické místo, kde při tažení výtažku dochází nejčastěji ke vzniku prasklin. Je zřejmé, že hodnoty jsou opět o něco pozitivnější než u výtažku vyrobeného z přístřihu stanoveného metodou dle ČSN.

Rozložení napětí a deformací ve výtažku v jednotlivých směrech:

- Směr I (příloha A6.1) – elementy *K5*, *K6*, *K7* se nacházejí v kritické oblasti výtažku, udávají nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity. Zároveň je v tomto místě největší pokles hodnoty tloušťky plechu. U elementu *K5* je  $\eta = 109,6 \%$  a  $s = 0,71 \text{ mm}$ , u *K6* je  $\eta = 114,8 \%$  a  $s = 0,70 \text{ mm}$ , u *K7* je  $\eta = 110,5 \%$  a  $s = 0,70 \text{ mm}$ .
- Směr II (příloha A6.2) – nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity udává element *K1*, a to  $\eta = 29,0 \%$ . Tloušťka se zde mění z  $s_0 = 0,90 \text{ mm}$  na  $s = 0,85 \text{ mm}$ .
- Směr IV (příloha A6.3) – nejvyšší hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta$  a současně nejnižší hodnoty tloušťky  $s$  vyšly u elementů *K4* ( $\eta = 73,6 \%$ ,  $s = 0,77 \text{ mm}$ ), *K17* ( $\eta = 70,7 \%$ ,  $s = 0,77 \text{ mm}$ ), *K20* ( $\eta = 69,9 \%$ ,  $s = 0,78 \text{ mm}$ ).
- Směr V (příloha A6.4) – nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity je u elementu *K3*, a to  $\eta = 28,5 \%$ , tloušťka  $s = 0,83 \text{ mm}$ . Nejmenší hodnota tloušťky je u elementu *K8*,  $s = 0,82 \text{ mm}$ .
- Směr VII (příloha A6.5) – nejnižší hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity vykazují místa s elementy *K14* a *K15*, kdy tento koeficient nepřesáhne hodnotu  $\eta = 7,1 \%$ . Nejvyšší hodnota koeficientu  $\eta$  je u elementu *K6*, a to  $\eta = 69,0 \%$ .

### **7.2.5 Rozložení napětí a deformací ve výtažku vyrobeném z přístřihu stanoveného metodou využívající TMSN**

Při zkoumání výsledných hodnot byla zjištěna nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta = 104,7 \%$  ve směru I deformační sítě u elementu *K6* (viz příloha A7.1). U téhož elementu došlo k největšímu zmenšení tloušťky plechu z  $s_0 = 0,90 \text{ mm}$  na  $s = 0,72 \text{ mm}$ . V této oblasti (elementy *K5*, *K6*, *K7*) se nachází kritické místo, kde při tažení výtažku dochází nejčastěji ke vzniku prasklin. Je zřejmé, že hodnoty jsou opět o něco pozitivnější než u výtažku vyrobeného z přístřihu stanoveného metodou řezů.

Rozložení napětí a deformací ve výtažku v jednotlivých směrech:

- Směr I (příloha A7.1) – elementy *K5*, *K6*, *K7* se nacházejí v kritické oblasti výtažku, udávají nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity. Zároveň je v tomto místě největší pokles hodnoty tloušťky plechu. U elementu *K5* je  $\eta = 104,2 \%$  a  $s = 0,72 \text{ mm}$ , u *K6* je  $\eta = 104,7 \%$  a  $s = 0,72 \text{ mm}$ , u *K7* je  $\eta = 95,1 \%$  a  $s = 0,74 \text{ mm}$ .
- Směr II (příloha A7.2) – nejvyšší hodnotu koeficientu využití zásoby plasticity udává element *K24*, a to  $\eta = 43,1 \%$ . Tloušťka se zde mění z  $s_0 = 0,90 \text{ mm}$  na  $s = 0,99 \text{ mm}$ .
- Směr IV (příloha A7.3) – nejvyšší hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta$  a současně nejnižší hodnoty tloušťky  $s$  vyšly u elementů *K4* ( $\eta = 73,2 \%$ ,  $s = 0,77 \text{ mm}$ ), *K17* ( $\eta = 73,3 \%$ ,  $s = 0,77 \text{ mm}$ ), *K20* ( $\eta = 69,2 \%$ ,  $s = 0,78 \text{ mm}$ ).
- Směr V (příloha A7.4) – nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity je u elementu *K3*, a to  $\eta = 27,6 \%$ , tloušťka  $s = 0,84 \text{ mm}$ . Nejmenší hodnota tloušťky je u elementu *K8*,  $s = 0,82 \text{ mm}$ .
- Směr VII (příloha A7.5) – nejnižší hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity vykazují místa s elementy *K14* a *K15*, kdy tento koeficient nepřesáhne hodnotu  $\eta = 7,1 \%$ . Nejvyšší hodnota koeficientu  $\eta$  je u elementu *K6*, a to  $\eta = 72,4 \%$ .

### 7.2.6 Porovnání přístřihů z hlediska rozložení napětí a deformací

Z porovnání výsledných hodnot u výtažku levého krytu ventilátoru taženého ze čtyř variant přístřihů vyplývá, že kritické místo vzniká vždy ve směru I deformační sítě v místě elementů *K5*, *K6* a *K7*. Pro všechny alternativy tvaru přístřihů jsou v tomto místě hodnoty koeficientu využití zásoby plasticity materiálu větší než 100 %. Z porovnání je ale zřejmé, že hodnoty  $\eta$  jsou u každého přístřihu jiné. Ve sledu od stávajícího přístřihu až k přístřihu vytvořeného metodou využívající TMSN klesá v kritickém místě maximální hodnota  $\eta$  a zároveň se omezuje ztenčování tloušťky. Rozložení deformací je rovnoměrnější a snižuje se nebezpečí ztráty stability plastické deformace při tažení.

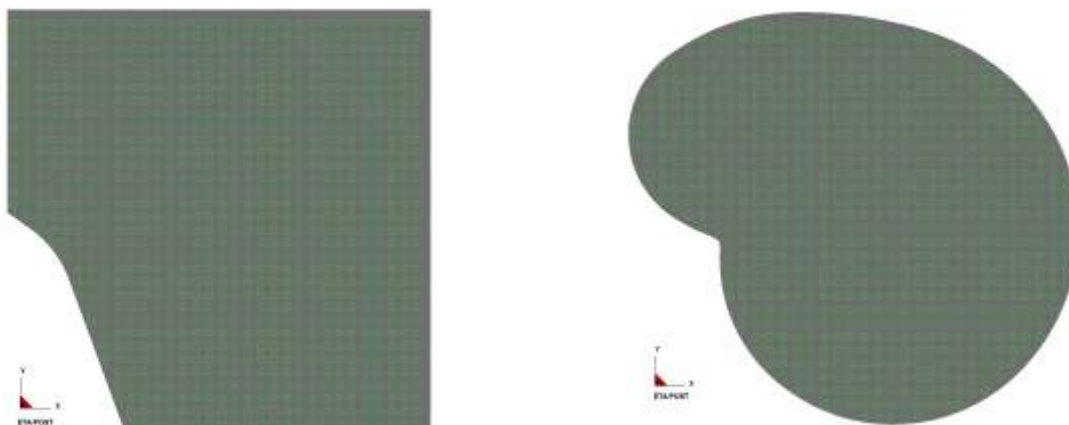


Je tedy zřejmé, že s použitím optimálního přístřihu (přístřih dle TMSN) pro výrobu levého krytu ventilátoru je možno počítat s nižšími hodnotami  $\eta$  a zároveň s menším ztenčením tloušťky plechu při tažení.

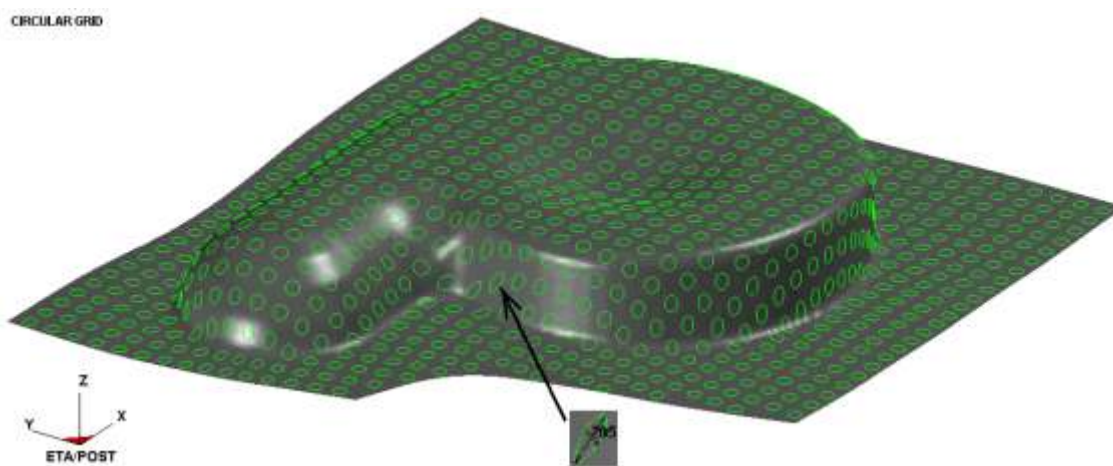
### **7.3 Metoda deformačních sítí provedená v softwaru DYNAFORM 5.2**

Metoda deformačních sítí je vhodná pro zjišťování stavu napjatosti a deformací ve výtažku při plošném tváření. Pokud ale určitá firma nemá prostředky k vyhodnocení procesu tažení na reálném výtažku touto metodou, je výhodné situaci ve výtažku alespoň přibližně stanovit pomocí softwaru. K výpočtu a simulaci procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru byl použit program DYNAFORM 5.2. Uložená data s příponou df byla poté zpracována v řešiči (Solver LS DYNA). Pro výslednou simulaci byl použit ETA/Post-Processor, kde je možné přehrát simulaci celého procesu tažení nebo se podívat na jednotlivé kroky simulace.

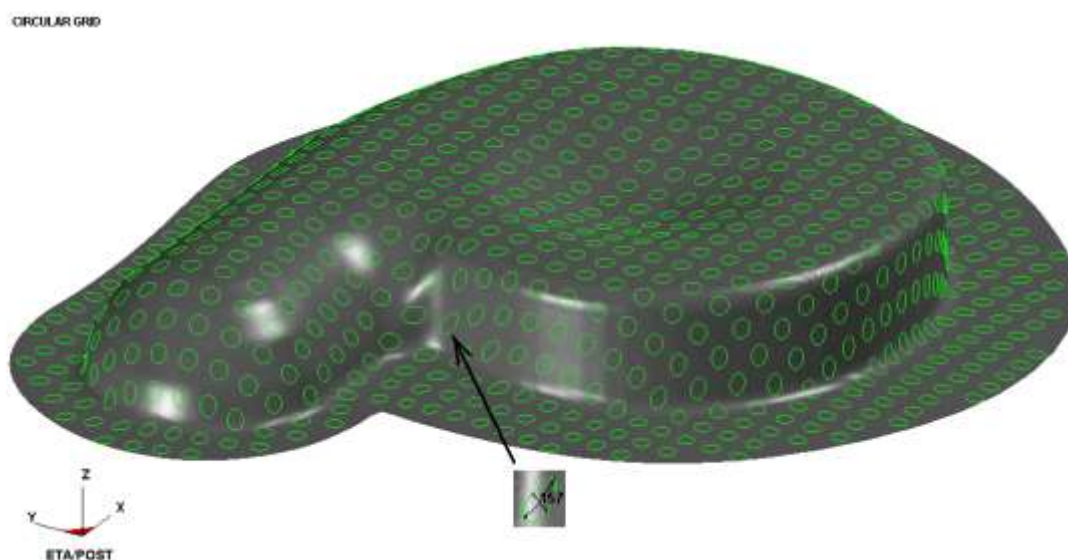
V programu ETA/Post-Processor byla použita analýza deformační sítě „Circular Grid“. Funkce umožňuje uživateli sledovat deformaci elementů sítě v každém kroku simulace. Aby bylo možné deformační síť zkoumat, je nutné nastavit velikost deformačních elementů (kružnic) a vzdálenost těchto kružnic od sebe. Při reálné zkoušce byla na všechny přístřihy nanášena stejná síť s kružnicovými elementy o parametru sítě  $L_0' = (4,873 \pm 0,1)$  mm. Jednotlivé elementy sítě byly seřazeny s pravidelným odstupem středů 9 mm. Tyto rozměry byly zachovány i při simulované metodě deformační sítě. Elementy ale nebyly seřazeny do sedmi směrů, protože takto přesné přípravy deformační sítě nelze v softwaru docílit. Bylo nutno se spokojit s nastavením elementů ETA/Post-Processorem, kdy program navolenými elementy vyplní celou plochu přístřihu. Analýza deformační sítě byla provedena pro všechny typy přístřihů výtažku levého krytu ventilátoru. Deformační síť na stávajícím a na optimálním přístřihu (přístřih sestrojenny metodou využívající TMSN) je na obr. 7.10. Deformační síť na výtažku a elementy sítě s největší deformací jsou pro stávající přístřih na obr. 7.11 a 7.12, pro přístřih dle ČSN 22 7303 na obr. 7.13 a obr. 7.14, pro přístřih stanovený metodou řezů na obr. 7.15 a obr. 7.16, pro přístřih stanovený metodou řezů po korekci polohy na obr. 7.17 a obr. 7.18, pro přístřih sestrojenny metodou využívající TMSN na obr. 7.19 a obr. 7.20 a pro přístřih stanovený pomocí BSE modulu na obr. 7.21 a obr. 7.22.



Obr. 7.10 Deformační síť na modelu stávajícího přístřihu (vlevo), deformační síť na modelu optimálního přístřihu vytvořeného metodou využívající TMSN (vpravo)

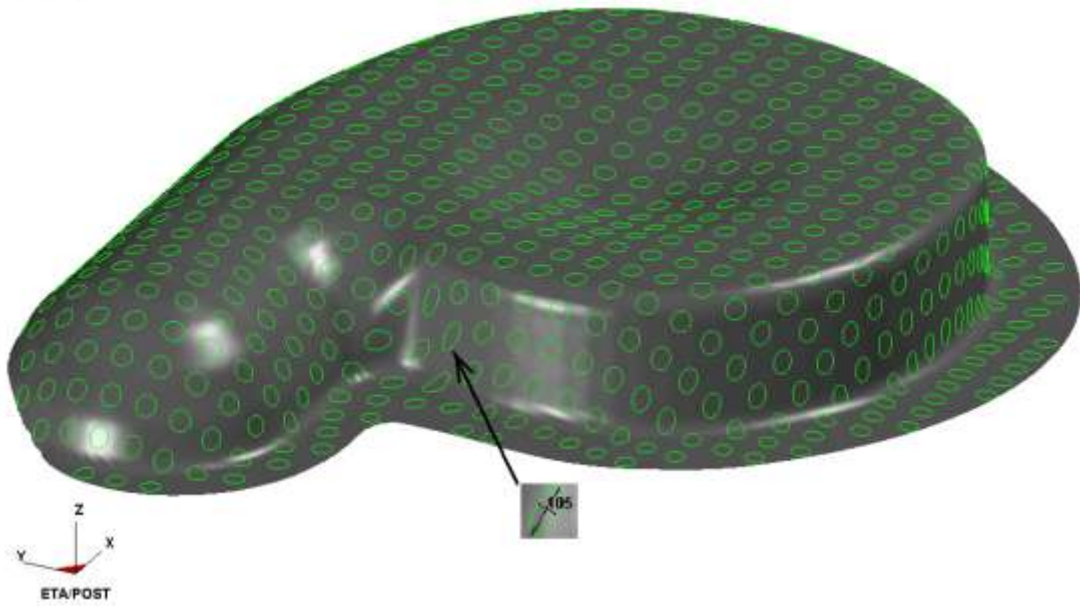


Obr. 7.11 Deformační síť na výtažku taženém ze stávajícího přístřihu a nejvíce deformovaný element č. 205



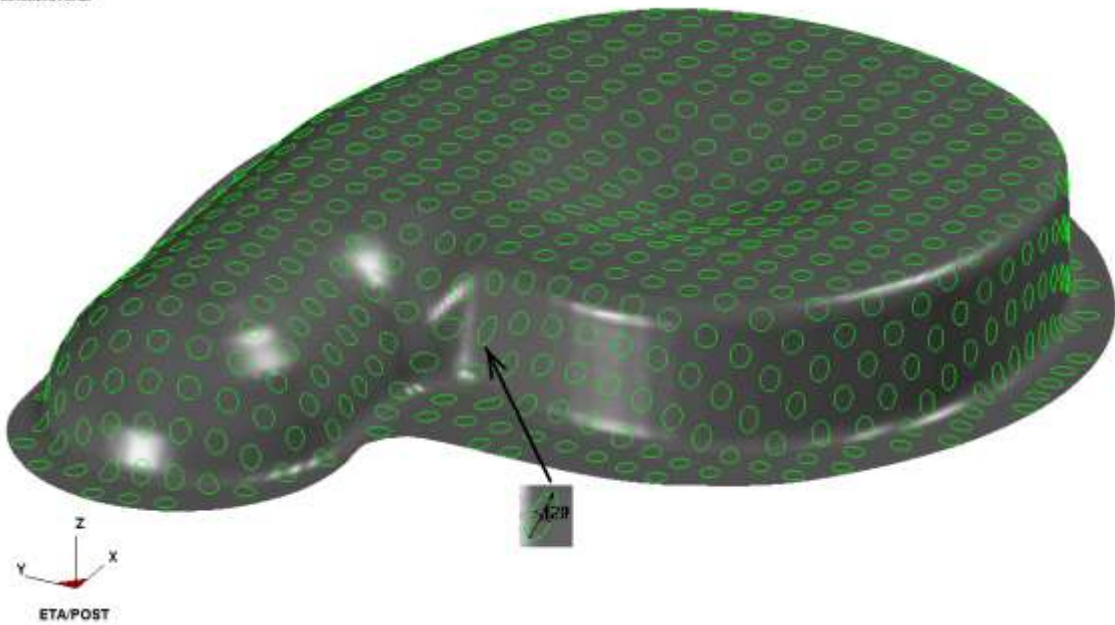
Obr. 7.12 Deformační síť na výtažku taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303 a nejvíce deformovaný element č. 157

CIRCULAR GRID



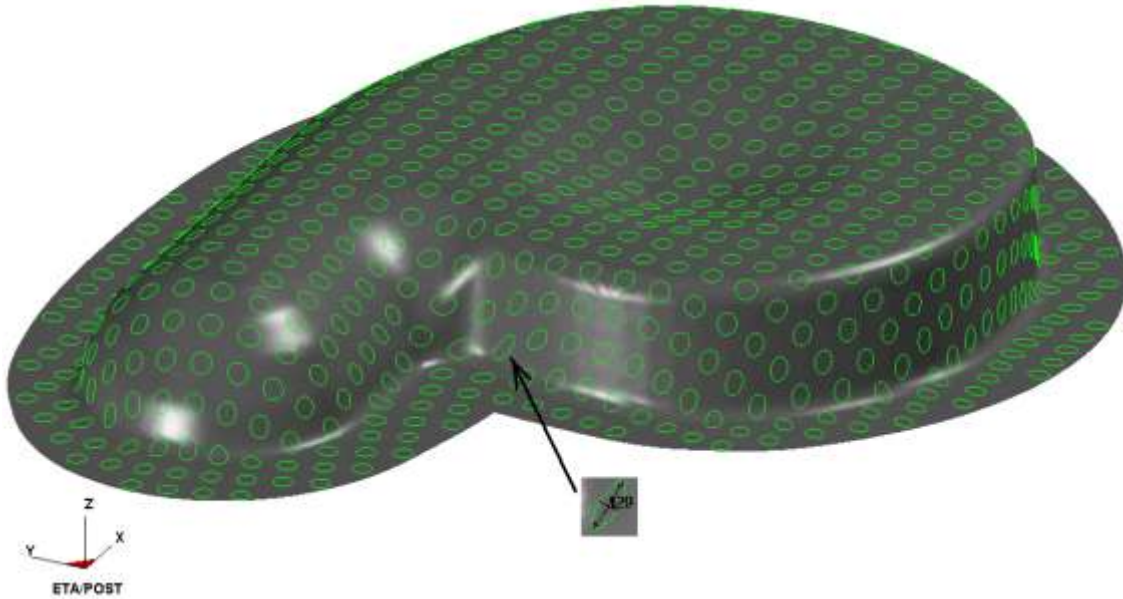
Obr. 7.13 Deformační síť na výtažku taženém z přístřihu stanoveného metodou řezů a nejvíce deformovaný element č. 105

CIRCULAR GRID



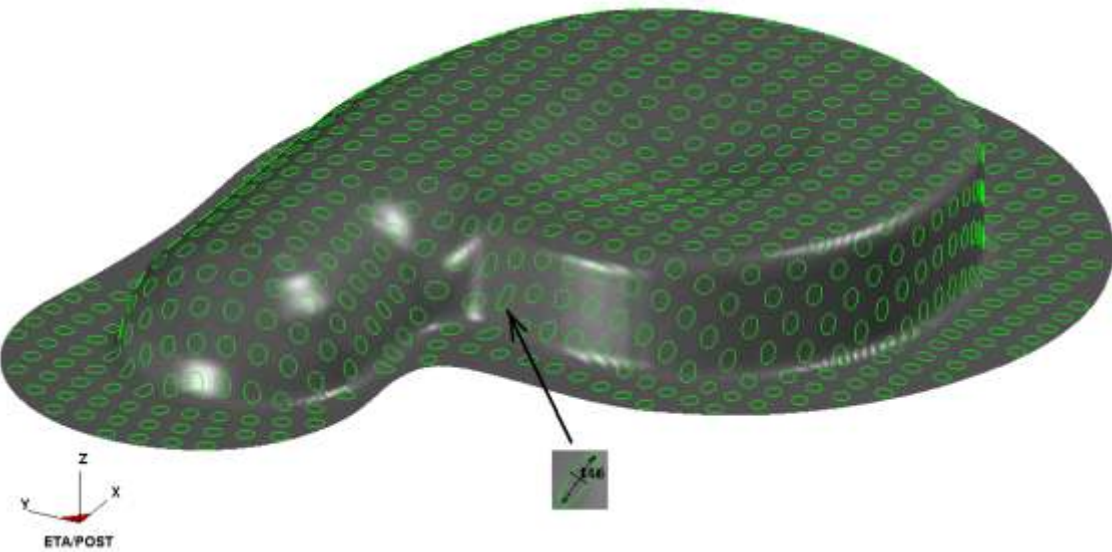
Obr. 7.14 Deformační síť na výtažku taženém z přístřihu stanoveného metodou řezů po korekci polohy a nejvíce deformovaný element č. 129

CIRCULAR GRID



Obr. 7.15 Deformační síť na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN a nejvíce deformovaný element č. 129

CIRCULAR GRID



Obr. 7.16 Deformační síť na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného pomocí BSE modulu a nejvíce deformovaný element č. 146

Z výsledků je zřejmé, že metoda provedená na reálném výtažku a s použitím softwaru udává podobné výsledky v místě největších deformací. Místo, kde se nacházejí elementy s největší poměrnou délkovou deformací (obr. 7.11, obr. 7.12, obr. 7.13, obr. 7.14, obr. 7.15 a obr. 7.16) bylo již dříve popsáno jako kritické, s možností vzniku praskliny.

Výtažek tažený ze stávajícího přístřihu vykazuje v kritickém místě největší poměrné délkové deformace, které u nejvíce deformovaného elementu na stávajícím přístřihu dosahují až k 131,3631 %. Čím více se tvar přístřihu přibližuje k optimálnímu, tím menší poměrné délkové deformace se zde nacházejí. Nejmenší poměrné deformace vykazuje výtažek z přístřihu stanoveného metodou řezů po korekci polohy, hodnota hlavní poměrné deformace je 93,3920 %. Srovnávací tabulka ukazuje pokles poměrných deformací při použití všech alternativ přístřihu od stávajícího přístřihu k přístřihu sestrojeného metodou řezů po korekci polohy. Dále k optimálnímu přístřihu a k přístřihu sestrojenému pomocí BSE modulu poměrné délkové deformace opět stoupají (tab. 7.1).

Tab. 7.1 Poměrné délkové deformace ve výtažku taženém z jednotlivých variant přístřihů

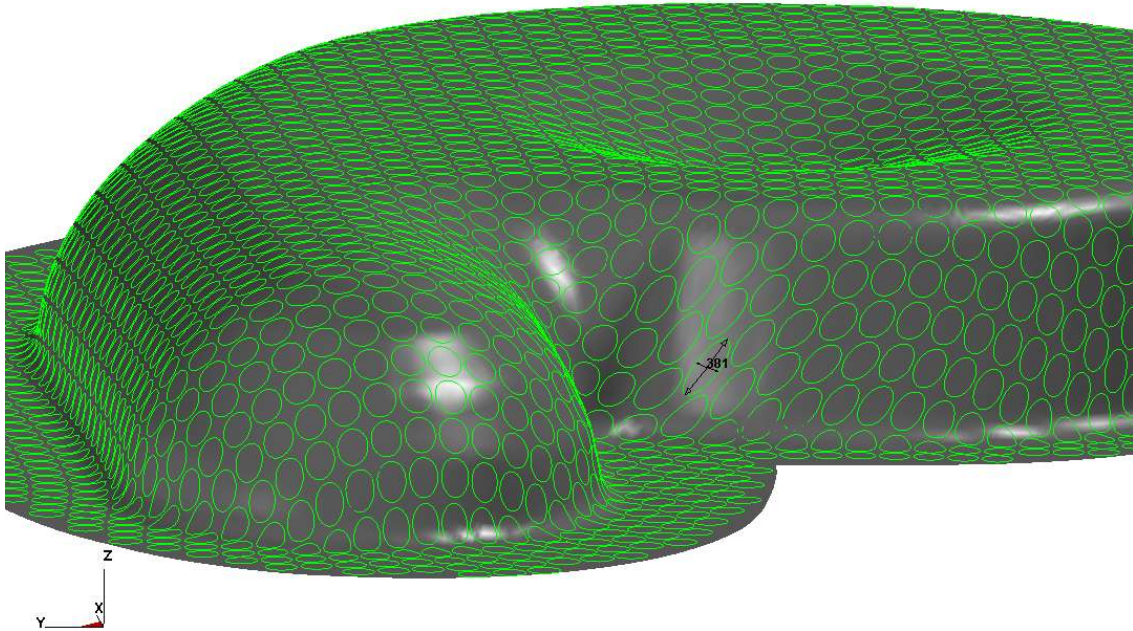
Přístřih	Číslo elementu s největší deformací	Poměrná délková deformace [%]	
		$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$
Stávající	205	131,3631	-23,8905
ČSN	157	99,0969	-17,9691
Metoda řezů	105	101,0975	-27,2899
Metoda řezů korigovaná	129	93,3920	-24,6301
TMSN	129	111,7085	-25,1789
BSE modul	146	121,6425	-30,5650

Takto řídicí zmapovaný přístřih kružnicovými elementy je ale pro softwarovou simulaci metody deformačních sítí nevýhodný. Program může vytvořit kružnice zrovna v místě, kde se nenacházejí největší deformace na výtažku a výsledek tedy může být klamavý. Protože není možnost ovlivnit rozmístění kružnicových elementů, je vhodné tyto elementy k sobě co nejvíce přiblížit, aby co nejlépe pokrývaly jak kritické místo na výtažku, tak i celou plochu výtažku.

Na obr. 7.17 je model výtažku taženého z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN s kružnicovými elementy o stejné velikosti jako v předchozím případě (průměr kružnice 4,873 mm), ale vzdálenost krajních bodů dvou kružnic (tzv. offset) byla menší. Offset byl navolen softwarem 0,595 mm. Pro toto nastavení byl na deformovaném výtažku nalezen nejvíce deformovaný element, který se nacházel v tomtéž místě jako v předchozích případech, ale velikost deformace se značně lišila. U výtažku z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN sahala hlavní poměrná délková deformace až k 117,6883 %,

u stávajícího přístříhu se jednalo o velmi vysokou hodnotu hlavní poměrné deformace 183,0715 %.

TMSN  
STEP 20 TIME: 0.086411  
CIRCULAR GRID



Obr. 7.17 Deformační síť na výtažku taženém z přístříhu sestrojeném metodou využívající TMSN

### 7.3.1 Porovnání metody deformačních sítí provedené experimentem a pomocí softwaru DYNAFORM 5.2

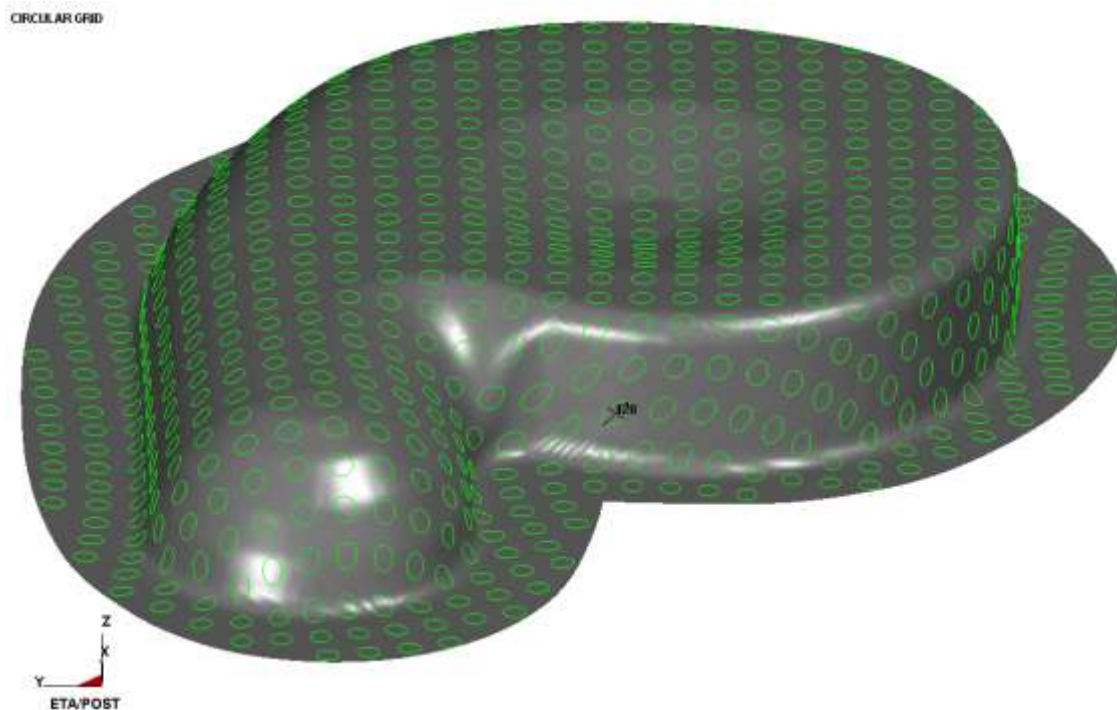
Je zajímavé porovnat mezi sebou výsledky metody deformačních sítí provedené experimentem na reálném výtažku a výsledky softwaru Dynaform 5.2. V podprogramu Dynaformu 5.2, v ETA/Post-Processoru, je výstupem analýzy „Circular Grid“ číslo zvoleného kružnicového elementu, hlavní (MAJOR) a vedlejší (MINOR) poměrná délková deformace v procentech (viz obr. 7.18).

< 205 > < MINOR >=-23.8905 (%) > < MAJOR >=131.3631 (%) >

Obr. 7.18 Výstup analýzy „Circular Grid“ z podprogramu ETA/Post-Processor

Nejvíce deformované elementy lokalizované softwarem se nacházejí na výtažku přímo v kritickém místě, pod poloměrem 12 mm. Pro porovnání s rozložením deformační

sítě na experimentálním výtažku musí být nalezeny takové elementy, které se přibližně nacházejí ve směru I a ve stejné vzdálenosti od okraje příruby jako u experimentu (obr. 7.19). Element č. 128 leží v řadě elementů procházející přibližně středem výtažku v ose x a je třetím od okraje příruby (jako kružnicový element K6 u vyhodnocení experimentu, příloha A7.1).



Obr. 7.19 Přibližné určení kružnicového elementu ve směru I deformační sítě na modelu výtažku taženého z přístříhu sestrojeného metodou využívající TMSN

Výsledky experimentu je nutné upravit do formy, která bude srovnatelná s výsledkem ze softwaru. Výpočet hlavní  $\varepsilon_1$  a vedlejší  $\varepsilon_2$  poměrné délkové deformace pro nejvíce deformovaný element ve směru I tedy proběhly s využitím hodnot délky hlavní a vedlejší osy elipsy v přílohách A4.2, A5.1, A6.1 a A7.1 dle vzorců:

$$\varepsilon_1 = \frac{L_1'' - L_0'}{L_0'} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.20)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{L_2'' - L_0'}{L_0'} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.21)$$

Výpočet hlavní  $\varepsilon_1$  a vedlejší  $\varepsilon_2$  poměrné délkové deformace pro stávající přístříh (hodnoty délky hlavní a vedlejší osy elipsy viz příloha A4.2):

$$\varepsilon_1 = \frac{8,12 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = 66,6325 \%$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4,25 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = -12,7847 \%$$

Výpočet hlavní  $\varepsilon_1$  a vedlejší  $\varepsilon_2$  poměrné délkové deformace pro přístřih dle ČSN 22 7303 (hodnoty délky hlavní a vedlejší osy elipsy viz příloha A5.1):

$$\varepsilon_1 = \frac{8,07 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = 65,6064 \%$$

$$\varepsilon_2 = \frac{3,85 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = -20,9932 \%$$

Výpočet hlavní  $\varepsilon_1$  a vedlejší  $\varepsilon_2$  poměrné délkové deformace pro přístřih sestrojený metodou řezů (hodnoty délky hlavní a vedlejší osy elipsy viz příloha A6.1):

$$\varepsilon_1 = \frac{7,98 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = 63,7595 \%$$

$$\varepsilon_2 = \frac{3,80 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = -22,0193 \%$$

Výpočet hlavní  $\varepsilon_1$  a vedlejší  $\varepsilon_2$  poměrné délkové deformace pro přístřih sestrojený metodou využívající TMSN (hodnoty délky hlavní a vedlejší osy elipsy viz příloha A7.1):

$$\varepsilon_1 = \frac{7,79 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = 59,8605 \%$$

$$\varepsilon_2 = \frac{3,81 - 4,873}{4,873} \cdot 100 = -21,8141 \%$$



Tab. 7.2 Hlavní a vedlejší poměrné deformace ve výtažku stanovené experimentem s následným výpočtem a pomocí softwaru

Přístřih	Poměrná délková deformace [%]			
	Experiment		Software	
	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$
Stávající	66,6325	-12,7847	73,3600	-21,5327
ČSN	65,6064	-20,9932	86,2328	-21,1398
Metoda řezů	63,7595	-22,0193	68,9039	-23,3185
TMSN	59,8605	-21,8141	65,3403	-20,8266
BSE modul	–	–	71,2654	-25,5434

Z tab. 7.2 je zřejmé, že výsledky experimentu a výsledky udávané softwarem Dynaform 5.2 jsou podobné, software výsledky mírně nadhodnocuje, a to převážně u hlavních poměrných deformací  $\varepsilon_1$ . U výtažku z přístřihu nejvhodnějšího pro levý kryt ventilátoru (přístřih stanovený metodou využívající TMSN) se jedná o rozdíl v pouhých 8,42 %. Tento rozdíl však může být dán tím, že byl vybrán kružnicový element, který neodpovídal přesně směru a vzdálenosti kružnicového elementu u experimentu. V podprogramu Dynaformu 5.2 – v ETA/Post-Processoru, se přeci jen jednalo o přibližné určování směru i vzdálenosti elementů.

## **8 Brzdící žebra při tažení výtažků nepravidelného tvaru**

### **8.1 Posouzení vhodnosti užití brzdícího žebra při tažení levého krytu ventilátoru**

Výtažek levého krytu ventilátoru patří mezi nesymetrické výtažky složitého tvaru. Podmínky tváření jsou při tažení takto složitých výtažků složité. Plocha polotovaru pod přídržovačem je často malá v porovnání s celkovou plochou výtažku. Plastická deformace ale probíhá v celé ploše tvářeného polotovaru. Pracovní části tažníku, tažnice a přídržovače jsou často složité, zakřivené plochy. Tažení nepravidelných výtažků je tedy mnohem obtížnější než u výtažků pravidelných. U nepravidelných výtažků dochází při tažení k nechtěným jevům jako je ztráta stability, rovinné napjatosti a současná přítomnost různých nerovnoměrných a nestejnorodých napjatostí v tvářeném materiálu.

U výtažků složitého tvaru je proto nutné pro rovnoměrné tvarování a tuhost výtažku usilovat o místní přibrzdění plechu. Různou intenzitu brzdění lze získat různými technologickými zásahy, které umožňují změnu podmínek vtahování tvářeného plechu do prostoru tažnice. Lze celkově nebo místně zvýšit přídržovací tlak nebo zvětšit plochu tvářeného materiálu pod přídržovačem. Jednou z těchto možností je také použití brzdících žebor zvolených rozměrů, tvarů, počtu a způsobu rozmístění v oblasti přídržovače po obvodě výtažku.

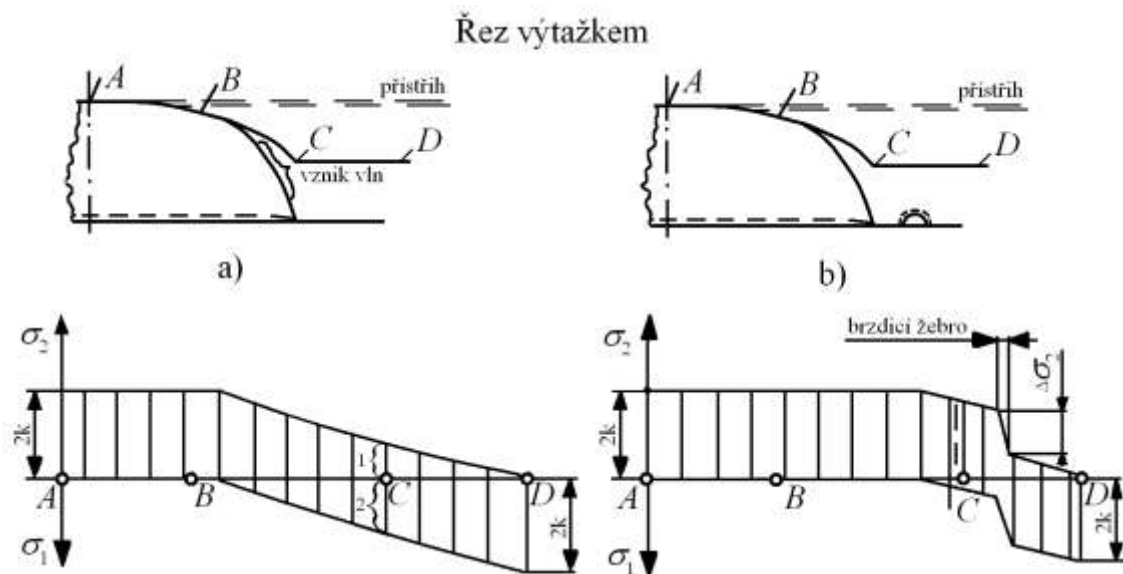
Způsob brzdění brzdícími žebry patří mezi nejúčinnější způsoby, jak lze regulovat brzdění a v potřebném rozsahu zvyšovat tahová napětí. Brzdící žebro je vlastně výstupek vytvořený pod přídržovačem za účelem přibrzdění tvářeného materiálu a umísťuje se pouze v místech, kde je žádoucí zvýšení intenzity brzdění plechu. Na rozdíl od toho brzdící lišta je umístěna po celém obvodu tažnice bez přerušování, a protože bývá umístěna na tažné hraně, bývá někdy zařazována mezi tvarové úpravy tažné hrany.

Použití brzdících žebor umožňuje:

- zvětšit sevření příruby tvářeného polotovaru a tím zvýšit přibrzdění toku materiálu během tažení,
- zvýšit přípustné rozmezí tlaku přídržovače,

- usměrnit přemísťování tvářeného polotovaru v rozích a i v rovných částech tažnice,
- záměrně zvětšovat přibrzdění přemísťovaného materiálu na jednotlivých místech pomocí více brzdících žebër,
- v některých případech snížit jakost obrobení povrchu tažnice i přidržovače tažného nástroje,
- stabilizovat tažení velkých nepravidelných výtažků a odstranit tvoření vln,
- snížení opotřebení nástrojů (přidrřovače a tažnice).

Účinek brzdícího žebra v průběhu tažení výtažku je znázorněn na obr. 8.1. Na obr. 8.1(a) je znázorněno použití plochého přidřovače, na obr. 8.1(b) přidřovače s brzdícím žebrem. Na spodní části obrázku je pro obě varianty zakreslen průběh hlavních normálových napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  na povrchu AD. Náchylnost ke vzniku vln je určena velikostí a poměrem tahových a tlakových napětí.



Obr. 8.1 Schéma použití plochého přidřovače (a), použití přidřovače s brzdícím žebrem (b) a velikosti hlavních normálových napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  na povrchu AD

Z porovnání průběhů napětí u obou případů vyplývá, že použitím brzdícího žebra se téměř odstraní tlakové napětí v úseku CD. Tím může být dosaženo výtažku bez zvlnění v jeho okrajových částech. V místě C došlo k výrazné změně stavu napjatosti, kdy se pomocí brzdícího žebra zvýšilo tahové napětí o hodnotu  $\Delta\sigma_2$ .

Protože výtažek levého krytu ventilátoru patří mezi nesymetrické výtažky složitého tvaru a při jeho tažení dochází k výše popsaným negativním jevům, bylo by vhodné při jeho tažení použít brzdící žebro v rovinné části výtažku, kde se materiál přemísťuje největší rychlostí.

## 8.2 Tvary, rozměry a umístění brzdících žeber

Počet a rozložení brzdících žeber se při konstrukci nástrojů obvykle stanoví odhadem a poté podle výsledků dodatečně upraví. Musí být také určeno, zda bude žebro umístěno ve spodní části tažidla (v tažnici) nebo ve vrchní části tažidla (v přídržovači). Vrchní nebo spodní uložení brzdících žeber nemá podstatný vliv na intenzitu přibrzdění. Obvykle se dává přednost umístění v přídržovači, protože takové umístění zjednodušuje slícování žebra se zaoblenými drážkami v tažnici, ulehčuje seřízení nástroje a zaručuje větší trvanlivost žeber. V tažnici se pak pro brzdící žebro vytvoří odpovídající drážka.

Vhodné umístění žeber v přídržovači je otázkou zkušeností. Literatura uvádí vzdálenost 20 mm až 30 mm od tažné hrany tažnice, v případě většího počtu brzdících žeber za sebou se zachovává vzdálenost 25 mm až 35 mm [20]. Optimální umístění žeber je v rovinné části obrysu tažné hrany. Ukončení žeber se doporučuje provést  $10^\circ$  až  $15^\circ$  před počátkem zaoblení rohu [20].

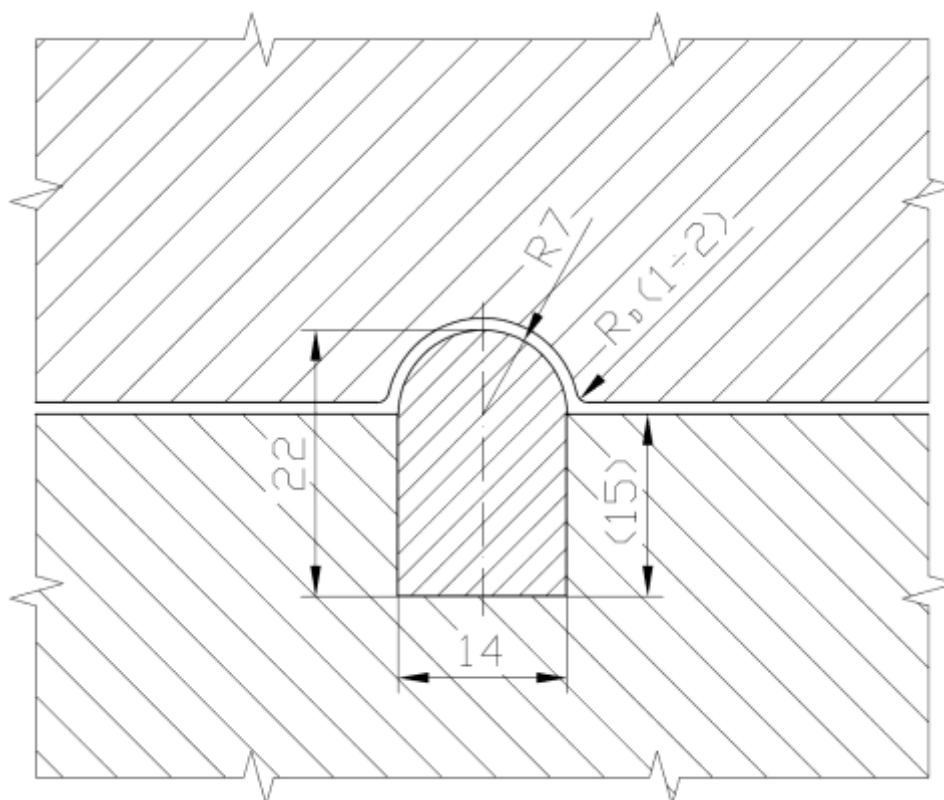
Aby byl účinek použití žeber co nejefektivnější, je nutné najít nejvhodnější geometrický profil a rozměr. Intenzita brzdění součásti totiž závisí na mnoha parametrech jako je:

- poloměr zaoblení samotného žebra, také zaoblení mezi svislou stěnou žebra a tažnicí,
- celkový úhel opásání (zaoblení žebra, rádius mezi svislou stěnou tažnice a žebrem, zaoblení tažné hrany), to vše v závislosti na výšce žebra,
- tloušťka a mechanické vlastnosti taženého materiálu,
- množství brzdících žeber.

Při nevhodné volbě geometrie profilu (poloměr zaoblení, výška apod.) a umístění žebra se lisovatelnost nápadně zhoršuje, můžou se náhle zvětšit tahová napětí, která způsobí trhání plechu v blízkosti tažné hrany.

Brzdící žebro nesmí být příliš vysoké, aby se kov deformací za studena nadměrně nezpevňoval. Vysoké žebro také může způsobit při vlačování do plochého výstřihu zvlnění materiálu, které se potom už nedá odstranit. Je tedy výhodnější použít několik nízkých brzdících žeber za sebou než jedno vysoké.

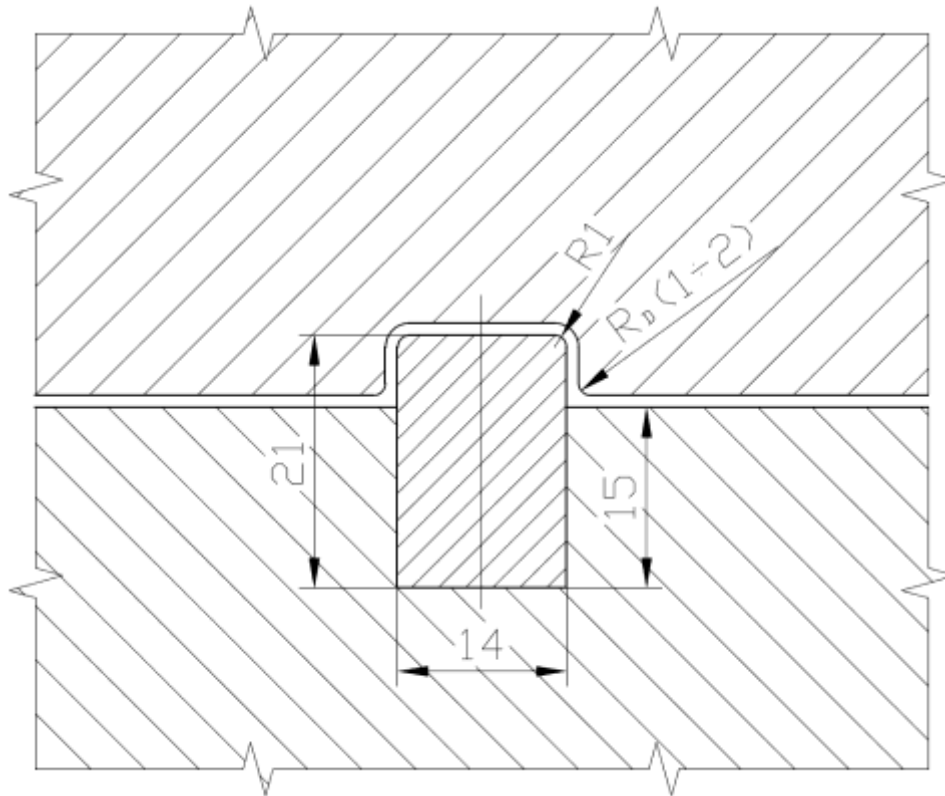
Brzdící žebra bývají široká 5 mm až 10 mm a 1,2 mm až 5 mm vysoká, podle velikosti a tvaru výtažku s tloušťky taženého plechu [18]. Brzdící žebro, jeho tvar a jeho rozměry, doporučené AZ Škoda Mladá Boleslav, uvádí literatura [19] a je znázorněno na obr. 8.2.



8.2 Brzdící žebro doporučené AZ Škoda Mladá Boleslav

V některých tažidlech se používají pravoúhlá brzdící žebra. Sevřením příruby tvářeného polotovaru pravoúhlým brzdícím žebrem vznikají v materiálu tahová napětí. V tomto případě se snižuje tahová napjatost výchozího materiálu pod přidržovačem, která je však menší než při obvyklých podmínkách tažení při použití brzdících žeber zaobleného tvaru. Použitím pravoúhlých brzdících žeber po celém obvodu výtažku (brzdící lišta) se dá dosáhnout rovnoměrného tahového napětí, a tím zvýšení jakosti výtažku. V důsledku větší brzdící intenzity pravoúhlých brzdících žeber mají lisované součásti minimální technologické přídatky, malé pružné deformace a zvýšenou jakost povrchu.

Intenzita přibrzdění taženého materiálu brzdícími žebry pravoúhlého průřezu závisí na poloměru zaoblení těchto brzdících žeber, výšce a počtu žeber. Se zmenšujícím se poloměrem zaoblení a vzrůstajícím počtem žeber se intenzita přibrzdění tvářeného materiálu zvyšuje. Brzdící žebro pravoúhlého tvaru, doporučované AZ Škoda Mladá Boleslav, uvádí literatura [19] a je znázorněno na obr. 8.3.



8.3 Brzdící žebro pravoúhlého tvaru doporučované AZ Škoda Mladá Boleslav

Důležitou vlastností brzdících žeber je odolnost proti otěru, která ovlivňuje možnost zadírání plechu při tažení. Je nutné zvolit správný materiál brzdícího žebra a správnou povrchovou úpravu. Obvyklým materiálem pro výrobu žeber je konstrukční uhlíková ocel 11 600. Na povrch žebra bývá nanesena vrstva tvrdochromu nebo je povrch nitridován.

U nerotačních výtažků se brzdící žebra zhotovují zvlášť a upevňují se do vyfrézovaných drážek zalisováním, přišroubováním, přinýtováním nebo připájením mosazí, někdy také navařením a obrobením navařené části.

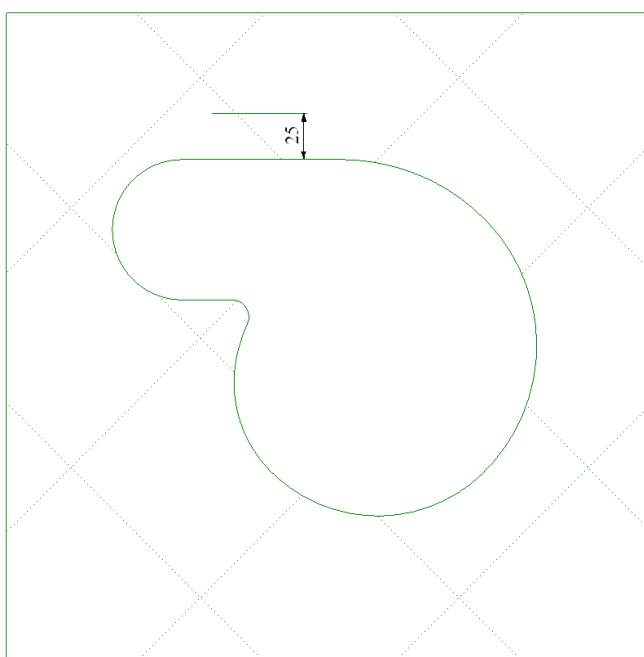
V literatuře jsou uvedena různá doporučení týkající se geometrie brzdících žeber. Volba geometrie i umístění žebra však stále závisí na zkušenostech a na konkrétním výtažku. Určitou výhodou je využití počítačové simulace k použití brzdících žeber

v procesu tažení plechu. Lze nastavit a vyzkoušet různé tvary a geometrie brzdících žebor, aniž by se musel zhotovit drahý prototyp nástrojů, který je pro firmu finančně náročný.

### 8.3 Simulace procesu tažení výtažku z přístřihu stanoveného metodou využívající TMSN za pomoci brzdícího žebra

Vhodné zvolení umístění, délky a geometrie brzdícího žebra je otázkou mnoha pokusů a ne vždy se podaří najít správné řešení pro daný výtažek. Levý kryt ventilátoru je tvarově složitá součást a tažení nepravidelných výtažků je mnohem obtížnější než u výtažků pravidelných. Využití softwaru v předvýrobní etapě je proto velmi výhodné.

Byly vypočítány tři sady výpočtů, z nichž se v první sadě experimentovalo s geometrií žebra, v druhé sadě s délkou žebra a v třetí sadě výpočtů probíhaly experimenty se vzdáleností žebra od vnitřního okraje přidržovače. Pro daný výtažek bylo zvoleno, že se brzdící žebro bude nacházet ve vrchní části tažidla – v přidržovači a bude umístěno do oblasti, kde probíhá vtahování materiálu největší rychlostí a je nutné jej brzdit, a to do rovinné části výtažku. Umístění žebra je pak definováno čarou, kterou lze na model přidržovače umístit buď v programu CATIA V5 nebo přímo v Dynaformu 5.2. Tato čára poté představuje podélnou osu brzdícího žebra (obr. 8.4).



Obr. 8.4 Vzdálenost osy brzdícího žebra od vnitřního okraje přidržovače

Protože model přídržovače je tvořen pouze plochami („surfaces“), musela se na modelu přídržovače v Dynaformu vytvořit síť elementů („elements“), která je potřebná pro výpočet. Aby bylo možno na součásti pracovat, musí být zapnuta v režimu ON a „Current Part“ (aktuální součást). Vytvoření elementů (meshování) se provádí v modulu „Preprocess“ výběrem záložky „Element“ a v té „Surface Mesh“. Objeví se nabídka tří různých způsobů meshování a tvaru elementů. Pro přídržovač byl vybrán styl meshování „Tool Mesh, Connected“, protože se jedná o nástroj. V nabídnutém okně byla také zvolena velikost elementů (10). V nabídce parametrů budoucí sítě („Parameters“) se dále volí: „Max. Size“, „Min. Size“ (maximální a minimální velikost elementů), „Chordal Deviation“ (tětivová odchylka) – řídí počet elementů podél čáry/povrchu zakřivení, „Angle“ (hrana) – řídí hlavní čáru, „Gap Tol.“ (tolerance mezer) – řídí, zda jsou dvě přilehlé povrchy elementů spojeny. Poté už byl k nameshování vybrán přídržovač a výběr se potvrdil. Velikost elementů nástrojů má vliv na konečný tvar výtažku, ne však na přesnost výsledků řešení.

Na takto připraveném modelu přídržovače může být nadefinováno brzdící žebro. V hlavní záložce „Tools“ se vybere nabídka „Draw Bead“. V zobrazené tabulce je možné zvolit jméno pro brzdící žebro a barvu. Protože zde zatím žádné žebro není definováno, práce na novém žebře se začne výběrem tlačítka „New“. Tabulka s názvem „Draw Bead Properties“ pak umožňuje upravit další vlastnosti žebra. Tyto vlastnosti byly navoleny již Dynaformem a protože byly vyhovující, nebyly dále měněny. Některé nejdůležitější z mnoha vlastností ukazuje tab. 8.1.

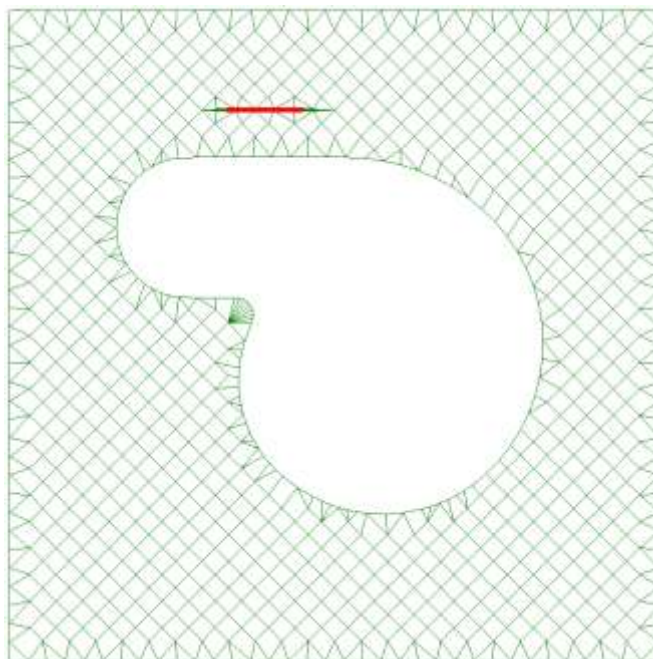
Tab. 8.1 Vlastnosti brzdícího žebra

Draw Bead Properties	
Název části („Section Title“)	drwb_pro
Koef. statického tření („Static Friction Coeff.“)	0,1 [-]
Koef. dynamického tření („Dynamic Friction Coeff.“)	0 [-]
Zahloubení brzdícího žebra („Draw Bead Depth“)	dle tab. 8.3 [-]
Koeficient viskózního tlumení („Viscous Damping Coeff.“)	20 [-]
Začátek působení žebra („Draw Bead Birth Time“)	0 s
Konec působení žebra („Draw Bead Death Time“)	$1 \cdot 10^{20}$ s

Pokud jsou prvotní vlastnosti brzdícího žebra nastaveny, lze přistoupit k výběru žebra přímo na modelu nástroje (přídržovač – BINDER). Tento výběr lze provést buď



pomocí čáry („line“) nebo bodů a uzlů („point/node“). Jakmile se jednou z těchto dvou možností vybere předem připravená čára a výběr se potvrdí (OK), vybraná oblast bude označena takovou barvou, jaká byla zvolena na počátku. Výsledné žebro pak vypadá jako na obr. 8.5.



Obr. 8.5 Zvolené žebro na vysíťovaném modelu přidržovače

Zbývá zvolit geometrii brzdícího žebra. Správná volba geometrie je velmi důležitý, ale také velmi obtížný úkon, vše je otázkou mnoha pokusů. Většinou se nepodaří napoprvé najít takové žebro, které by bylo vhodné pro brzdění výtažku. Musí být provedeno mnoho výpočtů a analýz, z nichž pak bude vybráno optimální brzdící žebro pro daný výtažek.

Zvolením nabídky „Drawbead Force“ je možné dále vybrat volbu „Auto Load Curve“, kde se pak v tabulce „Draw Bead Force Prediction“ volí typ a parametry brzdícího žebra („Draw Bead Type and Parameters“), parametry plechu („Sheet Parameters“), materiálové parametry („Material Parameters“) a další rozmanité parametry („Miscellaneous Parameters“).

Na výběr jsou tři typy tvaru brzdících žebor a to obdélníkové („Rectangular“), půlkruhové („Semi-circular“) a hrana („Edge“). Byl zvolen obdélníkový tvar brzdícího žebra, kde byly postupně voleny různé parametry geometrie žebra, z nichž jedna zvolená geometrie je uvedena v tab. 8.2.

Tab. 8.2 Příklad zvolené geometrie brzdícího žebra pro simulaci

Draw Bead Parameters	
Výška („Depth“)	5 mm
Vstupní a výstupní úhel („Entrance Angle 1, 2“)	55 °
Vstupní a výstupní radius („Entrance Radius 1, 2“)	6 mm
Šířka drážky pro brzdící žebro („Groove Length“)	18 mm
Vstupní a výstupní úhel drážky („Groove Angle 1, 2“)	55 °
Vstupní a výstupní radius drážky („Groove Radius 1, 2“)	3 mm

Do parametrů plechu („Sheet Parameters“) je nutno uvést rychlost tažení, která byla zvolena dle doporučení odborné literatury  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (viz kap. 6.3.2), tato rychlost je vhodná pro menší lisy a tloušťku plechu, která je 0,9 mm. Materiálové parametry („Material Parameters“) zůstaly stejné pro materiál DC04 jako v tab. 6.2. Další rozmanité parametry („Miscellaneous Parameters“) byly navoleny Dynaformem a protože byly vyhovující, byly ponechány.

Po zadání všech parametrů brzdícího žebra potřebných pro výpočet se dále postupuje jako při výpočtu a simulaci bez brzdícího žebra (viz kap. 6). K výpočtu a simulaci procesu tažení výtazku levého krytu ventilátoru byl použit program DYNAFORM 5.2. Uložená data s příponou df byla poté zpracována v řešiči (Solver LS DYNA). Pro výslednou simulaci byl použit ETA/Post-Processor, kde je možné přehrát simulaci celého procesu tažení nebo se podívat na jednotlivé kroky simulace.

## **8.4 Výsledky simulace tažení levého krytu ventilátoru s brzdícím žebrem**

Výsledky tří sad výpočtů byly rozděleny do tří kapitol, z nichž každá má za úkol v dané oblasti vyřešit, jaký tvar žebra (kap. 8.4.1), jaká délka žebra (8.4.2) i jaké umístění žebra na přídržovači (kap. 8.4.3) jsou pro výtazek levého krytu ventilátoru optimální.

Na finální výtazky byly použity dvě analýzy výsledků („FLD“ a „Thickness“), podle kterých byly výsledky mezi sebou porovnávány a hodnoceny.

### 8.4.1 Vliv změny geometrie žebra na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru

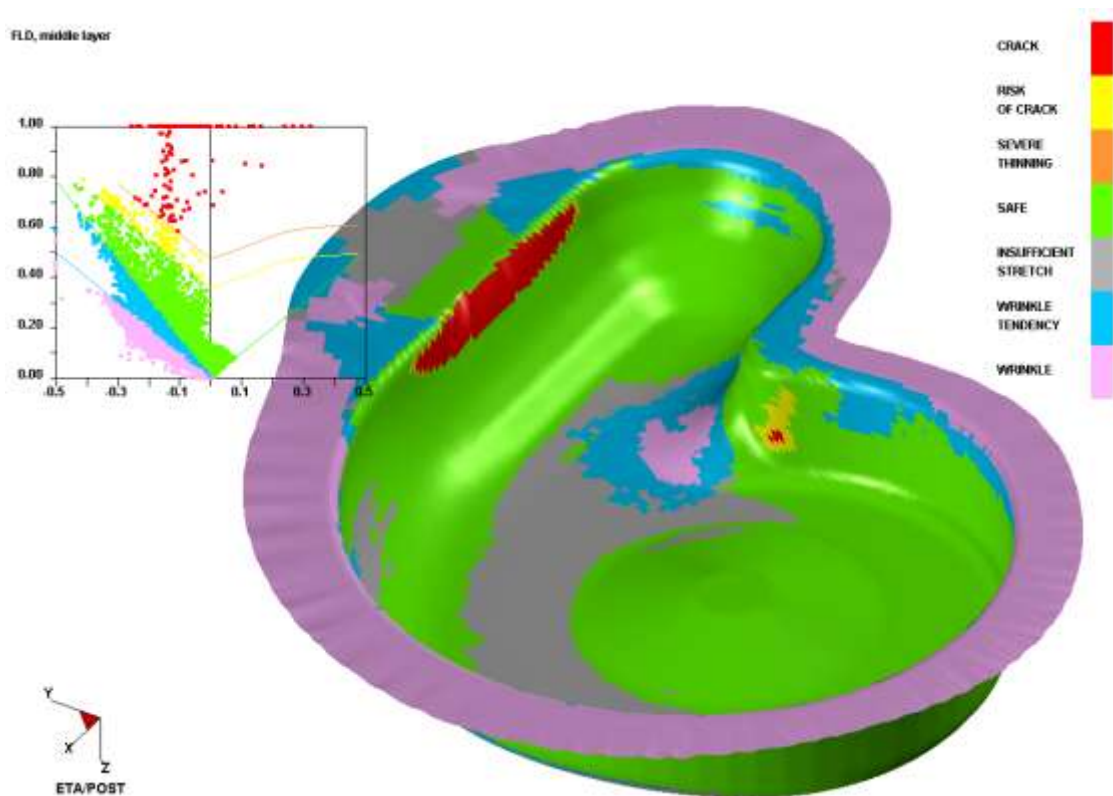
Geometrie brzdícího žebra byla pro výpočet volena v několika variantách, volbu geometrie žebra pro čtyři výpočty uvádí tab. 8.3. Délka žebra zůstala zachována pro všechny čtyři případy 52 mm a vzdálenost od vnitřního okraje 17 mm.

Tab. 8.3 Zvolené varianty geometrie brzdícího žebra pro simulaci

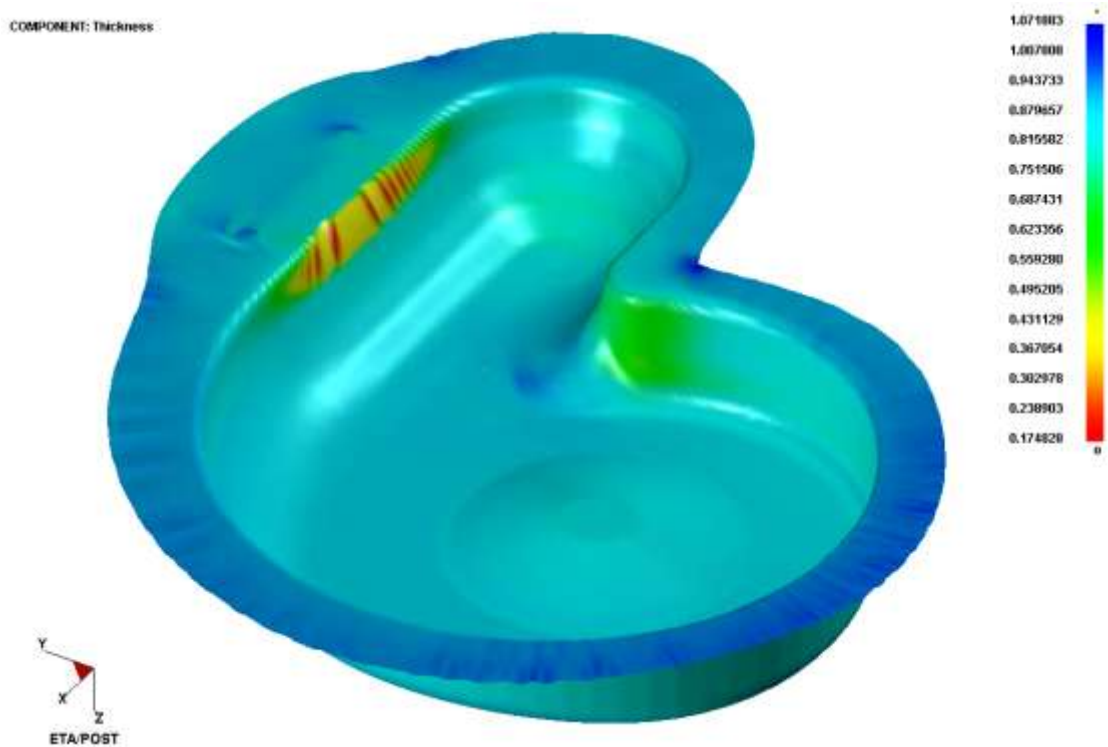
Draw Bead Parameters	Čtyři druhy geometrie žebor pro výpočet			
	žebro 1	žebro 2	žebro 3	žebro 4
Výška („Depth“) [mm]	7	5	3	2
Vstupní a výstupní úhel („Entrance Angle 1, 2“) [°]	55	55	55	55
Vstupní a výstupní radius („Entrance Radius 1, 2“) [mm]	6	6	4	2
Šířka drážky pro brzdící žebro („Groove Length“) [mm]	20	18	10	8
Vstupní a výstupní úhel drážky („Groove Angle 1, 2“) [°]	55	55	55	55
Vstupní a výstupní radius drážky („Groove Radius 1, 2“) [mm]	3	3	3	2

Výsledek simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru při použití brzdícího žebra 1 je na obr. 8.6 a obr. 8.7. Obr. 8.6 zobrazuje analýzu rozboru napětí na výtažku a jeho znázornění v diagramu mezních deformací a obr. 8.7 analýzu tloušťky plechu výtažku. Je patrné, že výsledný výtažek je naprosto nevyhovující, v rovinné části výtažku se vlivem působení brzdícího žebra tvoří velká prasklina. V kritickém místě praskliny došlo k určitému zlepšení, tloušťka plechu se zde pohybuje okolo hodnoty 0,6 mm. Na dně výtažku pod poloměrem 12 mm došlo k zmírnění vln.

Při použití dalších žebor (žebro 2 až 4 v tab. 8.3) v procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru nedošlo k žádnému zlepšení, naopak prasklina v rovinné části výtažku i v kritickém místě byla větší než při užití žebra 1. Lze tedy konstatovat, že výpočet s brzdícím žebrem 1 udává nejlepší výsledky, s použitím žebra 2 se výsledky zhoršují a u tažení s použitím dalších žebor (tab. 8.3) se už výsledky dále nemění.



Obr. 8.6 Rozbor napětí na výtažku taženém z optimálního přístřihu z oceli DC04 při použití brzdícího žebra 1 (tab. 8.3) a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

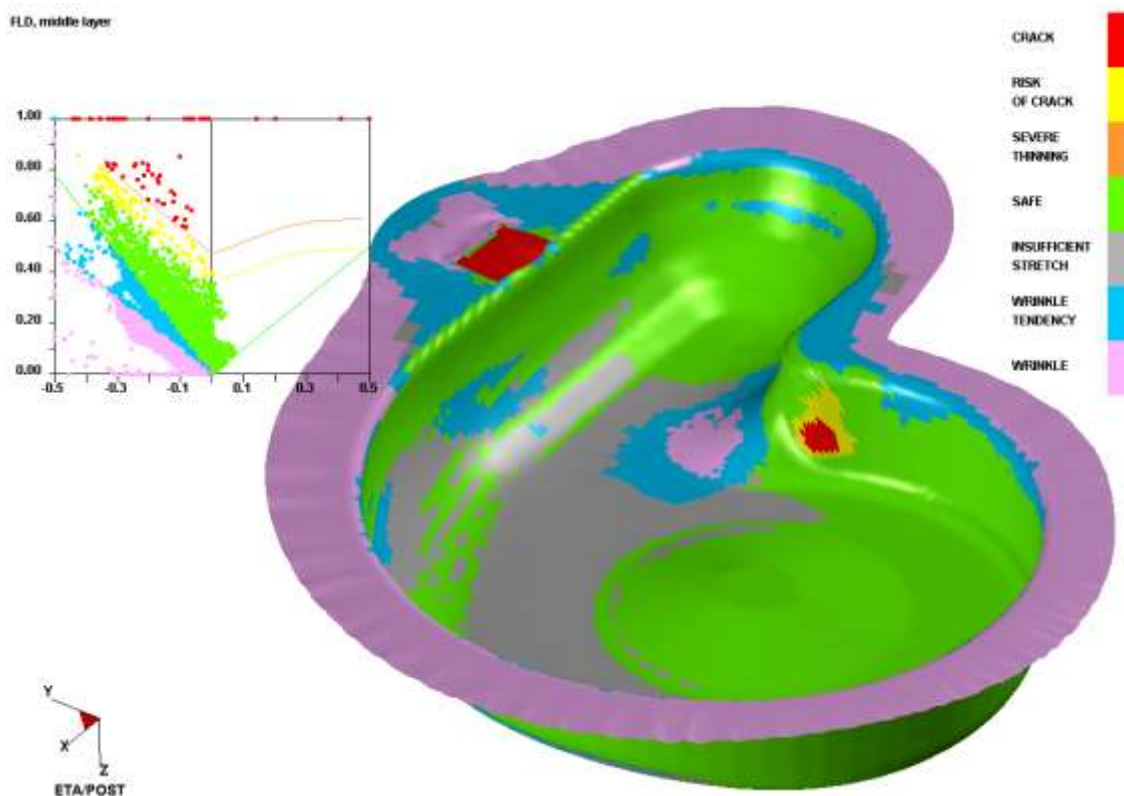


Obr. 8.7 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z optimálního přístřihu z oceli DC04 při použití brzdícího žebra 1 (tab. 8.3)

## 8.4.2 Vliv změny délky žebra na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru

Délka žebra byla pro výpočet volena nejprve 52 mm (kap. 8.4.1), poté 41,6 mm, 31,2 mm, 22,8 mm. Geometrie žebra byla ponechána pro všechny výpočty z této sady dle tab. 8.3, žebro 2. Vzdálenost od vnitřního okraje byla pro všechny čtyři případy ponechána 17 mm.

Výsledek simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru při použití brzdícího žebra 2 o délce 22,8 mm je na obr. 8.8 a obr. 8.9. Obr. 8.8 zobrazuje analýzu rozboru napětí na výtažku a jeho znázornění v diagramu mezních deformací a obr. 8.9 analýzu tloušťky plechu výtažku.



Obr. 8.8 Rozbor napětí na výtažku taženém z optimálního přístříhu z oceli DC04 při použití brzdícího žebra 2 (tab. 8.3) o délce 22,8 mm a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



Obr. 8.9 Analýza tloušťky výtažku taženého z optimálního přístříhu z oceli DC04 při použití brzdícího žebra 2 (tab. 8.3) o délce 22,8 mm

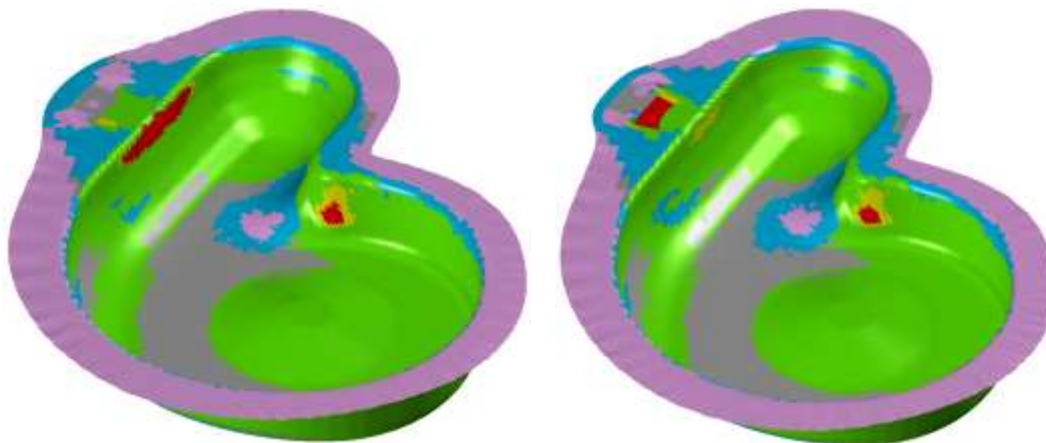
Je patrné, že u výtažku došlo ke zlepšení, v rovinné části se prasklina netvoří tak, jako v kap. 8.4.1 při použití žebra o délce 52 mm. V tomto případě se plech trhá na přírubě v místě přímo pod žebrem. Tato vada je ovšem také nepřijatelná, protože v tomto místě je potřeba materiálu na přírubu, a to minimálně 14 mm od vnitřního okraje výtažku. Pod okrajem v rovinné části se tloušťka plechu pohybuje okolo hodnoty 0,7 mm a v kritickém místě praskliny okolo hodnoty 0,5 mm. Na dně výtažku pod poloměrem 12 mm došlo k výraznému zmírnění zvlnění.

Při použití dalších brzdících žebber (délka 41,6 mm a 31,2 mm) v procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru nedošlo ke zlepšení, naopak se znovu objevila prasklina v rovinné části výtažku a i v kritickém místě byla prasklina větší než při užití žebra o délce 22,8 mm. Lze tedy konstatovat, že výpočet s brzdícím žebrem o délce 22,8 mm jako jediný udává jiné výsledky, než je tomu u ostatních variant brzdícího žebra. Výsledek simulace tažení výtažku s brzdícím žebrem o délce 22,8 mm sice není ideální, ale s použitím delších žebber se výsledky (zvláště v rovinné části výtažku) jen zhoršují.

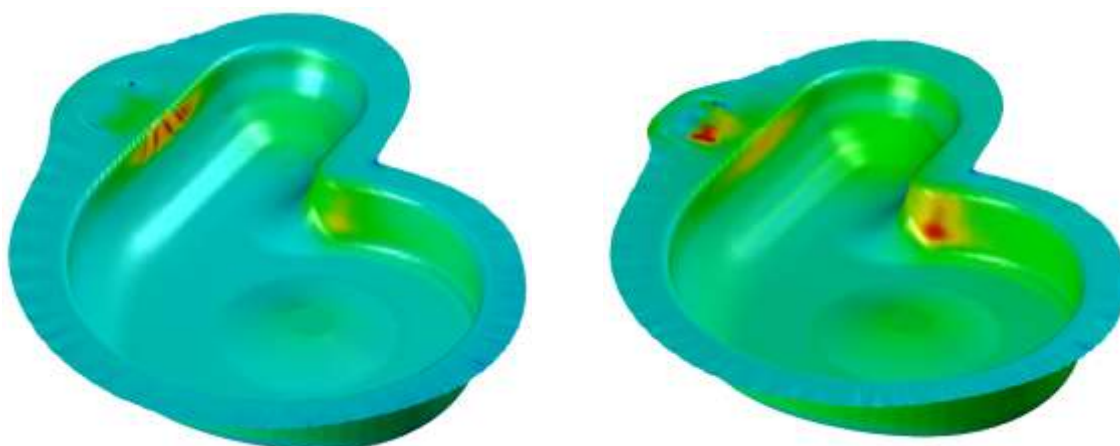
### 8.4.3 Vliv změny vzdálenosti žebra od vnitřního okraje přídržovače na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru

Vzdálenost čáry (nebo-li osy žebra) byla pro výpočet volena nejprve 17 mm (kap. 8.4.1, kap. 8.4.2), poté 20 mm a 25 mm od vnitřního okraje přídržovače. Geometrie žebra byla ponechána pro všechny výpočty z této sady dle tab. 8.3, žebro 2, délka žebra byla navržena dvěma způsoby, a to 41,6 mm a 31,2 mm.

Výsledek simulace tažení výtažku levého krytu ventilátoru při použití brzdícího žebra 2 o délce 31,2 mm je na obr. 8.10 a obr. 8.11. Obr. 8.10 zobrazuje analýzu rozboru napětí na výtažku a obr. 8.11 analýzu tloušťky plechu výtažku.



Obr. 8.10 Výtažek tažený při použití brzdícího žebra 2 (tab. 8.3) o délce 31,2 mm ve vzdálenosti 20 mm (vlevo) a 25 mm (vpravo) od vnitřního okraje přídržovače



Obr. 8.11 Analýza tloušťky výtažku taženého při použití brzdícího žebra 2 (tab. 8.3) o délce 31,2 mm ve vzdálenosti 20 mm (vlevo) a 25 mm (vpravo) od vnitřního okraje přídržovače

Při použití brzdících žeber o délce 41,6 mm ve vzdálenosti 20 mm a 25 mm od vnitřního okraje přidržovače v procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru nedošlo ke zlepšení, naopak byla prasklina v rovinné části výtažku větší. Z výsledků lze tedy obecně říci, že lepší výsledky prokázaly výpočty při použití kratšího žebra dále od vnitřního okraje přidržovače. V případě vzdálenosti žebra 25 mm od vnitřního okraje přidržovače se prasklina netvořila přímo na výtažku, ale v menší míře na přírubě.

## **8.5 Zhodnocení výsledků simulace tažení výtažku s brzdícím žebrem**

Z výsledků počítačové simulace je patrné, že existuje mnoho cest k finálnímu návržení brzdícího žebra pro tažení výtažků. V případě výtažku levého krytu bylo provedeno mnoho výpočtů a mnoho simulací, z nichž žádná neprokazuje alespoň tak uspokojivé výsledky jako simulace tažení výtažku z optimálního přístřihu z oceli DC04 bez brzdícího žebra (viz kap. 6.6.4).

Použití brzdících žeber v procesu tažení výtažků z tenkého plechu má řadu výhod, je možné zvýšit přibrzdění toku materiálu během tažení, usměrnit přemísťování tvářeného polotovaru v rozích a v rovných částech tažnice, stabilizovat tažení velkých nepravidelných výtažků a odstranit tvoření vln, snížit opotřebení nástrojů atd..

Z výsledků simulace tažení levého krytu ventilátoru při použití brzdícího žebra v rovinné části tažnice (přidržovače) si lze povšimnout, že ve všech případech výpočtu došlo ke značnému zmírnění tvorby vln na dně výtažku pod kritickým místem s poloměrem 12 mm. Nevýhodou je ale vznik praskliny v rovinné části výtažku nebo v oblasti pod brzdícím žebrem.

Tvorba praskliny v rovinné části výtažku je velmi nepříjemným jevem, který se u výtažku taženého bez brzdícího žebra nevyskytoval. Je tedy otázkou, zda je použití brzdícího žebra při tažení výtažku levého krytu ventilátoru vhodné. V tomto konkrétním případě, i přes určitou výhodu v oblasti zmírnění tvorby vln na dně výtažku, by bylo vhodnější vyrobit výtažek tažením bez použití brzdícího žebra. Je ovšem možné, že dosud nebylo nalezeno takové žebro, které by bylo pro tažení levého krytu ventilátoru optimální. Tato oblast tedy může být dále předmětem výzkumu, kde by bylo rovněž velmi zajímavé porovnat výsledky počítačové simulace s experimentem.



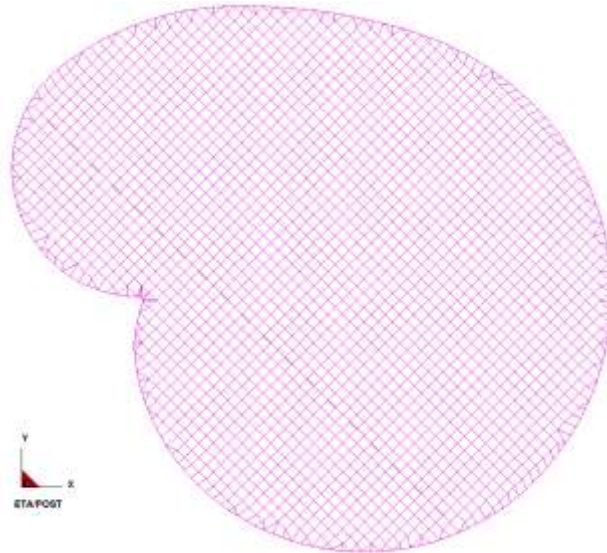
## **9 Vliv změny tvaru přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN na výsledek procesu tažení levého krytu ventilátoru**

Výtažek levého krytu ventilátoru spadá do skupiny tvarově složitých výtažků a je vždy velmi obtížné pro tuto skupinu výtažků navrhnout optimální přístřih tak, aby vyhovoval jak z hlediska napěťových a kinematických poměrů, tak z hlediska deformací. Pro zadaný výtažek byl zkonstruován optimální přístřih metodou využívající TMSN (viz příloha A2.8). Tvar přístřihu sestrojeného touto metodou zabezpečuje při tažení optimální kinematické poměry, které spočívají v tom, že trajektorie pohybu částic materiálu jsou kolmé k obrysu kontaktu tažníku s přístřihem na počátku tažení. Na obrysu jsou smyková napětí rovna nule a nedochází k tangenciálnímu přemístění materiálu do stěn výtažku, které by způsobovalo tangenciální stlačení stěn a při malé tloušťce materiálu ztrátu stability plastické deformace, projevující se vznikem zvlnění a vrás.

Ale protože i u tažení výtažku z tohoto přístřihu stále existuje určitá možnost vytvoření praskliny v kritickém místě a tvorby mírného zvlnění a vrás (bylo zjištěno počítačovou simulací, obr. 6.16), byly provedeny pokusy za účelem tento problém odstranit. Změnou tvaru přístřihu v místě vybrání lze docílit změny výsledných hodnot napětí, tloušťky plechu atd. v tomto místě na vyrobeném výtažku.

### **9.1 Změna tvaru přístřihu sestrojeného s využitím TMSN v místě vybrání zkonstruováním nového většího vybrání**

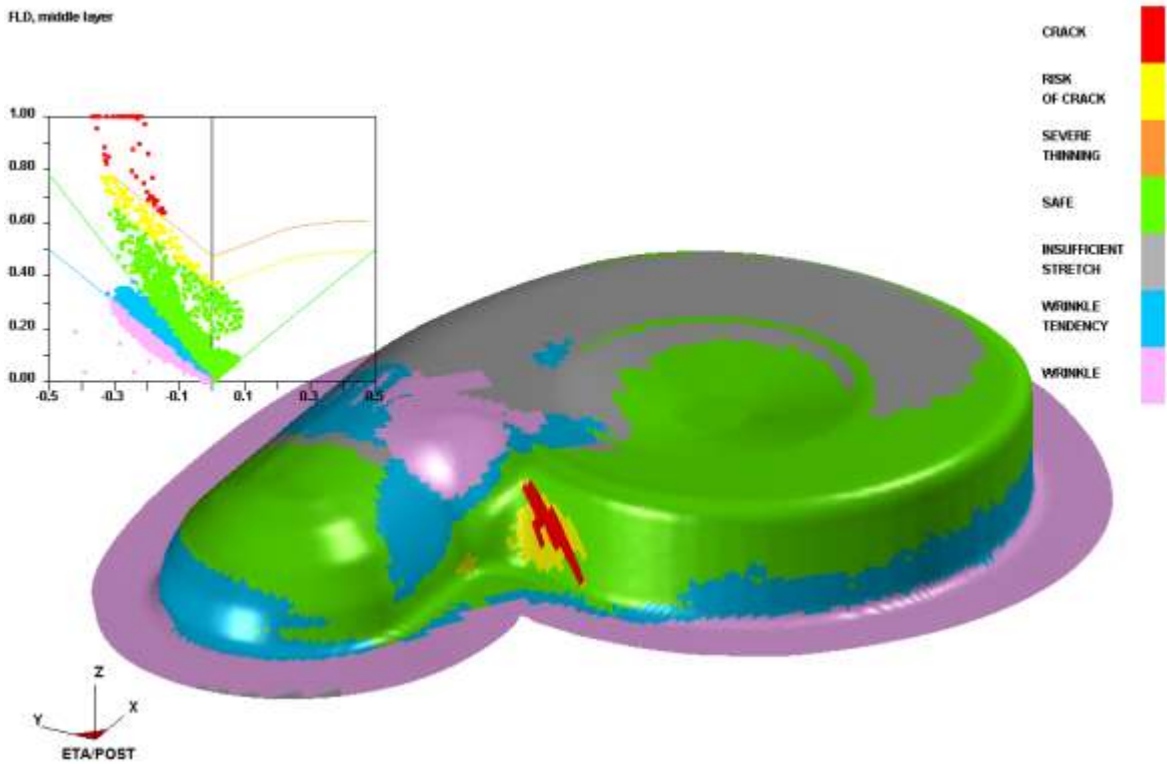
Při konstrukci nového vybrání v kritickém místě výtažku se muselo dbát především na potřebu dostatku materiálu v kritickém místě, který bude po operaci tažení představovat přírubu levého krytu ventilátoru. Zároveň byla snaha zkonstruovat nové vybrání v souladu s kluzovými čarami v tomto místě. Přístřih s nově navrženým vybráním je na obr. 9.1, výkres přístřihu je v příloze A8.1.



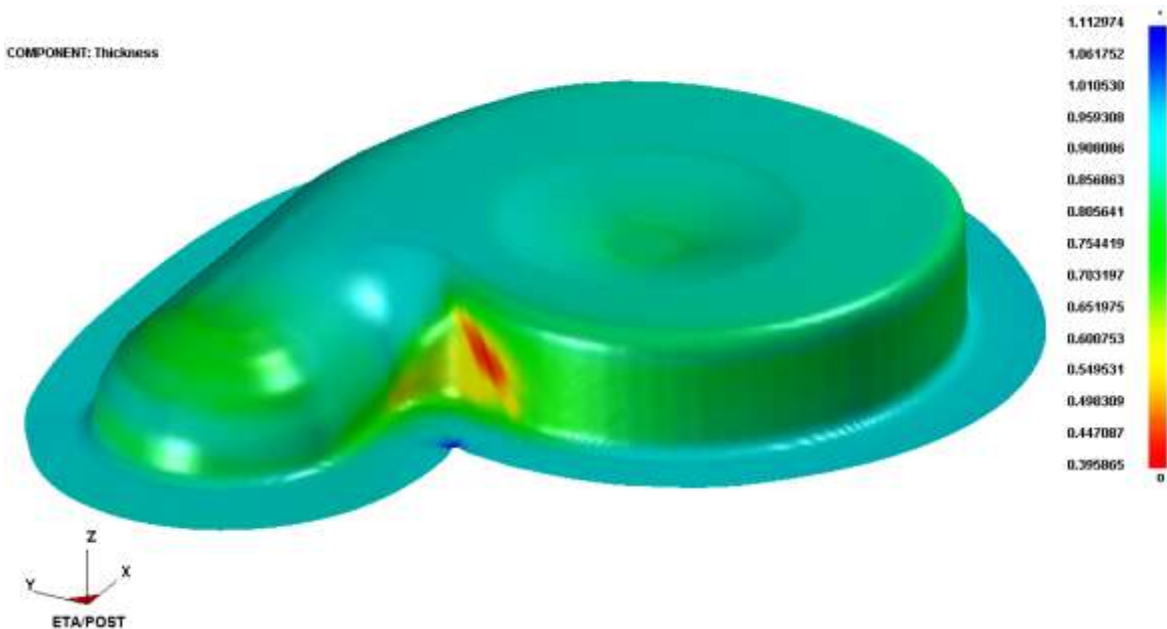
Obr. 9.1 Přístřih s nově navrženým vybráním v podobě většího vybrání

Definování obou nově upravených přístřihů (obr. 9.1, obr. 9.2) bylo provedeno v nabídce „Define Blank“. Byl zde přiřazen model přístřihu BLANK a jeho materiál DC04 (11 305.21), tab. 6.2. Ve složce „Property“, která se rovněž nachází v nabídce „Define Blank“, byla nastavena tloušťka plechu 0,9 mm. Příprava na výpočet a samotný výpočet dále proběhl jako v kap. 6. K výpočtu a simulaci procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru byl použit program DYNAFORM 5.2. Uložená data s příponou df byla poté zpracována v řešiči (Solver LS DYNA). Pro výslednou simulaci byl použit ETA/Post-Processor.

Na finálních modelech výtažku byly použity analýzy: rozvržení napětí na výtažku a jeho zobrazení v diagramu mezních deformací („FLD“, obr. 9.2, obr. 9.5) a tloušťka plechu výtažku („Thickness“, obr. 9.3, obr. 9.6).



Obr. 9.2 Rozbor napětí na výtazku taženém z přístříhu sestrojeného s využitím TMSN s nově zkonstruovaným větším vybráním z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací

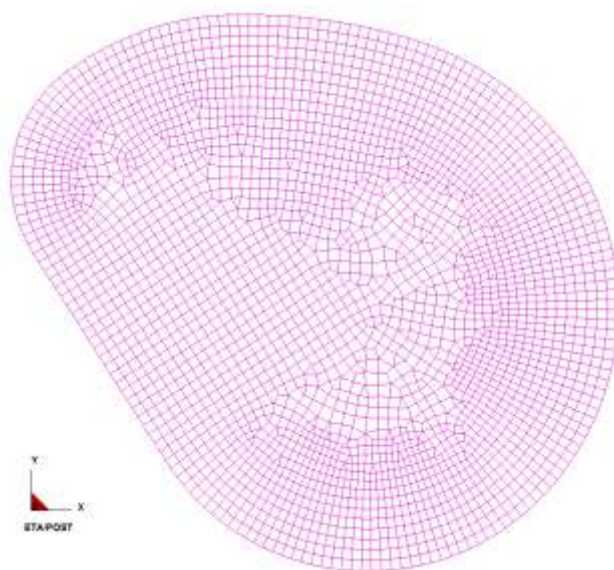


Obr. 9.3 Analýza tloušťky plechu na výtazku taženém z přístříhu sestrojeného s využitím TMSN s nově zkonstruovaným větším vybráním z oceli DC04

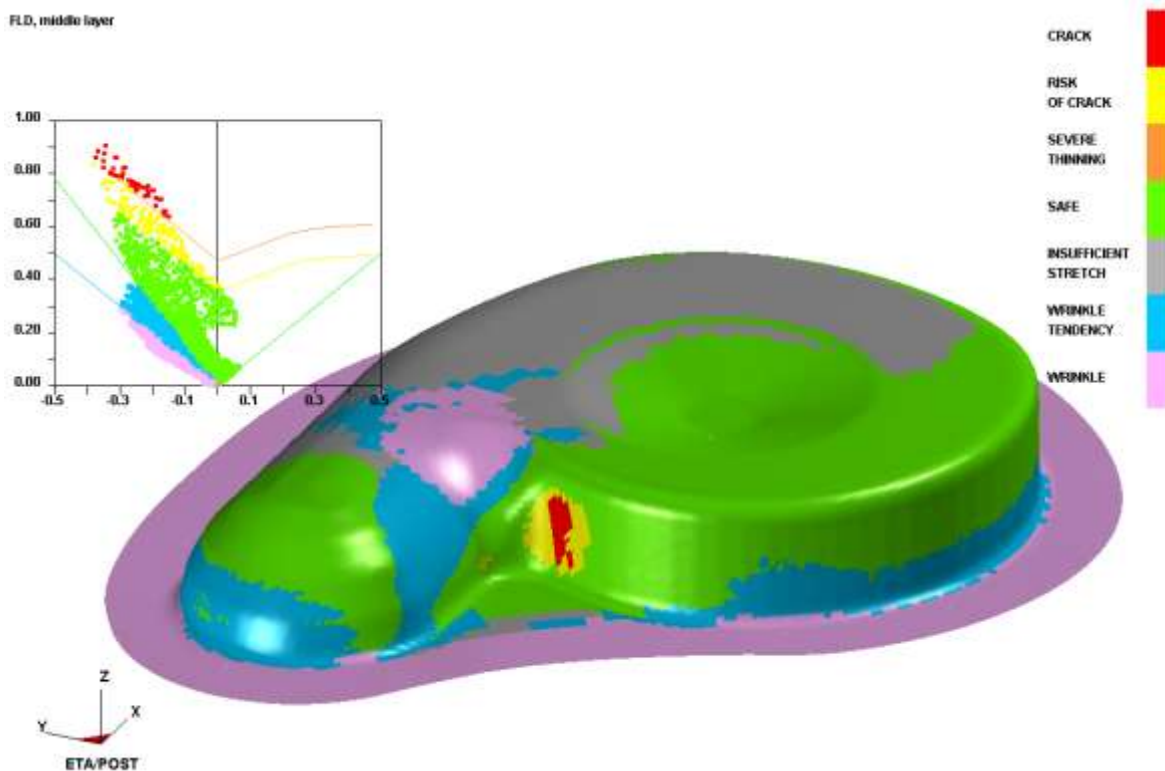
Z provedené analýzy je zřejmé, že nově upravený přístřih není pro levý kryt ventilátoru ideální volbou, oblast praskliny v kritickém místě je poměrně velká. Došlo ale ke zmírnění zvlnění na dně výtažku a celkově se více těla výtažku nachází v bezpečné zóně (SAFE) dle diagramu mezních deformací. Analýza tloušťky v místě praskliny ukazuje hodnotu 0,3958 mm, což je hodnota v porovnání s tažením výtažku z přístřihu stanoveného pomocí TMSN bez úpravy vybrání (obr. 6.18) menší o 31,32 %.

## **9.2 Změna tvaru přístřihu sestrojeného s využitím TMSN v místě vybrání zkonstruováním tečny k poloměrům v místě vybrání**

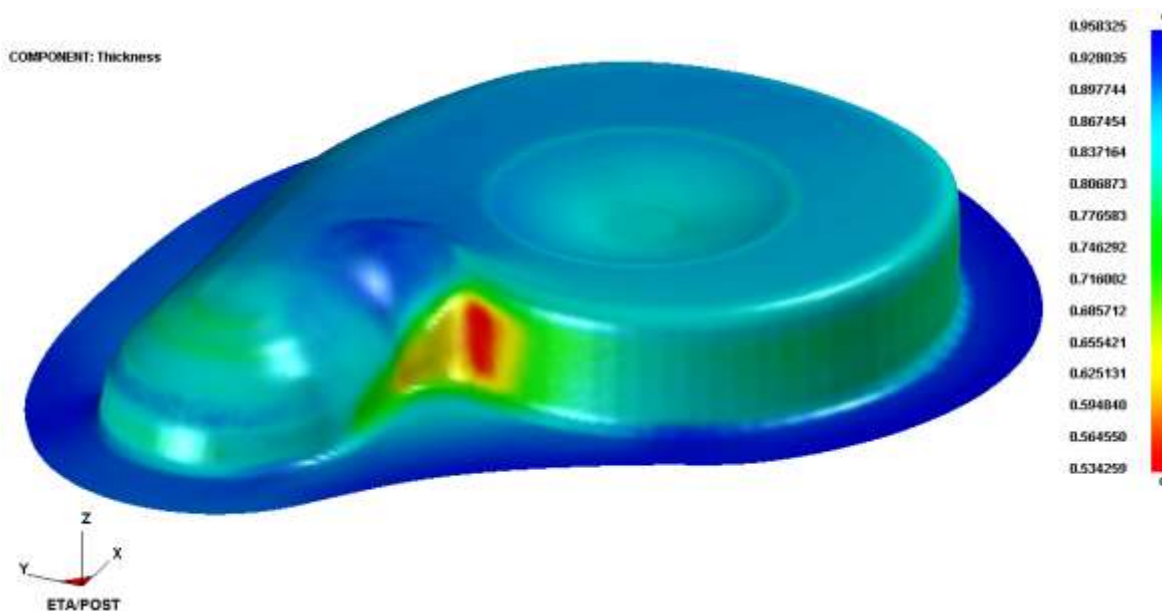
Konstrukce tečny je opakem vybrání v kritickém místě výtažku. Byla snaha zjistit, jak se materiál při tažení takto upraveného přístřihu zachová a jaký výsledek bude experiment mít. Přístřih s upraveným vybráním v podobě tečny k poloměrům v místě vybrání je na obr. 9.4, výkres přístřihu je v příloze A8.2.



Obr. 9.4 Přístřih s nově navrženým vybráním v podobě tečny k poloměrům v místě vybrání



Obr. 9.5 Rozbor napětí na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného s využitím TMSN s upraveným vybráním v podobě tečny z oceli DC04 a jeho znázornění v diagramu mezních deformací



Obr. 9.6 Analýza tloušťky plechu na výtažku taženém z přístříhu sestrojeného s využitím TMSN s upraveným vybráním v podobě tečny z oceli DC04

Přístřih s upraveným vybráním v podobě tečny může být variantou přístříhu pro výrobu levého krytu ventilátoru. Oblast praskliny v kritickém místě je sice větší,

než u výtažku taženého z přístříhu sestrojeného s využitím TMSN bez úpravy vybrání, ale analýza tloušťky ukazuje v kritickém místě hodnotu tloušťky 0,5343 mm, což je pouze o 3,87 % méně, než u výtažku z přístříhu bez úpravy vybrání (obr. 6.18). Došlo opět ke zmírnění zvlnění na dně výtažku a více těla výtažku se nachází v bezpečné zóně (SAFE) dle diagramu mezních deformací.

### **9.3 Zhodnocení provedených experimentů s upraveným tvarem přístříhu sestrojeného s využitím TMSN**

Výsledky počítačové simulace ukazují, že přístříh stanovený metodou využívající TMSN bez úprav v oblasti vybrání (kap. 6.6.4) zůstává přes provedené experimenty optimální variantou pro výtažek levého krytu ventilátoru.

Snahou výše popsaných experimentů bylo změnit kritické místo na výtažku, ať už odlehčením přístříhu (kap. 9.1) nebo naopak přidáním materiálu do místa vybrání (kap. 9.2). Změnou vybrání na přístříhu lze docílit změny napěťového a deformačního stavu, změny přemístování tvářeného materiálu, snížení rizika vzniku praskliny v kritickém místě, odstranění tvorby vln apod.

Z výsledků simulace tažení levého krytu ventilátoru z přístříhu stanoveného s využitím TMSN s upraveným vybráním si lze povšimnout, že v obou případech výpočtu došlo k určitému zmírnění tvorby vln na dně výtažku pod kritickým místem s poloměrem 12 mm. Nevýhodou je ale zvětšení oblasti praskliny v kritickém místě výtažku.

## 10 Nástřihový plán pro přístřih sestrojený metodou využívající TMSN

Způsob rozmístění výstřížků na pásu nebo tabuli plechu je označováno jako nástřihový plán. Při stříhání je velmi důležité rozmístit výstřížky na pásu tak, aby byl odpad, který je nedílnou součástí technologie stříhání, co nejmenší a využití materiálu bylo maximální. Jeho účelem je také zajistit snadnou manipulaci při vystřihování (krátký krok, vystřížení více součástí najednou apod.) a zajistit vhodný směr vláken materiálu. Samozřejmě musí být splněna předepsaná přesnost výstřížku.

Volba nástřihového plánu závisí na tvaru a konstrukci výrobku, na dodržování zásad konstrukce, na minimálních vzdálenostech mezi výrobky a od okraje pásu. Pro co nejlepší využití plechu je zjišťována hospodárnost nástřihového plánu, která je charakterizována součinitelem využití materiálu  $\eta$ :

$$\eta = \frac{S_v}{S_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad (10.1)$$

kde je  $S_v$  – je celková plocha rozmístěných výstřížků [ $\text{mm}^2$ ],

$S_p$  – je plocha polotovaru (pásu nebo tabule plechu) [ $\text{mm}^2$ ].

Plocha jednoho výstřížku  $S_{v1}$  byla stanovena pomocí softwaru CATIA V5 jako  $S_{v1} = 59296,92 \text{ mm}^2$ .

Základním výchozím polotovarem pro výrobu levého krytu ventilátoru je tenký plech dodávaný v tabulích o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000) \text{ mm}$  ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21. Postup výroby stávajícího přístřihu je takový, že tabule plechu se dělí na menší tabulky a ty pak slouží jako přístřih pro levý kryt ventilátoru. Dělení tabulí plechu probíhá ručně na ručních tabulových nůžkách NTE 2000/2,5-B nebo NTC 2000/4.

Tvar výstřížku optimálního přístřihu levého krytu ventilátoru (přístřih stanovený metodou využívající TMSN) je uzavřená tvarová křivka. Takto složitý výstřížek lze vyrobit buď za použití nástroje pro stříhání, tzv. stříhadla nebo dalších alternativních metod, např. vodním paprskem. Stříhadlo je nástroj, kde funkci horního pohyblivého nože vykonává střížník a funkci spodního pevného nože střížnice. Existují různé druhy stříhadel, rozdělují se do skupin podle počtu operací (jednoduché, vícenásobné, postupové, sloučené

atd.), podle charakteristiky základní práce (stříhací, ohýbací, tahací atd.) a podle počtu výrobků (jednonásobné, vícenásobné).

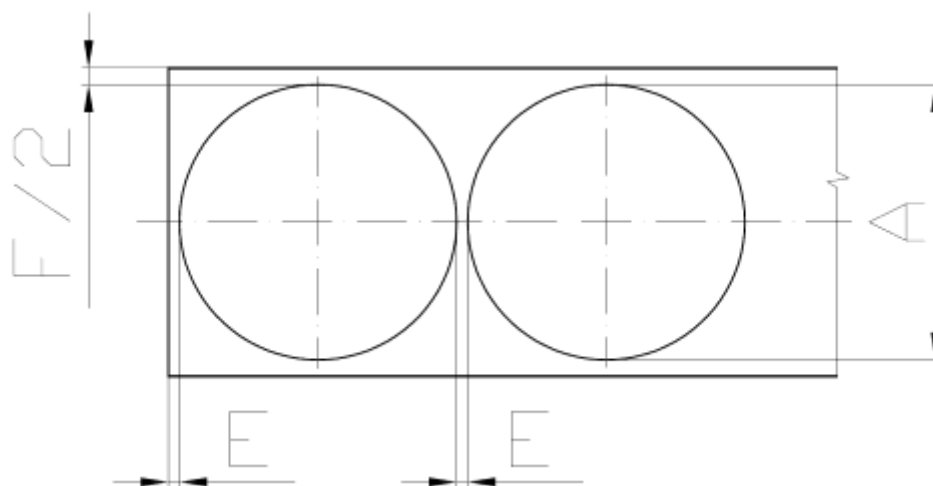
Pro vystřížení tvarově složitého přístříhu by bylo vhodné použít jednoduché stříhadlo, kde je konána jedna operace na jednom výstřížku na jeden zdvih. V tomto případě by bylo výhodné tabuli plechu rozstříhat tabulovými nůžkami na pásy a z těch poté vystříhovat jednotlivé výstřížky.

Varianta výroby výstřížku hydroabrazivním paprskem má řadu výhod a pro velmi složité tvary je ideální volbou dělení materiálu. Podstatou metody dělení materiálu je obrušování děleného materiálu čistou tlakovou vodou s příměsí abrazivních materiálů v předem stanoveném místě a tvaru výrobku. Metoda se s úspěchem používá v mnoha odvětvích průmyslu, a to v leteckém, kosmickém i automobilovém a mnoha dalších. Řez probíhá bez tepelného působení, materiál následně nevykazuje žádné změny, není nijak deformovaný. Touto metodou lze řezat jakýkoliv druh materiálu včetně kovů a slitin, kalených ocelí, skel, plastů, pryží apod. Po vyřezání vznikne plocha s vysokou kvalitou řezu a většinou není nutné žádné další opracování. Díly větších tloušťek se mohou klást těsně vedle sebe, lze dokonce využít i tzv. společný řez, čímž vznikají velké úspory materiálu. Je zde ale nevyhnutelný kontakt s vodou a s abrazivním materiálem, proto je nutné dílce okamžitě vhodně ošetřit k zamezení vzniku povrchové koroze.

## **10.1 Nástřihový plán pro možnost výroby vystřížením tvaru pomocí stříhadla**

Při navrhování nástřihového plánu pro možnost výroby vystřížením tvaru pomocí stříhadla je nutné určit velikost můstků a bočních odpadů. Obr. 10.1 schématicky znázorňuje, kde přesně se můstky a boční odpad na pásu plechu nacházejí. Můstky (přepážky)  $E$  jsou mezery mezi výstřížky, šířka můstku závisí na tloušťce plechu, tvaru výstřížku, na druhu materiálu, způsobu podávání atd. Mezera  $F$  určuje boční odpad a nachází se u okrajů pásu nebo tabule plechu (viz obr. 10.1).





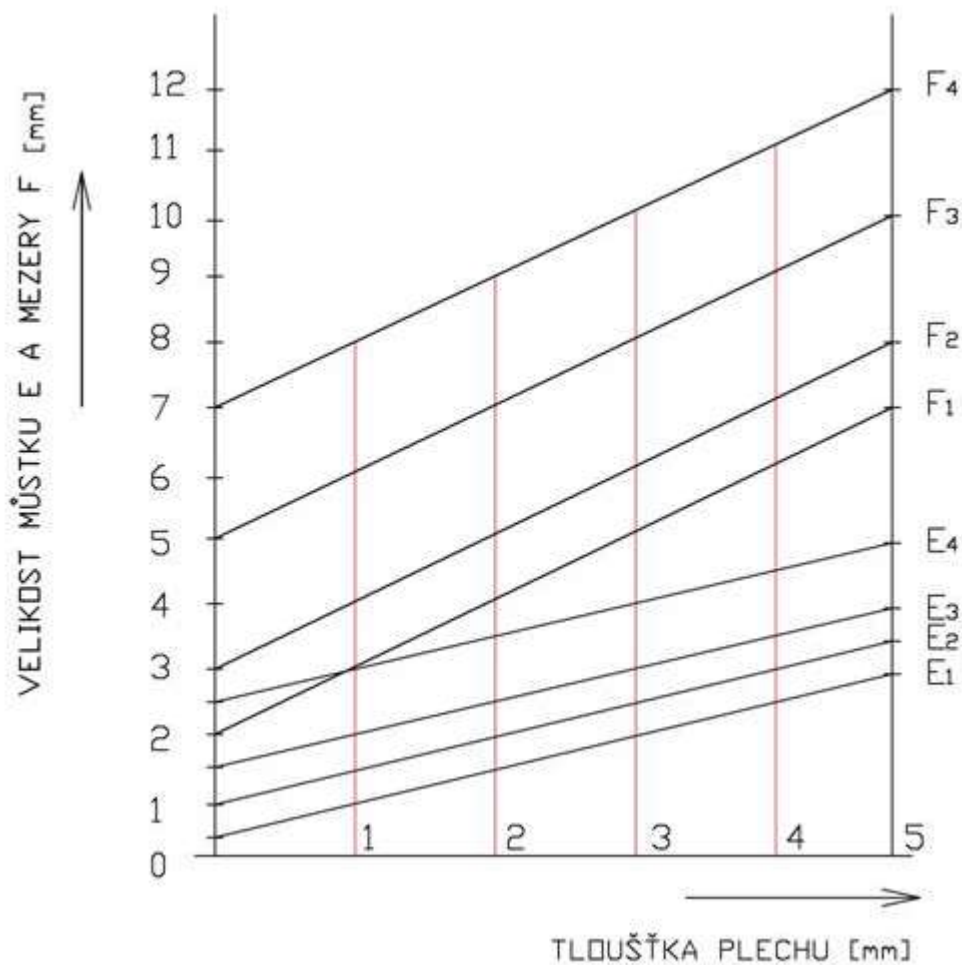
Obr. 10.1 Schématické znázornění můstek a bočních odpadů na nástřihovém plánu  
( $A$  – největší rozměr výstřížku,  $E$  – můstek,  $F$  – boční odpad)

K určení hodnot  $E$  a  $F$  bude použito nomogramu (obr. 10.2). Pro zjištění příslušných čar  $E_i$  a  $F_i$ , podle kterých lze v nomogramu určit konkrétní hodnoty můsteků a bočních odpadů, byla využita tab. 10.1.

Tab. 10.1 Přiřazení čar  $E_i$  a  $F_i$  dle největšího rozměru výstřížku

$A$ [mm]	Příslušné $E, F$ [-]
do 15	$E_1$ a $F_1$
15 ÷ 50	$E_2$ a $F_2$
50 ÷ 100	$E_3$ a $F_3$
> 100	$E_4$ a $F_4$

Jelikož má výstřížek (optimální přístřih pro výrobu levého krytu ventilátoru) největší rozměr 297,7 mm, zařazuje se dle tab. 10.1 do poslední skupiny a v nomogramu (obr. 10.2) se bude pracovat podle čar  $E_4$  a  $F_4$ .

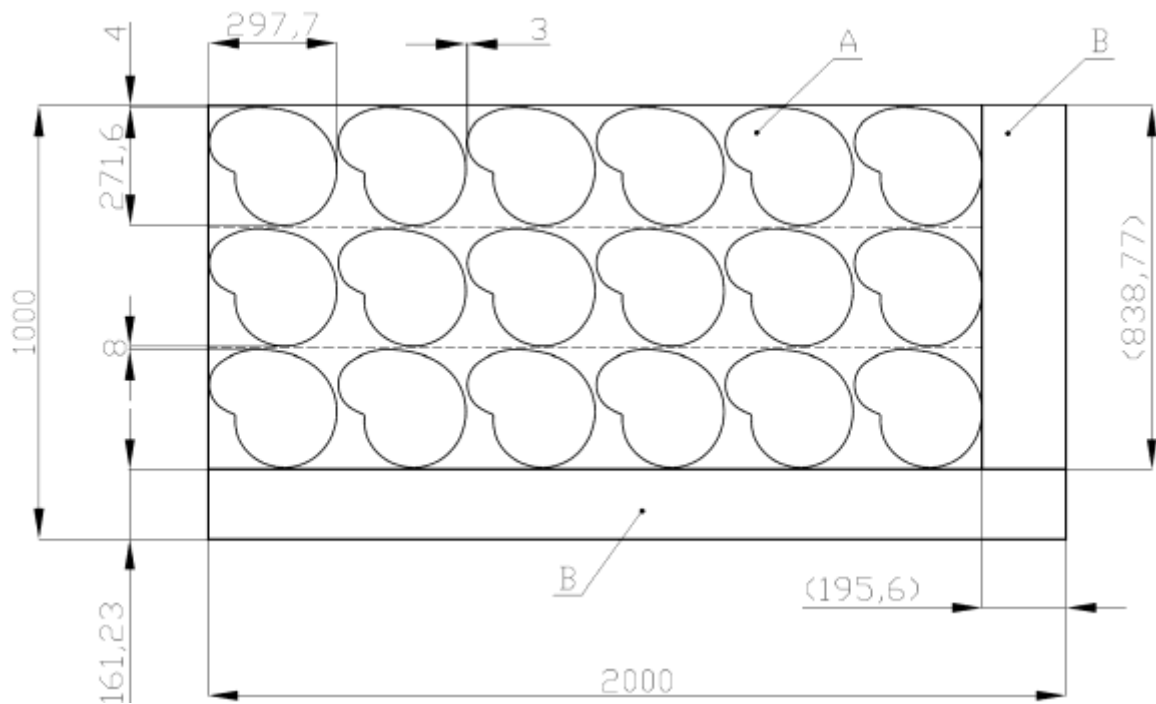


Obr. 10.2 Nomogram pro zjištění velikosti můstku  $E$  a mezery  $F$  [22]

Velikost můstku byla odečtena z nomogramu pro tloušťku plechu 0,9 mm jako  $E = 2,93$  mm, k návržení nástřihového plánu byla hodnota zaokrouhlena na  $E = 3$  mm. Velikost boční mezery (odpadu) byla odečtena z nomogramu pro tloušťku plechu 0,9 mm jako  $F = 7,86$  mm, k návržení nástřihového plánu byla hodnota zaokrouhlena na  $F = 8$  mm.

Pokud bude pro výrobu přístřihů použito jednoduché stříhadlo, tabule plechu se nejprve bude muset nastříhat na tabulových nůžkách na pásy a z těchto pásů pak budou na stříhadle vystřihovány jednotlivé výstřižky.

Nástřihový plán I a II optimálního přístřihu (přístřih vytvořený metodou využívající TMSN) je na obr. 10.3 a obr. 10.4.



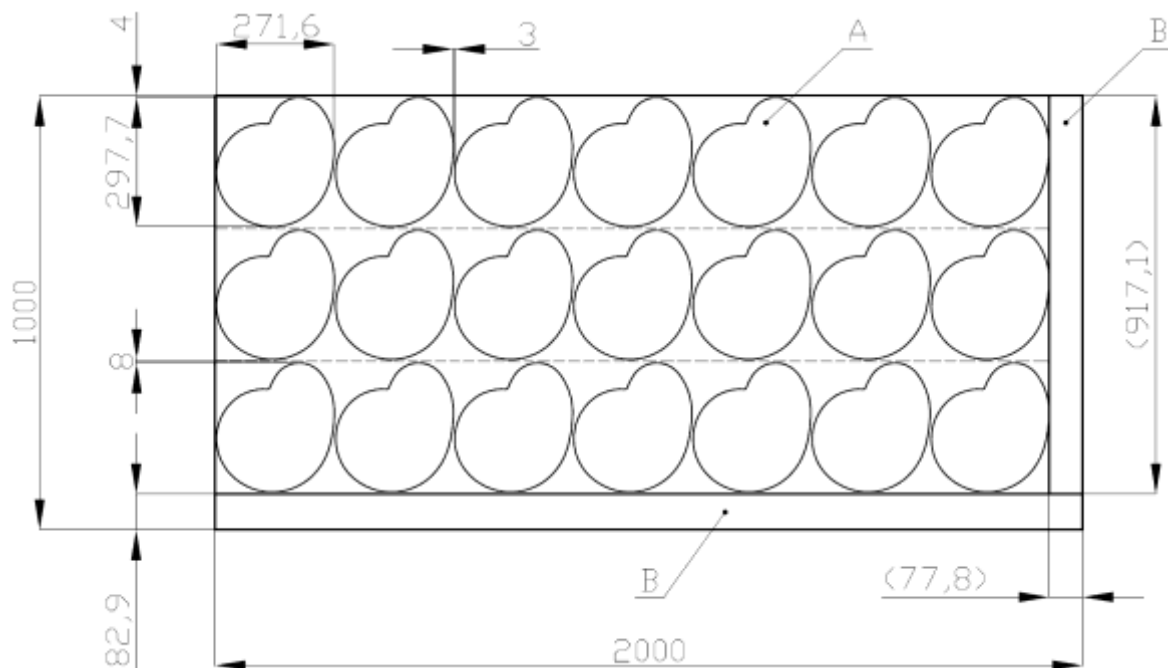
Obr. 10.3 Nástřihový plán I pro výrobu přístříhu na stříhadle  
(A – výstřížek, B – využitelný odpad)

Hospodárnost nástřihového plánu pro tabuli plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21 byla pro 18 přístříhů o velikosti vypočtena dosazením do rovnice (10.1):

$$\eta = \frac{18 \cdot 59296,92}{1000 \cdot 2000} \cdot 100 = 53,37 \%$$

Využitelný odpad  $O_v$  u varianty nástřihového plánu I po vystřížení všech přístříhů byl vypočítán dle obr. 10.3:

$$O_v = 2000 \cdot 161,23 + 195,6 \cdot 838,77 = 486523,4 \text{ mm}^2$$



Obr. 10.4 Nástřihový plán II pro výrobu přístříhu na stříhadle  
(A – výstřížek, B – využitelný odpad)

Hospodárnost nástřihového plánu pro tabuli plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21 byla pro 21 přístříhů o velikosti vypočtena dosazením do rovnice (10.1):

$$\eta = \frac{21 \cdot 59296,92}{1000 \cdot 2000} \cdot 100 = 62,26 \%$$

Využitelný odpad  $O_v$  u varianty nástřihového plánu I po vystřížení všech přístříhů byl vypočítán dle obr. 10.4:

$$O_v = 2000 \cdot 82,9 + 77,8 \cdot 917,1 = 237150,4 \text{ mm}^2$$

Je možné přepážky a boční odpad vynechat, pak se jedná o tzn. otevřený stříh, kde obvod součásti je vytvořen více stříhy. Dobrý výsledek zde závisí na přesnosti stříhadla a podávání, vzniknou určité úspory materiálu.

## 10.2 Nástřihový plán pro možnost výroby výstřižku hydroabrazivním paprskem

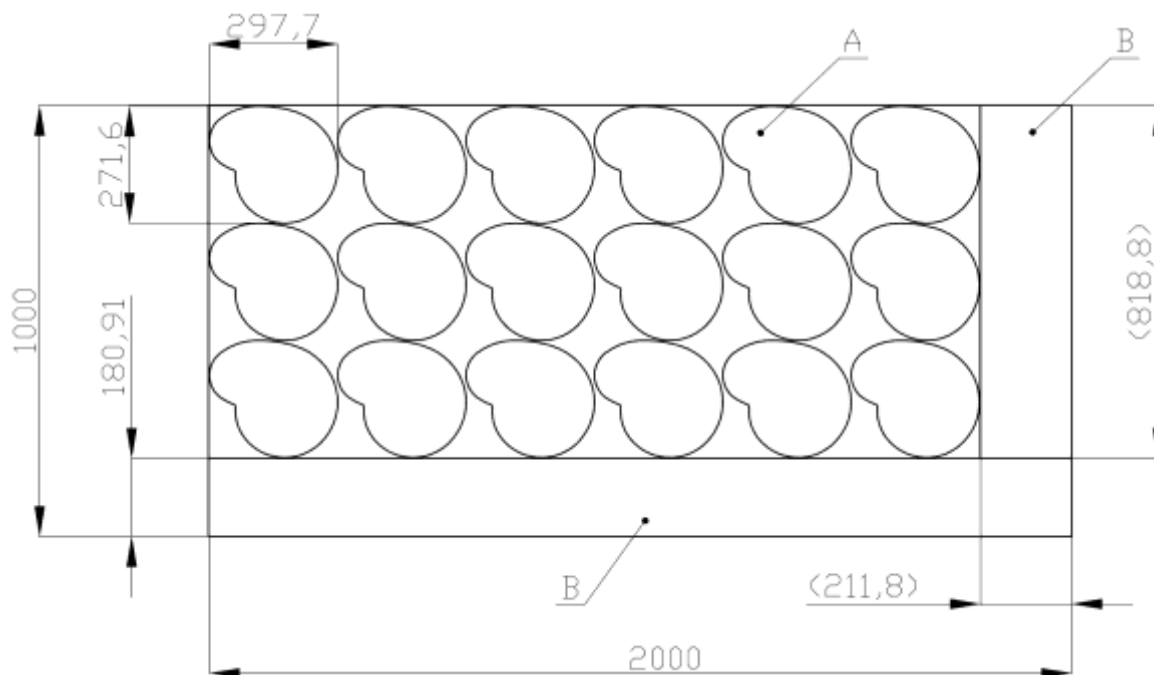
Při navrhování nástřihového plánu pro možnost výroby výstřižku hydroabrazivním paprskem je důležité navrhnout mezery mezi jednotlivými dílci v souladu s možnostmi této technologie dělení materiálu.

Základem řezacího systému jsou vysokotlaká čerpadla, která prostřednictvím multiplikátorů generují tlak vody cca  $(80 \div 380)$  MPa s objemovým výkonem  $(1,2 \div 7,6)$  l/min při výkonu  $(9 \div 75)$  kW. Vysokotlakým vedením je voda dopravována k řezací hlavě, kde je systémem trysek vytvořen vlastní „řezací nástroj“ [23].

Pro řezání a dělení tvrdších materiálů je používán asi  $(0,9 \div 1,5)$  mm široký hydroabrazivní paprsek s příměsí brusného prášku (nejčastěji granátového „písku“; typ abraziva je volen dle tvrdosti řezaného materiálu). Tento hydroabrazivní paprsek je pak díky své vysoké energii schopný řezat kovy, kámen, sklo a jiné materiály [23].

Metodou je možné řezat materiál tloušťky od 0,1 mm až po 150 mm na celkové ploše  $(3000 \times 2000)$  mm. Standardní přesnost výřezu je  $\pm 0,1$  mm/m. Šířka řezné spáry je přibližně 1,2 mm [23].

Varianty nástřihového plánu I a II pro optimální přístřih (přístřih vytvořený metodou využívající TMSN) jsou na obr. 10.5 a obr. 10.6. Vyřezávané dílce (přístřihy pro levý kryt ventilátoru) jsou na tabuli plechu uloženy těsně vedle sebe, mezery mezi výtažky akceptují šířku hydroabrazivního paprsku.



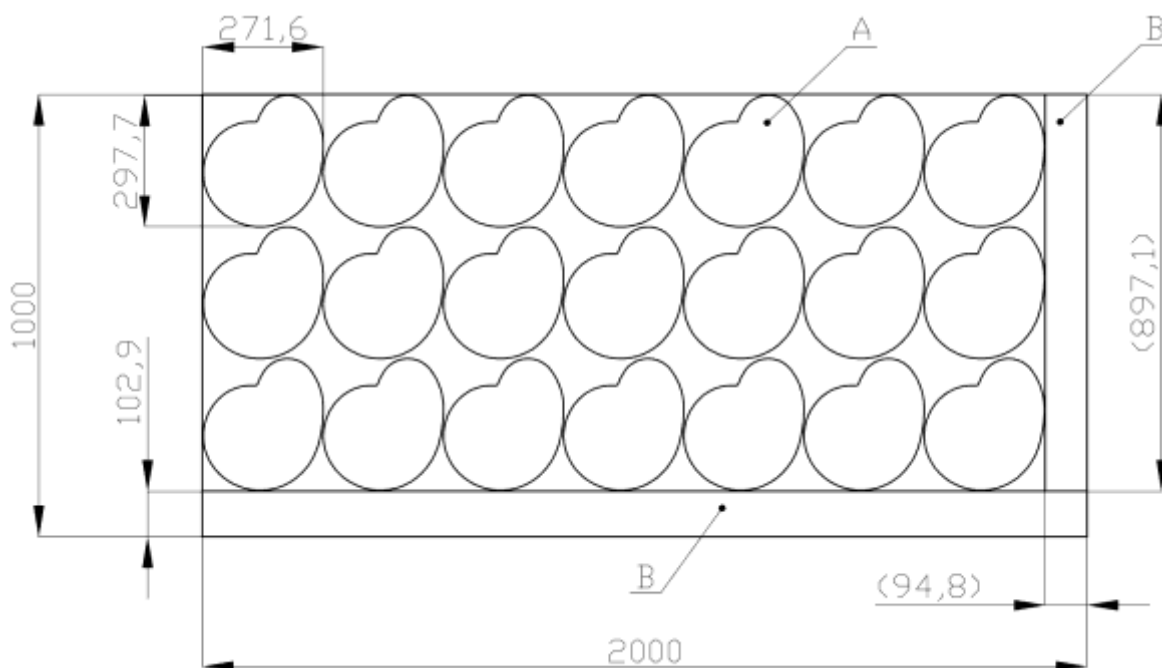
Obr. 10.5 Nástřihový plán I pro výrobu přístřihu hydroabrazivním paprskem  
(A – výstřižek, B – využitelný odpad)

Hospodárnost nástřihového plánu I pro tabuli plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21 byla pro 18 přístřihů o velikosti jednoho přístřihu  $S_{v1} = 59296,92 \text{ mm}^2$  vypočtena dosazením do rovnice (10.1):

$$\eta = \frac{18 \cdot 59296,92}{1000 \cdot 2000} \cdot 100 = 53,37 \%$$

Využitelný odpad  $O_v$  u varianty nástřihového plánu I po vystřižení všech přístřihů byl vypočítán dle obr. 10.5:

$$O_v = 2000 \cdot 180,91 + 211,8 \cdot 818,8 = 535241,8 \text{ mm}^2$$



Obr. 10.6 Nástřihový plán II pro výrobu přístříhu hydroabrazivním paprskem  
(A – výstřížek, B – využitelný odpad)

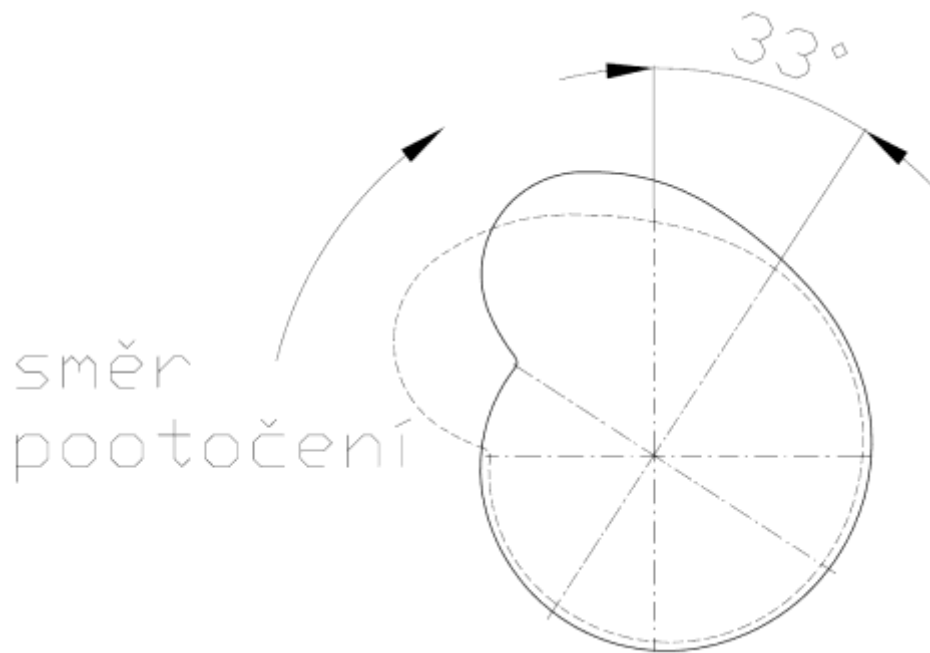
Hospodárnost nástřihového plánu II pro tabuli plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21 byla pro 21 přístříhů o velikosti jednoho přístříhu  $S_{v1} = 59296,92 \text{ mm}^2$  vypočtena dosazením do rovnice (10.1):

$$\eta = \frac{21 \cdot 59296,92}{1000 \cdot 2000} \cdot 100 = 62,26 \%$$

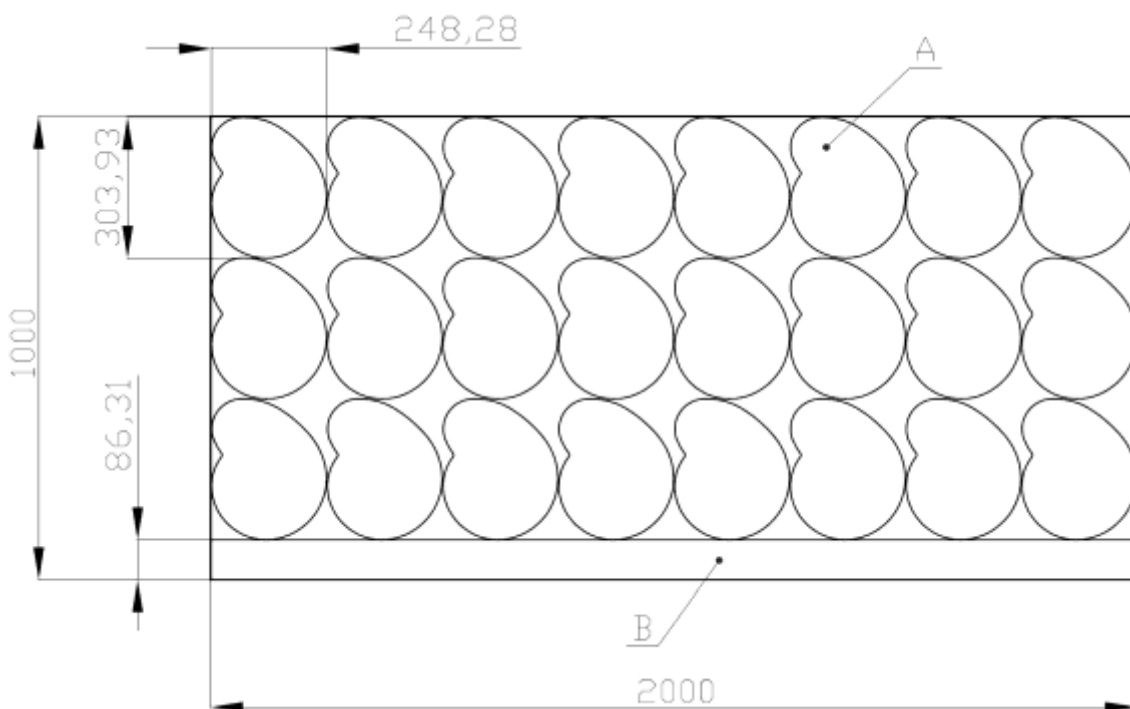
Využitelný odpad  $O_v$  u varianty nástřihového plánu II po vystřížení všech přístříhů byl vypočítán dle obr. 10.6:

$$O_v = 2000 \cdot 102,9 + 94,8 \cdot 897,1 = 290845,1 \text{ mm}^2$$

Bylo zjištěno, že pootočením výstřížku o  $33^\circ$  po směru hodinových ručiček (viz obr. 10.7) lze na tabuli plechu těchto výstřížků umístit 24 kusů. Tím se samozřejmě zvýší hospodárnost nástřihového plánu. Takto upravený nástřihový plán III je na obr. 10.8.



Obr. 10.7 Směr pootočení výstřížku (čárkovaná tenká čára – původní poloha, plná silná čára – nová poloha po otočení)



Obr. 10.8 Nástřihový plán III pro výrobu přístříhu hydroabrazivním paprskem  
(A – výstřížek, B – využitelný odpad)

Hospodárnost nástřihového plánu III pro tabuli plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 z oceli 11 305.21 byla pro 24 přístříhů o velikosti jednoho přístříhu  $S_{v1} = 59296,92 \text{ mm}^2$  vypočtena dosazením do rovnice (10.1):



$$\eta = \frac{24 \cdot 59296,92}{1000 \cdot 2000} \cdot 100 = 71,16 \%$$

Využitelný odpad  $O_v$  u varianty nástřihového plánu III po vystřížení všech přístřihů byl vypočítán dle obr. 10.8:

$$O_v = 2000 \cdot 86,31 = 172620 \text{ mm}^2$$

### 10.3 Zhodnocení možností výroby přístřihu

Stříhadlem lze dosáhnout kvalitního tvaru přístřihu. Tato metoda se ovšem vyplatí až při velkosériové výrobě. Při výrobě výstřížku na stříhadle je také nutné počítat s přepážkami  $E$  mezi výstřížky a bočním odpadem  $F$  na krajích tabule plechu. Tyto hodnoty jsou ovšem velmi nízké a nějak výrazně se neodrazí v konečném využití tabule plechu. Je také možné je vynechat, pak by se jednalo o tzv. otevřený stříh.

Technologie dělení materiálu hydroabrazivním paprskem nabízí efektivní přesné tvarové dělení materiálu s velmi kvalitním čistým řezem bez mikrotrhlin, deformací a tepelného ovlivnění materiálu. Cenu za zakázku si stanoví firma zabývající se hydroabrazivním dělením materiálu, většinou je cena ke každé zakázce kalkulována individuálně i ve variantách např. pro různé kvality řezu, pro různé série, dle typu a tloušťky materiálu, složitosti řezu atd.

Varianta nástřihového plánu I udává součinitel využití materiálu stejný u obou technologií výroby výstřížku, a to  $\eta = 53,37 \%$ . Rozdíl je ve velikosti využitelného odpadu, kde v případě možnosti výroby výstřížku na stříhadle je  $O_v = 486523,4 \text{ mm}^2$  a při výrobě přístřihu hydroabrazivním paprskem je  $O_v = 535241,8$ . Plocha využitelného odpadu je tedy v případě výroby přístřihu hydroabrazivním paprskem větší o 9,1 %.

Je zřejmé, že varianta nástřihového plánu II je lepší u obou technologií výroby přístřihu. U varianty nástřihového plánu II pro výrobu výstřížku na stříhadle je součinitel využití materiálu  $\eta = 62,26 \%$  a plocha využitelného odpadu je  $O_v = 237150,4 \text{ mm}^2$ . Při výrobě výstřížku hydroabrazivním paprskem je u varianty nástřihového plánu II součinitel využití materiálu také  $\eta = 62,26 \%$ , plocha využitelného odpadu je  $O_v = 290845,1 \text{ mm}^2$ .

Varianta nástřihového plánu III s otočením výstřížku o  $33^\circ$  (viz obr. 10.7, obr. 10.8) je nejehospodárnější variantou nástřihového plánu pro levý kryt ventilátoru. Touto metodou lze z jedné tabule plechu vyřezat 24 přístřihů a využití materiálu se tím zvyšuje na  $\eta = 71,16\%$ . Je ovšem nutné zvážit orientaci přístřihu na tabuli plechu. Jde o maximální využití možnosti plechu jak z hlediska mechanických vlastností, tak z hlediska anizotropie. Vhodným umístěním přístřihu na tabuli plechu lze zabránit vzniku zmetků ve výrobě. Protože jsou mezi výstřížky můstky, varianta nástřihového plánu III nelze pro výrobu výstřížku na stříhadle použít. Maximální počet možných vystřížených přístřihů u možnosti výroby výstřížku na stříhadle je tedy 21 přístřihů.

## **11 Ekonomické zhodnocení a racionalizace stávající technologie výroby výtažku levého krytu ventilátoru**

Pro racionalizaci stávající technologie výroby výtažku levého krytu ventilátoru nebo zavedení nové technologie je nutné zaměřit se na finanční možnosti podniku, znát strojní a nástrojové vybavení podniku. Každému návrhu nové technologie výroby musí předcházet podrobná ekonomická kalkulace, aby nedocházelo k finančním ztrátám. Tato kapitola se zabývá jednoduchým ekonomickým zhodnocením stávající technologie výroby výtažku, podrobný ekonomický rozbor není předmětem diplomové práce. Kapitola je zaměřena na racionalizaci stávající technologie výroby výtažku, ale i možného zavedení optimálního přístřihu do výroby levého krytu ventilátoru.

Bylo zjištěno, a to jak z praxe stávající výroby výtažku, tak i z počítačové simulace procesu tažení, že stávající přístřih je zcela nevhodný pro výrobu výtažku levého krytu ventilátoru. Po ekonomické stránce je zbytečně velký, z jedné tabule plechu lze vystříhat 18 tabulek, které po odstřížení vybrání poté slouží jako přístřih pro výtažek. Využitelný odpad (použitelný pro jiný libovolný výtažek, ne pro levý kryt ventilátoru) z nástřihového plánu na obr. 1.2 je  $486200 \text{ mm}^2$ . Využitelný odpad z nástřihového plánu optimálního přístřihu I, který je na obr. 10.3 pro možnost výroby výstřižku na stříhadle je  $486523,4 \text{ mm}^2$  a na obr. 10.6 pro možnost výroby výstřižku hydroabrazivním paprskem je  $535241,8 \text{ mm}^2$ . V obou případech je tento odpad větší než v případě použití stávajícího přístřihu.

Optimálním přístřihem pro výtažek levého krytu ventilátoru je přístřih sestrojený metodou využívající TMSN. Vtahování probíhá rovnoměrně, po vytažení zůstává dostatek materiálu na přírubu a také dochází k nepřehlédnutelnému zlepšení jakosti výtažku (viz kap. 6.6). Před zavedením optimálního přístřihu do výroby je však nutné zvážit možnosti podniku. Musí se přihlídnout k potřebě nového způsobu výroby přístřihu (více rozebráno v kapitole 10). Způsob výroby na novém střížném stroji je úsporný z časového hlediska, je ovšem nutné počítat s většími pořizovacími náklady. V případě hydroabrazivního paprsku je nutné akceptovat cenu, kterou si stanoví firma provádějící hydroabrazivní dělení materiálu za vykonání zakázky. Do jaké míry jsou tyto náklady vratné, závisí na mnoha aspektech, např. na způsobu výroby (sériová vs. kusová), na počtu vyrobených kusů. Střížný nástroj je použitelný jen pro výrobu omezeného druhu výrobků,

proto by vhodnou variantou pro podnik bylo pořízení univerzálního stroje. Pořizovací náklady jsou sice vyšší než u jednoúčelového střížného nástroje, ale je možnost jej využít pro výrobu více druhů výrobků.

Podle nástřihových plánů (kap. 10) lze stanovit roční spotřebu tabulí plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 z oceli DC04, a to dle vztahu:

$$p = \frac{Q}{n} \quad [\text{ks}] \quad (10.1)$$

kde je  $p$  – počet tabulí plechu z oceli DC04 o výše uvedených rozměrech potřebných na roční výrobu výtažku [ks],

$Q$  – počet výtažků levého krytu ventilátoru vyrobených za rok [ks],

$n$  – počet přístřihů nastříhaných z jedné tabule plechu o výše uvedených rozměrech [ks].

Výpočet spotřeby tabulí plechu pro roční výrobu výtažku levého krytu ventilátoru pro nástřihový plán stávajícího přístřihu (obr. 1.2) a pro nástřihové plány optimálního přístřihu I (obr. 10.3, obr. 10.5), II (obr.10.4, obr. 10.6), III (obr. 10.8):

$$p_s = \frac{2\,500}{18} = 138,89 \text{ ks} \Rightarrow 139 \text{ ks}$$

$$p_{\text{OI}} = \frac{2\,500}{18} = 138,89 \text{ ks} \Rightarrow 139 \text{ ks}$$

$$p_{\text{OII}} = \frac{2\,500}{21} = 119,05 \text{ ks} \Rightarrow 120 \text{ ks}$$

$$p_{\text{OIII}} = \frac{2\,500}{24} = 104,17 \text{ ks} \Rightarrow 105 \text{ ks}$$

Výrobu výtažku levého krytu provází určité procento zmetkovitosti, které je vhodné zahrnout do výpočtu. Při uvážení stávající zmetkovitosti při tažení výtažku ze stávajícího přístřihu 10 % a předpokládané zmetkovitosti při tažení výtažku z optimálního přístřihu 2 % se pak roční spotřeba počtu tabulí plechu z oceli DC04 vypočítá dle vztahu:

$$p_{\text{St}} = \frac{Q \cdot \left(1 + \frac{z_s}{100}\right)}{n_{\text{St}}} \quad [\text{ks}] \quad (10.2)$$

$$p_{Pr} = \frac{Q \cdot \left(1 + \frac{z_p}{100}\right)}{n_{Opt}} \quad [\text{ks}] \quad (10.3)$$

kde je  $p_{St}$  – stávající roční spotřeba počtu tabulí plechu z oceli DC04 o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 potřebná k výrobě 2500 ks výtažků ze stávajícího přístříhu [ks],

$p_{Pr}$  – předpokládaná roční spotřeba počtu tabulí plechu z oceli DC04 o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm ČSN 42 6312.32 potřebná k výrobě 2500 ks výtažků z optimálního přístříhu [ks],

$Q$  – počet výtažků levého krytu ventilátoru vyrobených za rok [ks],

$z_s$  – stávající zmetkovitost při výrobě levého krytu ventilátoru (10 %),

$z_p$  – předpokládaná zmetkovitost při výrobě levého krytu ventilátoru při použití optimálního přístříhu (2 %),

$n_{St}$  – počet stávajících přístříhů nastříhaných z jedné tabule plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm [ks],

$n_{Opt}$  – počet ks optimálních přístříhů nastříhaných z jedné tabule plechu o rozměrech  $(0,9 \times 1000 - 2000)$  mm [ks].

Výpočet spotřeby tabulí plechu pro roční výrobu levého krytu ventilátoru s uvážením zmetkovitosti pro nástřihový plán stávajícího přístříhu (obr. 1.2) a pro nástřihové plány optimálního přístříhu I (obr. 10.3, obr. 10.5), II (obr. 10.4, obr. 10.6), III (obr. 10.8):

$$p_s = \frac{2500 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right)}{18} = 152,78 \text{ ks} \Rightarrow 152 \text{ ks}$$

$$p_{OI} = \frac{2500 \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right)}{18} = 141,67 \text{ ks} \Rightarrow 142 \text{ ks}$$

$$p_{OII} = \frac{2500 \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right)}{21} = 121,43 \text{ ks} \Rightarrow 122 \text{ ks}$$

$$p_{OIII} = \frac{2500 \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right)}{24} = 106,25 \text{ ks} \Rightarrow 107 \text{ ks}$$

Z výpočtů skutečné a předpokládané spotřeby tabulí plechu spočítané pro výrobu 2500 ks výtažku levého krytu ventilátoru vyplývá, že už při použití optimálního přístřihu se díky snížení zmetkovitosti ušetří 10 ks tabulí plechu ročně oproti použití stávajícího přístřihu. Pokud se použije nástřihový plán II pro optimální přístřih (obr. 10.4, obr. 10.6), je možné ušetřit dalších 20 ks tabulí plechu ročně. Při použití nástřihového plánu III pro optimální přístřih (obr. 10.8) se ročně použije 107 ks tabulí, což v porovnání s použitím nástřihového plánu pro stávající přístřih (obr. 1.2) činí rozdíl 45 ks tabulí ročně.

Hlavním ekonomickým přínosem při použití optimálního přístřihu k výrobě levého krytu ventilátoru je tedy prvotřídní jakost výtažku, kdy díky optimálním napěťovým a kinematickým poměrům při tažení dochází k zamezení vzniku vad v podobě prasklin, vrás a zvlnění. Tyto vady jsou při tažení výtažku levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu nejčastější. Potlačení zmetkovitosti a menší rozměry optimálního přístřihu povedou k poměrně velké úspoře materiálu. Dalším přínosem je ušetření 45 ks tabulí ročně při použití nástřihového plánu III pro optimální přístřih.

## 12 Závěr

Z výsledků diplomové práce „*Optimalizace napětových a kinematických poměrů při tažení výtažku nepravidelného tvaru z tenkého plechu s využitím MKP*“ vyplývají tyto závěry:

- a) Vhodnost plechu z oceli DC04 k hlubokému tažení byla hodnocena zkouškami základními a napodobujícími. Ze zkoušek základních byla použita zkouška chemického složení plechu (viz 2.1.1). Výsledky rozboru prokazují, že plech vyhovuje ČSN 41 1305, která uvádí jeho směrné chemické složení (viz tab. 2.2, tab. 2.3). Dále byla stanovena jakost a stav povrchu plechu (viz 2.1.2), kde zkoušený plech musí vyhovovat ČSN 42 6312.32. Bylo zjištěno, že jakost i stav povrchu plechu z materiálu DC04 (11 305.21) vyhovují dané normě. Poslední základní zkouškou byla zkouška jednoosým tahem (viz 2.1.3), kde byly kontrolovány mechanické vlastnosti plechu, tedy smluvní mez kluzu, pevnost v tahu a tažnost. Bylo prokázáno, že zjištěné hodnoty meze kluzu a pevnosti v tahu (viz tab. 2.5) odpovídají směrným hodnotám (viz tab. 2.4). ČSN 41 1305 pro ocel 11 305.21 (DC04) požaduje hodnotu tažnosti ve směru 90° vůči směru válcování plechu minimálně 36 %. Tomuto požadavku zkoušený plech nevyhověl, hodnota tažnosti  $A_{80(90)}$  je rovna 29,4 % (viz tab. 2.5). Ke zjištění střední hodnoty prohloubení  $\overline{IE}$  byla provedena napodobující zkouška dle Erichsena (viz 2.2.1). Zjištěné hodnoty prohloubení jsou u všech zkoušených vzorků příznivější, než požaduje ČSN 41 1305 (viz tab. 2.6, tab. 2.7). K vyhodnocení tvářitelnosti plechu byl plech posouzen i podle nekonvenčních kritérií tvářitelnosti plechu. Byly vypočítány hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechu (viz 2.3.1, tab. 2.8) a maximální součinitelé plošné anizotropie plechu (viz tab. 2.9). Vliv plošné anizotropie lze považovat za záporný, protože při hlubokém tažení způsobuje vznik cípů a také zvětšuje rozměrové odchylky výtažků vzhledem k požadovanému tvaru. Největší hodnotu plošné anizotropie vykazuje tažnost  $A_{80}$  jak u hodnot v různých směrech vůči směru válcování, tak i u maximálních součinitelů plošné anizotropie (viz tab. 2.9). Plastická anizotropie (viz 2.3.2) byla posouzena součinitelem plastické anizotropie  $r_x$ , který byl vypočítán ve všech směrech vůči válcování plechu 0°, 45°, 90°. Dále byl určen vážený průměr součinitele

plastické anizotropie  $\bar{r}$ , který má pro plech z oceli 11 305.21 hodnotu 1,76. Dle Shawkiho třídění tedy spadá do skupiny vynikající tvářitelnosti (viz tab. 2.10). Exponent deformačního zpevnění (viz 2.3.3) byl určen ve všech směrech vůči válcování plechu  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m = 0,213$  (viz tab. 2.11). Tato hodnota patří do skupiny nízké tvářitelnosti. Byl stanoven index tvářitelnosti, který lze použít jako kritérium pro tvářitelnost plechu. Pro ocel DC04 byl index tvářitelnosti vypočítán  $I = 298,2$  a plech z této oceli byl zařazen dle Lileta do skupiny II – ocelové plechy vhodné pro tažné operace, u kterých je dominující tlak.

- b) Pro výtažek levého krytu ventilátoru byly zkonstruovány tyto přístřihy (kap. 3): přístřih dle ČSN 22 7303 (viz příloha A2.4), přístřih sestrojený metodou řezů (viz příloha A2.6), přístřih sestrojený metodou využívající TMSN (viz příloha A2.8) a přístřih využívající k sestrojení BSE modul v programu Dynaform 5.2 (viz příloha A2.9). Bylo zjištěno, že přístřih stanovený dle ČSN má plochu o 16,2 % menší než stávající přístřih. Přístřih sestrojený metodou řezů je ze všech přístřihů nejmenší, jeho plocha je o 30,5 % menší než u stávajícího přístřihu. Přístřih sestrojený metodou využívající TMSN a přístřih využívající k sestrojení BSE modul se od sebe liší velikostí plochy pouze o 2 % a z hlediska úspory materiálu jsou tedy téměř totožné (viz obr. 3.3).
- c) Pro výtažek levého krytu ventilátoru byly navrženy dvě alternativy materiálu, a to pásová ocel St 4 dle DIN 1624 a pásová ocel IF-Stahl. Vhodnost obou plechů k hlubokému tažení byla hodnocena zkouškami základními a napodobujícími. Byla provedena základní zkouška jednoosým tahem (viz 4.3.1), kde byly kontrolovány mechanické vlastnosti plechů. Bylo prokázáno, že zjištěné hodnoty mechanických vlastností oceli St 4 (tab. 4.7) spadají do oblastí směrných hodnot (tab. 4.2) a od mechanických hodnot udávaných v atestu (tab. 4.4) se mírně liší v hodnotě meze pevnosti  $R_m$ , která je u oceli vyšší, než udává atest a v hodnotě tažnosti  $A_{80}$ , která je v atestu vyšší, než bylo zjištěno zkouškou. Zjištěné hodnoty mechanických vlastností oceli IF-Stahl (tab. 4.8) se rovněž od hodnot z atestu liší (tab. 4.6), a to v hodnotě meze kluzu  $R_{p0,2}$ , která je nižší, než udává atest a v hodnotě tažnosti  $A_{80}$ , která je vyšší, než hodnota udaná atestem.



K vyhodnocení tvářitelnosti plechů byly plechy posouzeny i podle nekonvenčních kritérií tvářitelnosti plechu. Byly vypočítány hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechů (viz 4.3.2, tab. 4.9) a maximální součinitelé plošné anizotropie plechů (viz tab. 4.10). Největší hodnotu plošné anizotropie vykazuje u oceli St 4 tažnost  $A_{80}$  jak u hodnot v různých směrech vůči směru válcování, tak i u maximálních součinitelů plošné anizotropie (viz tab. 4.10) a u oceli IF-Stahl poměr meze kluzu a meze pevnosti  $R_m/R_{p0,2}$  (viz tab. 4.10). Plastická anizotropie (viz 4.3.3) byla posouzena váženým průměrem součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$ , který má pro plech z oceli St 4 hodnotu 1,54 a pro plech z oceli IF-Stahl hodnotu 2,39. Dle Shawkiho třídění tedy ocel St 4 spadá do skupiny dobré tvářitelnosti a ocel IF-Stahl do skupiny vynikající tvářitelnosti (viz tab. 5.6). Exponent deformačního zpevnění (viz 4.3.4) byl určen ve všech směrech vůči válcování plechu  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění pro ocel St 4  $n_m = 0,158$  a pro ocel IF-Stahl  $n_m = 0,172$  (viz tab. 4.12). Tyto hodnoty patří do skupiny nízké tvářitelnosti. Byl stanoven index tvářitelnosti, který lze použít jako kritérium pro tvářitelnost plechu. Pro ocel St 4 byl index tvářitelnosti vypočítán  $I = 208,56$  a pro ocel IF-Stahl  $I = 323,36$  (tab. 4.13). Plechy z obou ocelí byly zařazeny dle Lileta do skupiny II – ocelové plechy vhodné pro tažné operace, u kterých je dominující tlak.

- d) Všechny zkoumané oceli (DC04, St 4 a IF-Stahl) byly porovnány v kap. 5 a byla určena nejvhodnější ocel pro výtažek levého krytu ventilátoru. Ze všech posuzovaných hledisek je pro tažení levého krytu ventilátoru nejvhodnější ocel IF-Stahl.
- e) Z provedené simulace procesu tažení levého krytu ventilátoru z jednotlivých přístřihů v programu Dynaform 5.2 bylo zjištěno, že:
- stávající přístřih z oceli DC04 je pro levý kryt ventilátoru zcela nevhodný. Při tažení dochází k tvorbě velké praskliny v kritickém místě výtažku v porovnání s ostatními výtažky (viz 6.6.1), protože nevhodně navržené vybrání přístřihu brání vtahování materiálu do místa výtažku s poloměrem 12 mm.

- u výtažku z přístřihu stanoveného dle ČSN 22 7303 je po provedeném výpočtu zřejmé, že takto zkonstruovaný přístřih (viz 6.6.2) je pro výtažek levého krytu ventilátoru vhodnější, než stávající přístřih. Oblast praskliny v kritickém místě je mnohem menší, než u stávajícího přístřihu.
  - tvar výtažku zhotoveného z přístřihu stanoveného metodou řezů (viz 6.6.3) neodpovídá optimálnímu konečnému tvaru výtažku. Při tažení se nedostává materiálu v rovinné části výtažku, materiál se zde nadměrně vtahuje tak, že po procesu tažení se nedostává materiálu na přírubu a jedná se o zmetkový kus. Přístřih je tedy pro levý kryt ventilátoru zcela nevhodný. Tento problém lze odstranit navrženou korekcí polohy přístřihu (viz 6.6.3.1), kde se přístřih posune v ose  $x$  o  $-5$  mm a v ose  $y$  o  $7$  mm v souladu se souřadným systémem na obr. 6.13. Po provedeném výpočtu tažení (viz 6.6.3.2) je zřejmé, že tento přístřih s korigovanou polohou lze použít, ale není ideálním řešením pro výtažek levého krytu ventilátoru.
  - tažení výtažku z přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN (viz 6.6.4) se jeví jako nejlepší varianta výroby levého krytu ventilátoru. U toho přístřihu by nemělo vznikat na obrysu přístřihu smykové napětí, protože trajektorie maximálních smykových napětí tento obrys protínají pod úhly  $\pm 45$ . Simulace výtažku z oceli DC04 prokázala, že přístřih sestrojený metodou využívající TMSN je nejvhodnějším přístřihem pro levý kryt ventilátoru.
  - přístřih sestrojený pomocí BSE modulu (viz 6.6.5) je možnou variantou pro výrobu levého krytu ventilátoru. Oblast praskliny je v porovnání s ostatními výtažky nejmenší, zato ale dochází k nadměrné tvorbě vln na dně výtažku.
  - oceli St 4 a IF-Stahl jsou vhodnou alternativou pro tažení výtažku levého krytu ventilátoru a simulace procesu tažení výtažku z těchto ocelí (viz kap. 6.8, kap. 6.10) udává obdobně uspokojivé výsledky jako při tažení z oceli DC04.
- f) Metodou charakteristik byly vyřešeny napět'ové a kinematické poměry ve výtažku (viz kap. 7.1). Při tažení výtažku ze stávajícího přístřihu vzniká na obrysu přístřihu smykové napětí  $\tau$ , které se po celém obvodu pohybuje v kladných i záporných hodnotách (viz příloha A3.1). Na obrysu přístřihu

sestrojeného metodou využívající TMSN se smyková napětí při tažení netvoří (příloha A3.2), protože TMSN protínají tento obrys pod úhly  $\pm 45^\circ$  a nedochází tedy k tangenciálnímu přemístění materiálu do stěn, což může způsobit tangenciální stlačení stěn a při malé tloušťce výtažku ztrátu stability plastické deformace projevující se vznikem zvlnění a vrás. Ze sestrojených diagramů průběhů napětí po obvodu stávajícího přístřihu a přístřihu sestrojeného s využitím TMSN je patrný rovnoměrnější průběh všech napětí u přístřihu sestrojeného s využitím TMSN.

- g) Z porovnání sestrojených hodografů rychlostí stávajícího přístřihu a přístřihu sestrojeného s využitím TMSN vyplývá, že přístřih sestrojený s využitím TMSN je z hlediska příznivějších kinematických poměrů při tažení výtažku vhodnější pro tažení levého krytu ventilátoru. Jsou zde příznivější kinematické poměry při tažení a díky tomu je mnohem menší nebezpečí vzniku prasklin, vln a vrás.
- h) Pro stanovení napjatosti a deformací plechu u výtažku levého krytu ventilátoru byla využita metoda deformačních sítí u výtažku ze stávajícího přístřihu, u výtažku z přístřihu stanoveného dle ČSN, metodou řezů a metodou využívající TMSN (viz kap. 7.2). Při zkoumání výsledných hodnot byla u všech výtažků zjištěna nejvyšší hodnota koeficientu využití zásoby plasticity  $\eta$  ve směru I deformační sítě, u stávajícího přístřihu v oblasti elementu *K6* tato hodnota dosahovala až  $\eta = 175,5\%$  (příloha A4.2). Právě zde také docházelo k největšímu ztenčení tloušťky plechu, u stávajícího přístřihu z počáteční tloušťky  $s_0 = 0,90$  mm na  $s = 0,62$  mm (příloha A4.2), u přístřihu stanoveného metodou využívající TMSN došlo ke ztenčení plechu z počáteční tloušťky  $s_0 = 0,90$  mm na  $s = 0,72$  mm (příloha A7.1). V této oblasti se nachází kritické místo, kde při tažení výtažku dochází nejčastěji ke vzniku prasklin. Z výsledných hodnot tedy vyplývá, že u stávajícího přístřihu je toto riziko vzniku praskliny největší.
- i) Metoda deformačních sítí byla provedena i v softwaru Dynaform 5.2 (kap. 7.3), kde byly po výpočtu a následné simulaci zjištěny obdobné závěry jako u experimentálně stanovené metody deformačních sítí. Výtažek ze stávajícího přístřihu vykazoval nejvyšší hodnotu hlavní poměrné deformace, nejnižší hodnotu hlavní poměrné deformace vykazoval výtažek z přístřihu

stanoveného metodou řezů po korekci polohy (tab. 7.1). Po srovnání výsledků počítačové simulace a výsledků stanovených experimentem bylo zjištěno, že software výsledky mírně nadhodnocuje. U výtažku z přístříhu nejvhodnějšího pro levý kryt ventilátoru (přístříh stanovený metodou využívající TMSN) se však jednalo o rozdíl v pouhých 8,42 % (tab. 7.2).

- j) Byla posouzena vhodnost užití brzdícího žebra v procesu tažení levého krytu ventilátoru (viz kap. 8). Pro daný výtažek bylo doporučeno použít jedno brzdící žebro v rovinné části přídržovače, protože zde se materiál přemísťuje největší rychlostí, jak bylo zjištěno v kap. 7. Poté byly navrženy určité varianty geometrie, délky i umístění brzdícího žebra ve vzdálenosti od vnitřního okraje přídržovače a ze všech těchto variant byl proveden výpočet s následnou simulací procesu tažení. Použití brzdících žebor má v procesu tažení nepravidelných výtažků řadu výhod (kap. 8.1). Z výsledků počítačové simulace bylo zjištěno, že ve všech variantách použití brzdícího žebra došlo ke značnému zmírnění tvorby vln na dně výtažku pod kritickým místem s poloměrem 12 mm. Nepříjemným jevem, ke kterému v průběhu simulace docházelo, byla tvorba praskliny v rovinné části výtažku (obr. 8.6) nebo v oblasti pod brzdícím žebrem (obr. 8.8). Tento jev se při simulaci tažení výtažku bez brzdícího žebra nevyskytoval. Je ovšem možné, že dosud nebylo nalezeno optimální žebro pro tažení složitého tvarového výtažku levého krytu ventilátoru. Tato oblast tedy může být dále předmětem výzkumu, kde by bylo velmi zajímavé porovnat výsledky počítačové simulace s experimentem.
- k) Přístříh sestrojený metodou využívající TMSN byl podroben experimentům v oblasti změny tvaru přístříhu v místě jeho vybrání (viz kap. 9). Bylo zjištěno, že přístříh s novým větším vybráním (viz příloha A8.1, výkres KMT-04-01) není vhodnou variantou přístříhu pro výrobu levého krytu ventilátoru. Oblast praskliny byla po vytažení poměrně velká, zato ale došlo ke zmírnění zvlnění na dně výtažku (obr. 9.2, obr. 9.3). Druhý pokus spočíval ve změně tvaru vybrání zkonstruováním tečny k poloměrům v místě vybrání (viz příloha A8.2, výkres KMT-04-02). Počítačová simulace tažení výtažku s takto upraveným přístříhem ukázala, že tento přístříh může být alternativou přístříhu sestrojeného s využitím TMSN (obr. 9.5, obr. 9.6). Oblast trhliny v kritickém místě je sice větší,

než u výtažku taženého z přístřihu sestrojeného s využitím TMSN bez úpravy vybrání, ale analýza tloušťky ukazuje v kritickém místě hodnotu tloušťky 0,5343 mm, což je pouze o 3,87 % méně, než u výtažku z optimálního přístřihu bez úpravy vybrání (obr. 6.18). Také došlo opět ke zmírnění zvlnění na dně výtažku. Výsledky počítačové simulace ukazují, že přístřih stanovený metodou využívající TMSN beze změn v oblasti vybrání (kap. 6.6.4) zůstává přes provedené experimenty optimální variantou pro výtažek levého krytu ventilátoru.

- l) Použití přístřihu sestrojeného metodou využívající TMSN je základním předpokladem odstranění zmetkovitosti při výrobě levého krytu ventilátoru. Pro tento přístřih byl tedy navržen nástřihový plán více metodami, z nichž nejvíce hospodárný nástřihový plán byl pro možnost výroby hydroabrazivním paprskem s využitím materiálu 71,16 %, což lze považovat za uspokojivé (viz obr. 10.8).
- m) Dle ekonomického zhodnocení lze při použití nástřihového plánu pro optimální přístřih s největší hospodárností oproti nástřihovému plánu pro stávající přístřih ušetřit ročně až 45 ks tabulí plechu.



## 13 Použitá literatura

- [1] ČADA, R. *Tvářitelnost ocelových plechů : odborná knižní monografie*. Lektorovali: L. Pollák a P. Rumišek. 1. vyd. Ostrava : REPRONIS, 2001. 346 s. ISBN 80-86122-77-8.
- [2] ČADA, R. *Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody tváření, plošná tvářitelnost (návody do cvičení) : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2002. 148 s. ISBN 80-248-0019-5.
- [3] Tatra, a. s. *Tatra, a. s.* [online]. Datum poslední aktualizace 5. 9. 2008, c 2006, [cit. 2009-05-06]. URL: <<http://www.tatra.cz/>>.
- [4] BŘEZINA, R., ČADA, R. *Speciální technologie - technologie tváření : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1992. 257 s. ISBN 80-7078-122-X.
- [5] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V. a SOMMER, B. *Tváření oceli*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1988. 520 s.
- [6] HRUBÝ, J., RUSZ, S., ČADA, R. *Strojírenské tváření : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1993. 152 s. ISBN 80-7078-201-3.
- [7] ČADA, R. *Technologie - část tváření a slévání (návody do cvičení) : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2000. 188 s. ISBN 80-7078-540-3.
- [8] RUSZ, S. *Tváření – část I : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2003. 156 s. ISBN 80-248-0340-2.
- [9] ELFMARK, J. *Tváření kovových materiálů : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1990. 249 s. ISBN 80-7078-042-8.
- [10] PETRUŽELKA, J. *Teorie tváření III : studijní texty* [online]. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Datum poslední aktualizace: 25. 5. 2007, [cit. 2009-01-15]. Dostupné z URL: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TTIII2007.pdf>>.
- [11] FRODLOVÁ, B. *Řešení napjatosti a deformací tvarového výtazku z tenkého plechu : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB-TUO, 2007. 91 s.
- [12] ČADA, R. *Plošná tvářitelnost kovových materiálů*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1998. 84 s. ISBN 80-7078-557-8.
- [13] ETA, Inc. *Eta/DYNAFORM User's Manual*. Version 5.2 Michigan : ETA, Inc., 2004. 360 s.
- [14] ETA, Inc. *Eta/Post User's Manual*. Version 1.0 Michigan : ETA, Inc., 2004. 127 s.

- [15] EVIN, E., HRIVŇÁK, A. a KMEC, J. *Získavanie materiálových údajov pre numerickú simuláciu*. In *Zborník prednášok 7. medzinárodnej konferencie TECHNOLÓGIA 2001* : 1. diel. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2001. s. 281-284. ISBN 80-227-1567-0.
- [16] BAREŠ, K. a kol. *Lisování*. 1. vyd. Praha : SNTL – nakladatelství technické literatury, 1971. 542 s.
- [17] ROMANOVSKIJ, V. P. *Příručka pro lisování za studena*. Přeložil: J. Vladyka. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1959. 537 s.
- [18] TIŠNOVSKÝ, M., MÁDLE, L. *Hluboké tažení plechu na lisech*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1990. 200 s. ISBN 80-30-00221-4.
- [19] TMĚJ, J. Brzdění plechu při tažení výlisků nepravidelných tvarů. *Strojírenská výroba : odborný časopis pracujících ve strojírenství*, duben 1972, roč. 20, č. 4, s. 214-220.
- [20] KOTOUČ, J. *Nástroje pro tváření za studena*. 3. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 1982. 158 s.
- [21] ČADA, R., KIJONKA, M. *Influence of input values changes on the simulation results in the Dynaform 5.2 software*. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada strojní, č. 1/2008*. VŠB-TUO. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. s. 33-40. ISBN 978-80-248-1891-7.
- [22] DVOŘÁK, M., MAREČKOVÁ, M. *Technologie tváření : Studijní opory pro kombinované studium I. stupeň, 2. ročník CTT-K* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006. [cit. 2009-04-29]. Dostupné z URL: <[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/technologie\\_tvareni/priklady\\_strihani.htm](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/priklady_strihani.htm)>.
- [23] Lithness, spol. s r. o. *Řezání vodou / LAVAP / Řezání vodním paprskem, dělení materiálu vodou, vodní paprsek* [online]. c 2008, [cit. 2009-05-06]. Dostupné z URL: <<http://www.lavap-rezani-vodou.cz/>>.



## 14 Seznam příloh

A1	Přílohy týkající se popisu výroby a technologického postupu výroby levého krytu ventilátoru	
A1.1	Jednočinný mechanický klikový lis ERFURT PKZZ I 31592 .....	197
A1.2	Technologický postup výroby levého krytu ventilátoru .....	198
A2	Přílohy týkající se konstrukce přístřihů	
A2.1	Levý kryt ventilátoru (výkres KMT-00-01).....	199
A2.2	Stávající přístřih krytu ventilátoru (výkres KMT-01-01) .....	200
A2.3	Konstrukce přístřihu krytu ventilátoru dle ČSN (výkres KMT-01-02) .	201
A2.4	Přístřih krytu ventilátoru dle ČSN (výkres KMT-01-03) .....	202
A2.5	Konstrukce přístřihu metodou řezů (výkres KMT-01-04).....	203
A2.6	Přístřih krytu ventilátoru stanovený metodou řezů (výkres KMT-01-05).....	204
A2.7	Konstrukce přístřihu dle TMSN (výkres KMT-01-06).....	205
A2.8	Přístřih krytu ventilátoru podle TMSN (výkres KMT-01-07) .....	206
A2.9	Přístřih krytu ventilátoru pomocí BSE modulu (informativní výkres KMT-01-08).....	207
A2.10	Porovnání přístřihů krytu ventilátoru (výkres KMT-01-09).....	208
A3	Přílohy týkající se vyšetření napěťových a kinematických poměrů výtazku metodou charakteristik	
A3.1	Tabulka hodnot napětí po obvodě stávajícího přístřihu.....	209
A3.2	Tabulka hodnot napětí po obvodě optimálního přístřihu.....	211
A3.3	Graf průběhů napětí po obvodě stávajícího přístřihu.....	213
A3.4	Graf průběhů napětí po obvodě optimálního přístřihu.....	214
A3.5	Hodograp rychlostí stávajícího přístřihu (výkres KMT-02-01) .....	215
A3.6	Hodograp rychlostí optimálního přístřihu (výkres KMT-02-02) .....	216
A4	Přílohy týkající se rozboru napjatosti a deformací výtazku levého krytu ventilátoru ze stávajícího přístřihu	
A4.1	Deformační síť (výkres KMT-03-01) .....	217
A4.2	Vyhodnocení deformační sítě na výtazku ze stávajícího přístřihu, směr I .....	218

A4.3	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku ze stávajícího přístřihu, směr II .....	219
A4.4	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku ze stávajícího přístřihu, směr IV .....	220
A4.5	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku ze stávajícího přístřihu, směr V .....	221
A4.6	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku ze stávajícího přístřihu, směr VII .....	222
A4.7	Průběhy vypočtených napětí ve směru I na výtažku ze stávajícího přístřihu .....	223
A4.8	Průběhy vypočtených deformací ve směru I na výtažku ze stávajícího přístřihu .....	224
A5	Přílohy týkající se rozboru napjatosti a deformací výtažku levého krytu ventilátoru z přístřihu dle ČSN 22 7303	
A5.1	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístřihu dle ČSN, směr I .....	225
A5.2	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístřihu dle ČSN, směr II .....	226
A5.3	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístřihu dle ČSN, směr IV .....	227
A5.4	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístřihu dle ČSN, směr V .....	228
A5.5	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístřihu dle ČSN, směr VII .....	229
A5.6	Průběhy vypočtených napětí ve směru I na výtažku z přístřihu dle ČSN .....	230
A5.7	Průběhy vypočtených deformací ve směru I na výtažku z přístřihu dle ČSN .....	231
A6	Přílohy týkající se rozboru napjatosti a deformací výtažku levého krytu ventilátoru z přístřihu stanoveného metodou řezů	
A6.1	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístřihu stanoveného metodou řezů, směr I .....	232

A6.2	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů, směr II .....	233
A6.3	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů, směr IV .....	234
A6.4	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů, směr V .....	235
A6.5	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů, směr VII .....	236
A6.6	Průběhy vypočtených napětí ve směru I na výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů.....	237
A6.7	Průběhy vypočtených deformací ve směru I na výtažku z přístříhu stanoveného metodou řezů.....	238
A7	Přílohy týkající se rozboru napjatosti a deformací výtažku levého krytu ventilátoru z přístříhu stanoveného metodou využívající TMSN (optimální přístřih)	
A7.1	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z optimálního přístříhu, směr I.....	239
A7.2	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z optimálního přístříhu, směr II .....	240
A7.3	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z optimálního přístříhu, směr IV .....	241
A7.4	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z optimálního přístříhu, směr V .....	242
A7.5	Vyhodnocení deformační sítě na výtažku z optimálního přístříhu, směr VII.....	243
A7.6	Průběhy vypočtených napětí ve směru I na výtažku z optimálního přístříhu.....	244
A7.7	Průběhy vypočtených deformací ve směru I na výtažku z optimálního přístříhu.....	245
A8	Přílohy týkající se konstrukce nového vybrání pro optimální přístřih	
A8.1	Přístřih krytu ventilátoru podle TMSN se změnou vybrání v podobě většího vybrání (výkres KMT-04-01).....	264
A8.2	Přístřih krytu ventilátoru podle TMSN se změnou vybrání v podobě tečny k poloměrům v místě vybrání (výkres KMT-04-02) .....	247